

|||||||
技術資料
 |||||

과공정 Al-Si 합금의 반고상 성형

김인준 · 김도향

Semi-solid State Forming in Hypereutectic Al-Si Alloy

I. J. Kim, D. H. Kim

1. 서 론

반고상 성형(semi-solid state forming) 기술은 고상과 액상이 공존하는 온도 영역에서 합금을 성형하는 방법으로, 주조 공정과 열간 압연 공정의 장점을 취한 공정으로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다. 반고상 가공은 고액공존 영역에 접근하는 방법에 따라 응고 도중 성형을 행하는 반응고 가공과 일단 응고 후 그대로 재가열, 또는 가공 후 재가열하여 성형, 가공하는 반응용 가공으로 구분되어질 수 있다[1-5]. 반응고 가공은 기계적 교반법, 전자기 교반법, 전자기 진동법, 반응용 가공의 경우 SIMA 법 등이 소개된 바 있으며 [6, 7] 반응고 가공으로 합금을 제조한 후 반응용 가공하여 부품을 성형하는 디소 포밍법(thixoforming)법도 많은 연구가 행해지고 있다. 효과적인 반고상 성형을 위해서는 초기 미세조직에 수지상 조직이 존재하는 것보다 미세한 구형 입자가 균일하게 분포하는 것이 바람직하다. 본 자료에서는 현재까지의 연구 결과를 바탕으로 과공정 Al-Si 합금의 반응고, 반응용 상태에서의 미세화 원소의 첨가와 전처리 방법에 따른 미세조직의 변화를 정리하고 각각의 공정에 대해 상호 비교해 보고자 하였다.

2. 반고상 성형

앞에서 언급한 바와 같이 고액공존 영역에서의 성형은 응고 도중 성형을 행하는 반응고 가공과 재가열하여 성형을 행하는 반응용 가공으로 나누어 볼 수 있고, 반응고 가공법으로는 기계적 교반법, 전자기 교반법, 전자기 진동법 등이 보고되어져 있다. 또한 반응용

가공법으로는 최초 주조시 입자를 미세화 시키는 방법과 가공 후 재결정에 의해 미세화 시키는 방법, 외부에서 강화재로서 초정 입자를 첨가하는 방법 등이 시도되어질 수 있다.

기계적 교반법은 설비가 간단하고 높은 전단력을 낼 수 있어서 미세조직 제어에 효과가 크나, 교반자의 마모에 따른 오염과 연속적인 생산의 어려움 때문에 대량생산에 적용하기에는 미흡한 면이 있다[8]. 전자기 교반법의 경우 교반자와 슬러리가 접촉하지 않아 오염을 피할 수 있고 연속적인 생산에 적합한 반면, 전자기력에 의해 미세조직을 제어하기 위해서는 많은 전력으로 인한 빠른 교반속도가 필요하고 따라서 원심력을 형성하여 무거운 초정 입자가 바깥쪽으로 집중되어 슬러리 내부의 농도구배가 심해지는 문제점을 지닌다. 전자기 진동법의 경우 오염이나 원심력 등의 문제는 피할 수 있으나 교반에 비해 수지상정 파괴 효과가 적어 미세조직 제어에 어려움을 보인다.

반용용 상태에서는 미세한 초정 입자를 얻기 위해, 가장 간단한 방법으로 최초 주조시 입자를 미세화 시키기 위해서 냉각속도를 빠르게 하는 방법을 고려할 수 있다. 또 SIMA(Strain induced melt activated)법으로 잘 알려진 것처럼 제조된 합금에 가공을 가한 후 재가열시 재결정을 유도하는 방법이 있고, 초정 주위에 산화막을 형성하여 초정의 조대화를 막기 위해 외부에서 초정 입자를 첨가하는 방법 또한 제시되어질 수 있다.

3. 과공정 Al-Si

과공정 Al-Si 합금은 공정 기지 내에 초정 Si 입자가 분포되어 있는 미세조직을 가지고 있어, 내마모성이

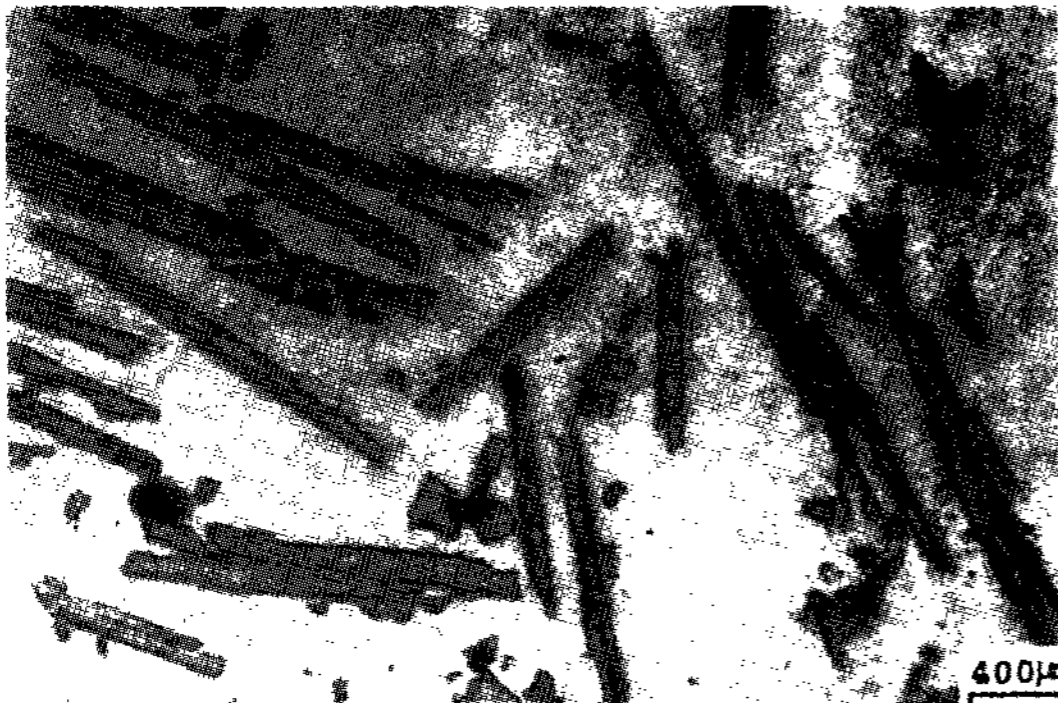


그림 1. 800°C에서 610°C까지 무교반 냉각시킨 Al-23wt% Si의 미세조직. 초정 Si은 판상 또는 다각형의 형상을 지님.

우수하고 주철과 유사한 열팽창율을 지나나 비중은 회주철에 비해 3배 이상 가볍고 열전도율도 3배에 달한다. 또한 가열시 강도 및 경도, 고온 유동성, 내부식성도 우수하나, 통상의 주조방법을 사용할 경우 초정 Si 입자의 조대화(>100 μm order)를 피할 수 없는 단점을 지닌다.

그림 1에서 보여지는 것처럼, 서냉하였을 경우 판상의 매우 조대한 입자상을 관찰할 수 있다. 분말야금 (powder metallurgy)이나 분무성형 (spray forming) 등의 압출을 통해 미세조직의 개선을 고려하고 있으나, 과공정 Al-Si 합금은 성형성이 떨어져 최종 형상까지 많은 기계가공을 필요로 하는 단점이 있다. 이러한 문제점에 대한 대안으로서 반고상 성형이 고려되고 있다.

그림 2에서 보이는 바와 같이, 과공정 Al-Si 합금은 Si 함량이 증가함에 따라 고액공존 온도 영역이 크게 증가한다. 현재 상용화되고 있는 과공정 Al-Si 합금은 25wt%Si 정도까지에 한정되고 있으며, 여기서 200 K에 가까운 고액공존 온도 영역을 지니고 공정점 근처에서도 고상율은 약 0.14로서 반고상 가공에 바람직하다.

4. 레올로지 특성

반고상 가공에서 중요한 공정 단계 중의 하나가 초정 입자의 형태 및 분율에 의하여 결정되는 반고상의 점성도이다. 초정 입자의 형태는 다른 합금의 경우와 마찬가지로 고액 공존 영역에서 교반력이 주어짐에 따라 점차 구형의 형상으로 조대화 하게 된다. 초정 조대화 현상은 Pb-Sn 합금을 이용하여, Wan과 Sham

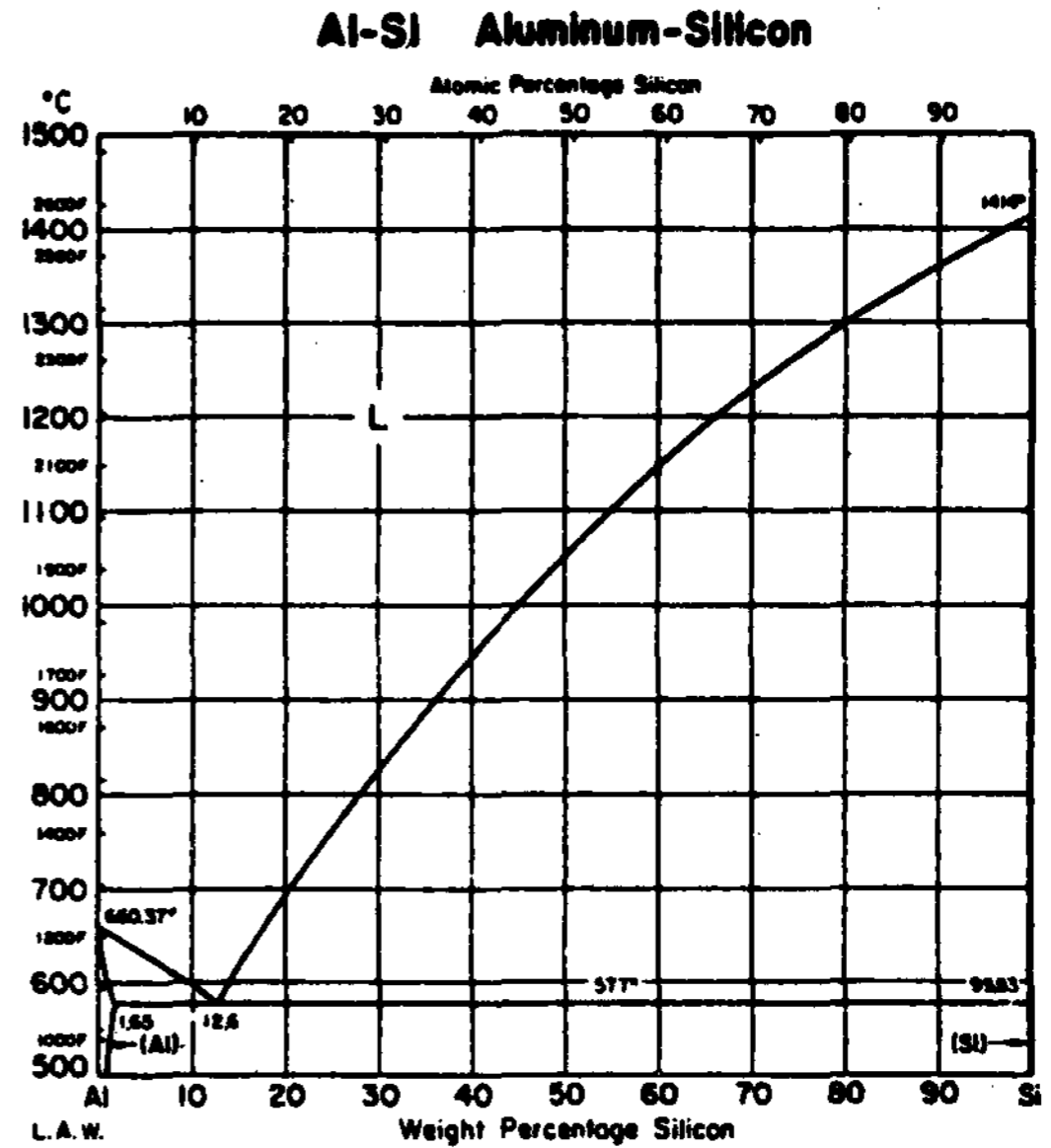


그림 2. Al-Si 상태도.

[9, 10]에 의해 자세하게 분석된 바 있지만, 시간에 따른 입자의 조대화 경향은 power law에 의하여 표시되어 질 수 있다. 초정입자의 조대화 경향을 설명하기 위해서 가장 우선적으로 사용되는 자료중의 하나가 입자간의 방위관계 측정 결과이다. 전자회절법을 이용하여 입자간의 방위관계를 측정할 수 있으며, 일반적으로 입자간에 coincidence site lattice boundary 등 특정 우선 방위에 부합하는 어떠한 방위관계도 용이하게 관찰되지 않는다. 또한 재가열 등의 여러 처리 상태에 따라 입자간의 방위관계는 거의 변함이 없음을 볼 수 있다. misorientation이 10 이하의 저경각 입계의 분율도 일반적으로 1~1.5% 정도로 매우 낮다. 즉 등은 교반등 반응고 가공시의 입자 거동에 있어서 입자끼리의 결합은 특정한 우선 방위관계를 가지며 이루어지는 것이 아니라 무질서한 방위관계를 가지며, 입자끼리의 합체(coalescence)에 의해서 입자의 조대화가 이루어지게 됨을 알 수 있다. 과공정 Al-Si합금에서도 다른 합금에서와 마찬가지로 교반을 하지 않은 경우에 비해서 평균 크기가 감소하게 된다. 이와 같은 크기 감소 경향은 다음 반응고 가공의 절에서 더욱 자세히 살펴보기로 한다. 또한 교반 속도가 어느 정도 되면 초정 입자의 크기 감소 현상은 더욱 증가되지 않고 정제 상태에 머물게 됨을 볼 수 있다. 이는 그림 3의 Diewwanit와 Flemings에 의해 보고된 Al-30,

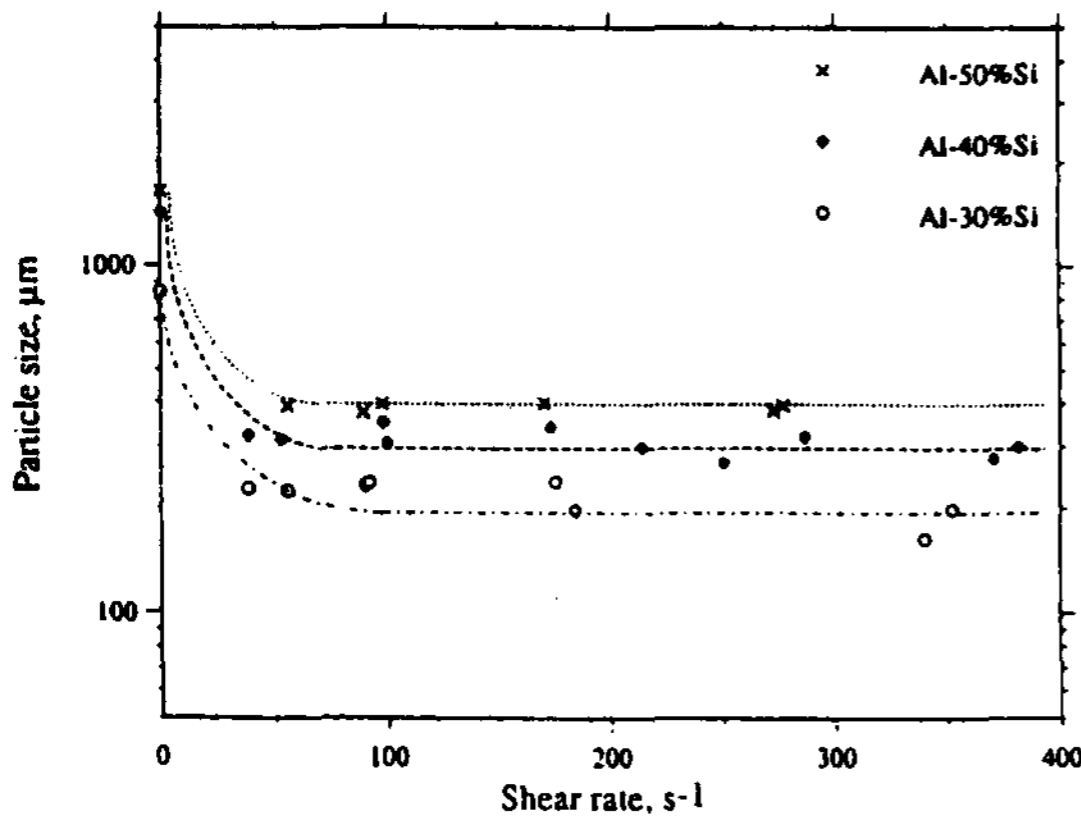


그림 3. 세가지 조성의 Si 함유 합금에서 공정 Si 입자 크기와 전단 응력간의 관계.

40, 50wt% Si 합금 경우에서 명확히 볼 수 있다. 또한 과공정 Al-Si 합금에서 Si의 양이 증가할수록 교반에 따른 Si 초정의 크기도 증가함을 볼 수 있다. 그림 3의 예에서는 170, 240, 290 μm로 증가하였다. 반고상 과공정 Al-Si 합금의 레올로지적 거동은 다른 합금의 경우와 비교하여 별 차이가 없다. 그림 4(a)는 Al-50wt% Si 합금을 여러 교반속도하에서 고상율이 변화하면서 교반하였을 때 점성도의 변화를 보여주고 있다. 그림의 결과에서 보듯이 다른 합금의 경우와 그다지 차이가 없음을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 Al- 30, 40, 50wt% Si 합금을 공정온도 직상의 온도에서 교반 속도에 따라 측정된 점성도의 변화를 보여주고 있다. 이공정 합금에 비해 약간 높기는 하나 점성도 값은 같은 order의 값을 전반적으로 보여주고 있다. 과공정 합금의 경우에는 특히 교반속도가 어느정도 이상되면 초정 Si 입자들이 원심력에 의해 점성도 측정시 벽쪽으로 이동하게 되어 점성도의 값이 감소하게 되는 현상이 나타나게 된다. 이와 같은 현상은 과공정 Al-Si 합금을 반응고 교반 방법으로 성형하는데 있어서 큰 어려움 중의 하나이다. 반면에 이와 같은 성질을 이용하면 내부에는 비교적 연한 조직이 존재하고 외부 표면쪽에는 초정 Si의 조대한 입자상이 존재하는 형태가 되어 특정용도의 내마모재에 활용되어질 수 있으며, 최근 이를 이용하기 위한 연구가 진행되어지기도 하였다.

과공정 Al-Si 합금의 경우에는 초정 Si이 적은 분량 존재해도 그림 1에 보였듯이 여러 형태의 초정 Si이 정출하며, 이 초정들이 서로 연결되어 존재하면 매우 높은 항복 유동응력을 나타내게 된다. 이와 같은 경향

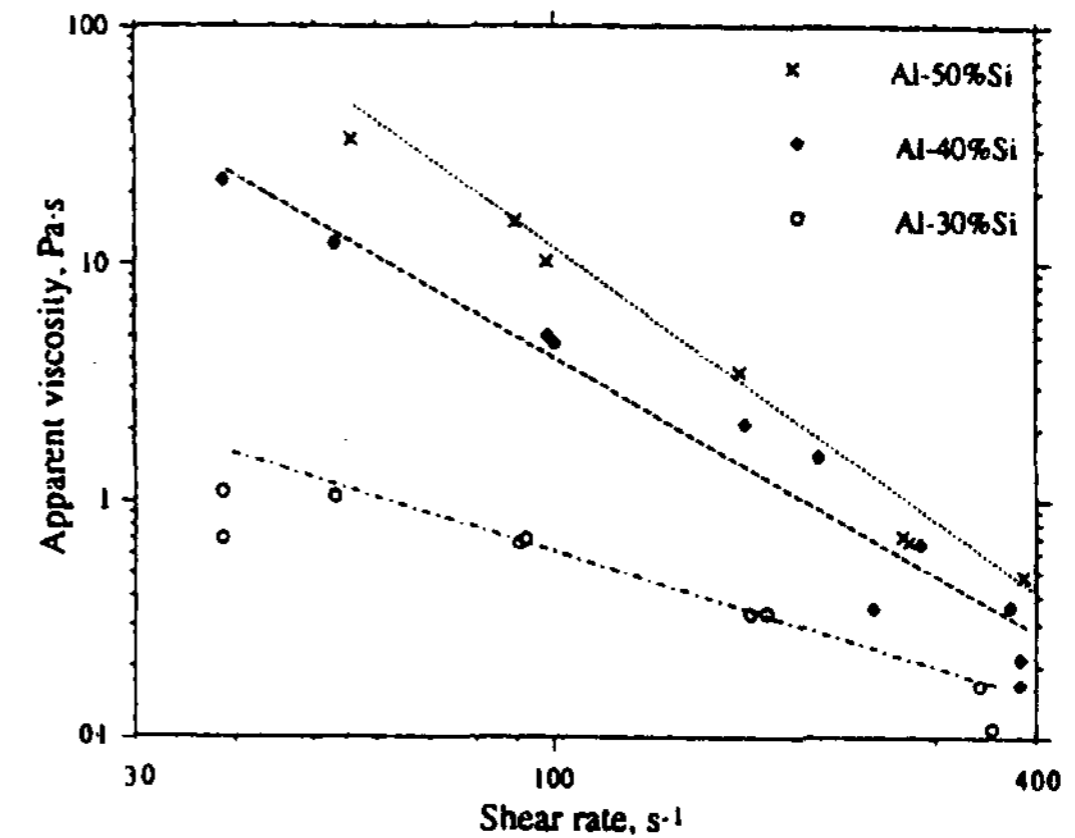
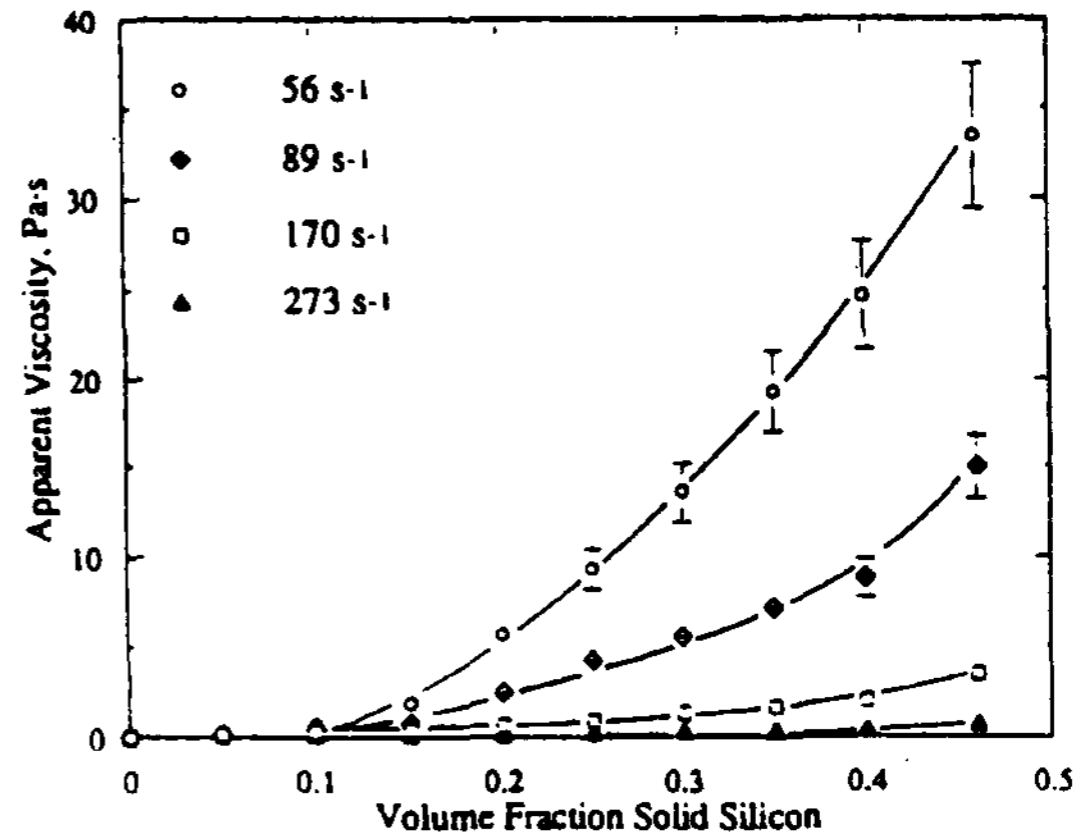


그림 4. (a) Al-50wt%Si 반고상 합금에서 점성과 Si 고상률, 전단 응력과 관계, 냉각속도: 40°C/분, (b) 공정점 직상에서 측정된 과공정 합금의 점성과 전단 응력과의 관계.

은 그림 5의 예에 나타나 있다. 그림 5에서 보듯이 초정 Si의 분율이 약 0.2 정도만 되어도 항복 유동응력이 100 KPa 정도로 엄청나게 증가함을 볼 수 있다. 즉, 아공정 Al-Si 합금이나 Mg 합금처럼 수지상의 초정이 형성되는 경우 보다 초정의 분율이 매우 적어도 반고상 합금의 항복유동응력이 커지게 됨을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 facet 형상의 초정이 판상의 형태로 형성됨에 따라 cohesive network를 형성하게 되어 초정이 수지상정인 경우보다 뚜렷하게 나타나게 되며, 또한 Si의 높은 강도에도 기인하게 된다. 이와 같은 반고상 과공정 합금의 높은 항복 유동응력은 실제 과공정 합금의 반고상가공시 매우 흥미로운 조건을 부여할 것으로 추측되어지며 교반응고 합금의 재가열시 변형거동 등의 분야는 앞으로 많은 연구가 필요한 부분이다.

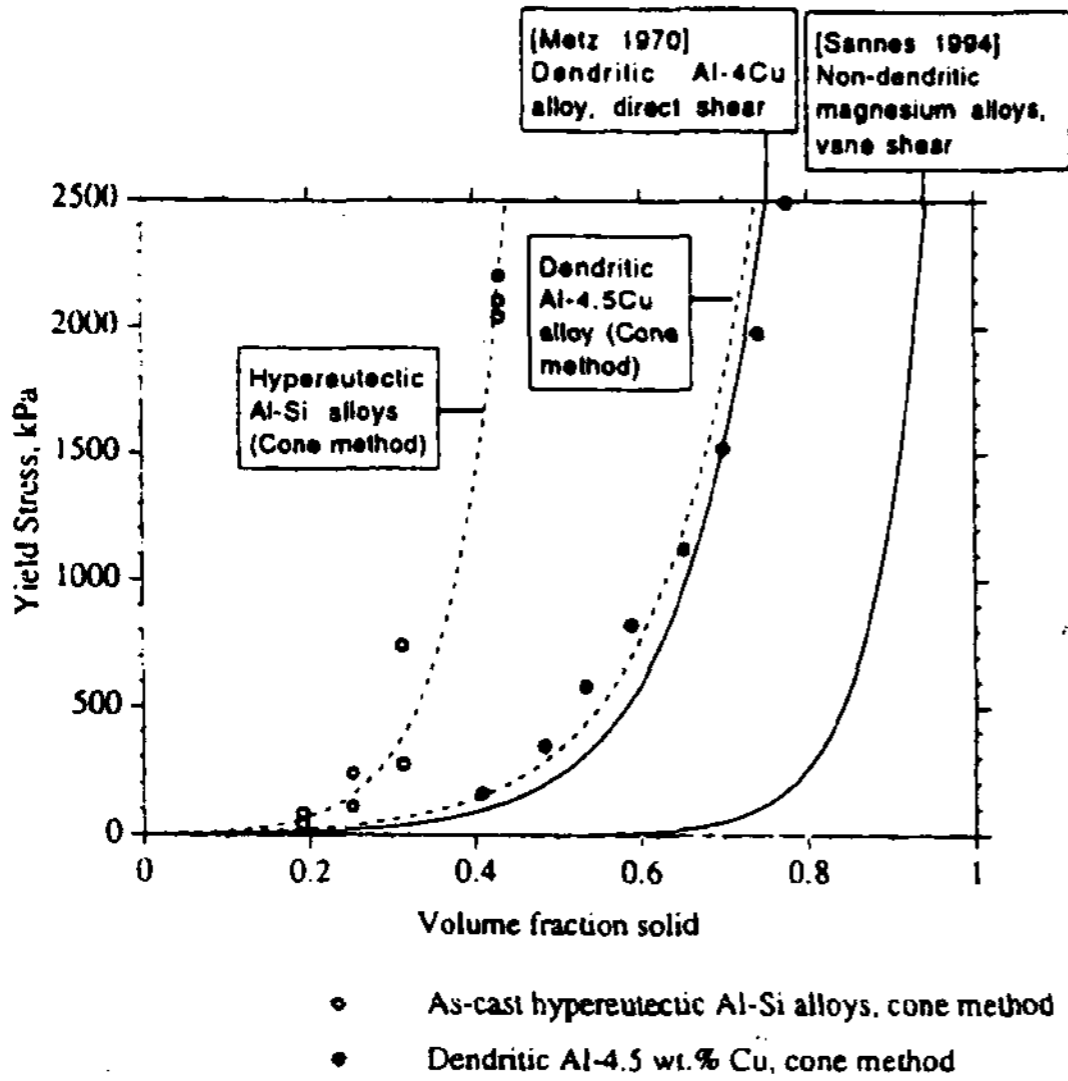


그림 5. 여러 합금에서의 항복점과 고상률과의 관계. cone penetration법에 의해 얻어진 Al-4wt%Cu의 항복점은 전단에 의해 얻어진 항복점과의 비교를 위해 표시하였음.

5. 반응고 가공

반응고 가공시 초정 Si 형성 기구는 지금까지 연속 냉각 혹은 등온유지시 기계적인 혹은 전자기적인 교반에 따른 미세조직의 관찰을 통해 이루어져 왔다. 통상적인 주조시 과공정 Al-Si 합금의 초정 Si는 쌍정기구(twin mechanism)를 기본으로 하여 형성되며, 응고 조건에 따라 다양한 형상을 나타내어 육각형의 초정 Si, 별 모양의 초정 Si, 그리고 판상의 초정 Si 등의 여러 형상을 갖게 된다. 그림 1에 보여졌듯이 서냉하였을 경우 각진 판상 혹은 막대 형태의 형상을 나타내고

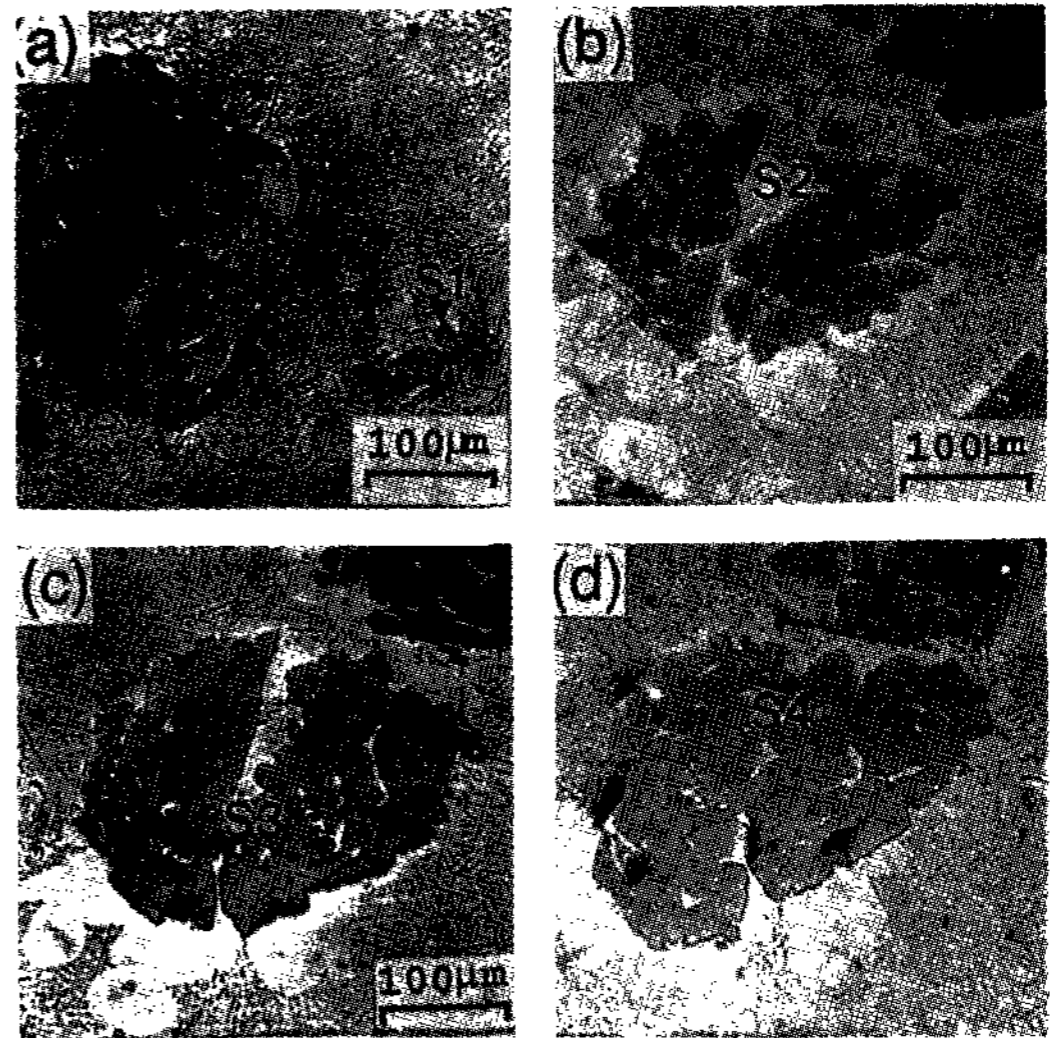


그림 7. (a)-(d) 580°C까지 5°C/분의 속도와 200 rpm의 교반 속도로 연속 냉각교반 후 serial section에 의해 관찰된 일련의 초정 Si 형상.

있다. 그러나 과공정 Al-Si 합금을 교반응고하면 무교반 응고시 나타나는 각진 판상 혹은 막대 형태와 매우 다른 형상을 보이며, 즉 그림 6에 보인 바와 같이 용탕을 냉각하면서 교반을 행하면 교반초기에 존재하던 facet Si이 점차로 구형의 형상으로 변화하였다. 이러한 초정 Si의 구상화는 그림 7에 보였듯이 단계적인 연마를 통해 초정 Si의 형상을 3차원적으로 관찰한 serial section 결과로부터도 확인이 가능하다.

과공정 Al-Si 합금의 냉각교반시, 초정 Si은 냉각과 함께 성장을 하며, 이와 동시에 합체에 의한 조대화, 그리고 초정 Si 충돌에 의한 파괴 등이 일어난다. 예를 들어 Al-23wt%Si 합금을 액상에서부터 고액공존 영역



그림 6. 800°C에서 580°C까지 5°C/분의 속도와 200 rpm의 교반속도의 연속 냉각교반시 초정 Si의 형상변화: (a) 700°C; (b) 650°C; (c) 580°C.

으로 연속냉각하면서 교반시 초정 Si의 크기는 냉각 교반 초기인 700 °C에서는 약 78 μm를 나타내었으며, 교반응고 말기인 580 °C에서는 약 173 μm로 평균크기가 매우 증가하였다. 이로써 파괴에 의한 초정 Si의 미세화보다는 성장과 합체에 의한 조대화가 지배적으로 작용하였음을 알 수 있다. 또한 가지 과공정 Al-Si 합금의 교반응고시 흥미로운 현상은 구형의 α-Al 및 공정조직의 형성이다. 예를 들어 과공정 Al-Si 합금을 5 °C/min의 냉각속도로 580 °C까지 무교반 응고 후 580 °C에서 등온교반하면, 초정 Si 이외에 particulate 형태의 미세한 공정 Si이 공정 α-Al 내에 고르게 분포해 있는 Al-Si 공정조직이 성장한다. 이러한 공정조직은 N. Apaydin이 보고한 Al-Si 공정조직과 유사하다. N. Apaydin은 공정 Al-Si 합금을 액상상태에서 교반한 후, 빠른 냉각을 하여 particulate 형태의 공정 Si이 공정 α-Al 내에 고르게 분포되어 있는 Al-Si 합금의 공정조직을 얻었다[11]. 단지 위의 Al-Si 공정조직과 상이한 점은 형성된 공정 Al-Si 조직이 교반에 의해 분리되어 α-Al은 구상화가 되었으며, 계속된 교반에 의해 조대화 되는 점이다. 이러한 과공정에 의해 형성된 구형의 α-Al의 평균 크기는 교반이 지속됨에 따라 Ostwald 성장, 합체 그리고 분리 과정을 통해 조대화된다. 대표적인 예는 그림 8에 나타내었다.

현재까지 연구된 바에 의하면, 고액공존 영역에서 교반응고를 행하면, 무교반응고조직이 파괴된 후 고상입자는 구상화된다. 이러한 구상화 현상에 대한 연구는 주로 nonfacet interface를 지나는 합금에 대해서 연구되어 왔다. nonfacet interface를 지나는 합금의 경우, 고액계면에너지는 결정학적 방위에 따라 변하지

않는다. 이와 같은 합금의 경우, 계의 에너지를 최소화시키기 위해 구형의 형상으로 변하게 된다.

그러나 facet interface 를 지나는 합금의 경우, 고액계면에너지는 결정학적 방위에 따라 변하게 되며, 이와 같은 이유로 인해 평형형상은 계면에너지가 작은 낮은 결정학적 지수를 갖는 조밀면으로 둘러싸인 다각형의 형상을 지니게 된다. 따라서 과공정 Al-Si 합금의 초정 Si과 같은 facet interface를 갖는 합금의 교반응고시 구상화는 nonfacet interface를 갖는 합금과 달리 계면에너지 최소화기구에 의해 구상화가 일어날 수 없음을 알 수 있다.

그림 9에 보였듯이 초정 Si은 교반응고 중에 초정 Si 입자간의 충돌이나 교반자와의 충돌에 의해 파괴되어 판상의 무교반조직이 파괴되며, 이와 동시에 초정 Si은 합체되어 저경각입계과 고경각입계를 지나는 다



그림 9. 5°C/분의 속도와 200 rpm의 교반속도로 연속 냉각 교반 중 700°C에서 얻어진 미세조직에 대한 주사전 자현미경 영상.

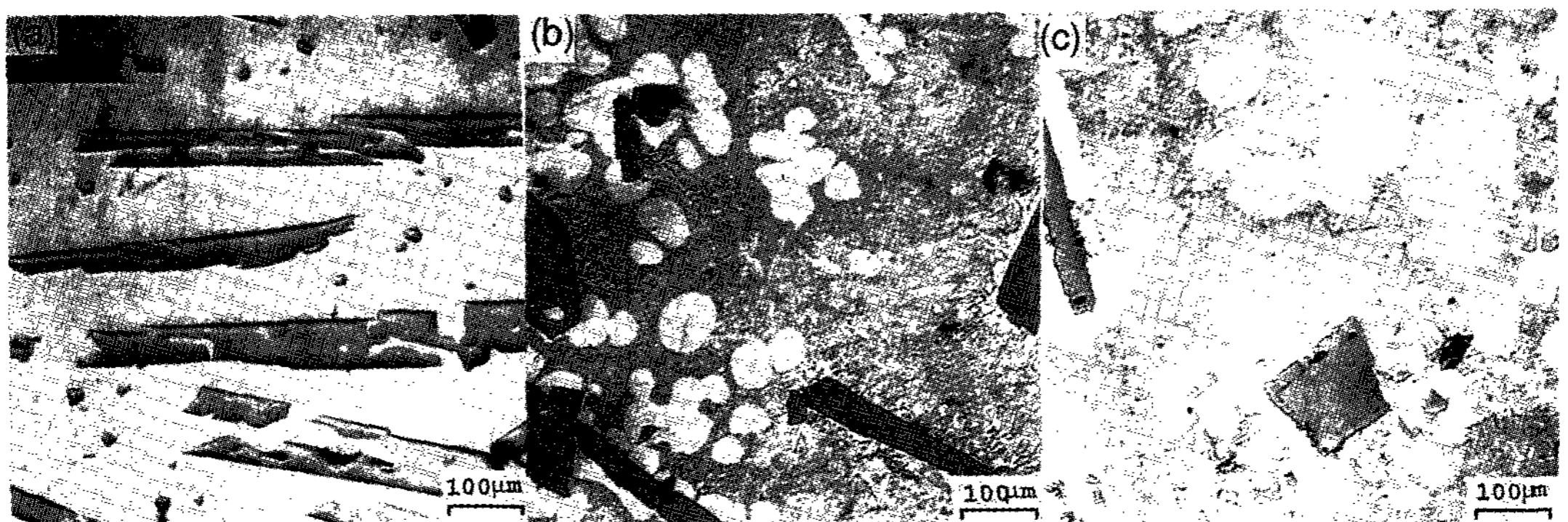


그림 8. 580°C에서 200 rpm의 교반속도로 등온 교반시 미세조직 변화: (a) 0분; (b) 6분; (c) 10분.

결정체를 형성하게 된다. 또한 파괴와 합체과정이 진행되면서 초정 Si 입자는 충돌에 의해 계면이 점차로 곡선화된다. 이러한 초정 Si 입자의 파괴, 합체, 그리고 마모 등의 과정이 복합적으로 결합되어, 교반초기의 facet Si 입자가 교반말기에 거의 구형화된다.

6. 반응용 가공

위에서 언급된 반응고 가공은 고액 공존상태에서 주조 가공하는 방법으로 완전 용융상태에서 일정한 온도로 응고시키면서 교반시키면서 미세한 입상의 합금 슬러리를 제조하는 방법이다. 이에 비해 반응용 가공은 주조시 응고제어에 의해 일단 결정립 미세화를 최대한으로 행한 후 단순히 가열, 유지하여 합금 슬러리를 제조하여 제품 성형을 행하는 방법으로 반응고 가공시의 교반 공정을 생략할 수 있으므로 에너지 절감을 꾀할 수 있으나, 반응고법과 비교하여 고액공존 합금 슬러리의 조직 제어에 한계가 주어질 수 있다. 마그네슘 합금의 경우 용해시의 강한 반응성 때문에 반응용 가공법이 많은 관심 하에 연구가 진행되고 있다[12-18].

반응용 가공 프로세스중 과공정 Al-Si 합금에 적용 가능한 프로세스로는 디소포징등의 공정을 들 수 있다. 특히 과공정 합금의 경우에는 반고상합금이 위에서 언급된대로 비교적 높은 항복 유동응력을 갖고 있기 때문에 다른 아공정합금과는 다른 공정 조건의 제어 및 특성 평가의 접근방법이 필요하게 된다. 또한 디소포징을 위한 반고상 합금의 제조에 있어서도 아공정 합금과는 다른 방법의 제시가 필요하게 된다. 이와 같은 반고상 합금의 제조 방법으로는

- i) 주조 조건의 부여에 의한 미세 조직의 미세화
- ii) 변형 부여에 의한 결정립 미세화
- iii) 불연속 계면부여에 의한 결정 미세화

등의 방법을 들 수 있다. 주조 조건의 부여에 의한 주조 조직의 미세화는 미세 원소의 첨가, 냉각 속도의 증대등을 들 수 있으며, 특히 과공정 합금의 경우에는 이와 같은 방법이 매우 잘 제시 되어 있다. 첨가하는 미세원소로는 P 등을 들 수 있으며, 냉각속도가 빠를수록 초정 Si 입자는 미세해 진다. 그림 10은 냉각 속도 차이에 의한 초정 입자 크기의 변화 및 이를 고액 공존 영역으로 재가열 했을 시의 미세 조직의 변화를 보여 주고 있다.

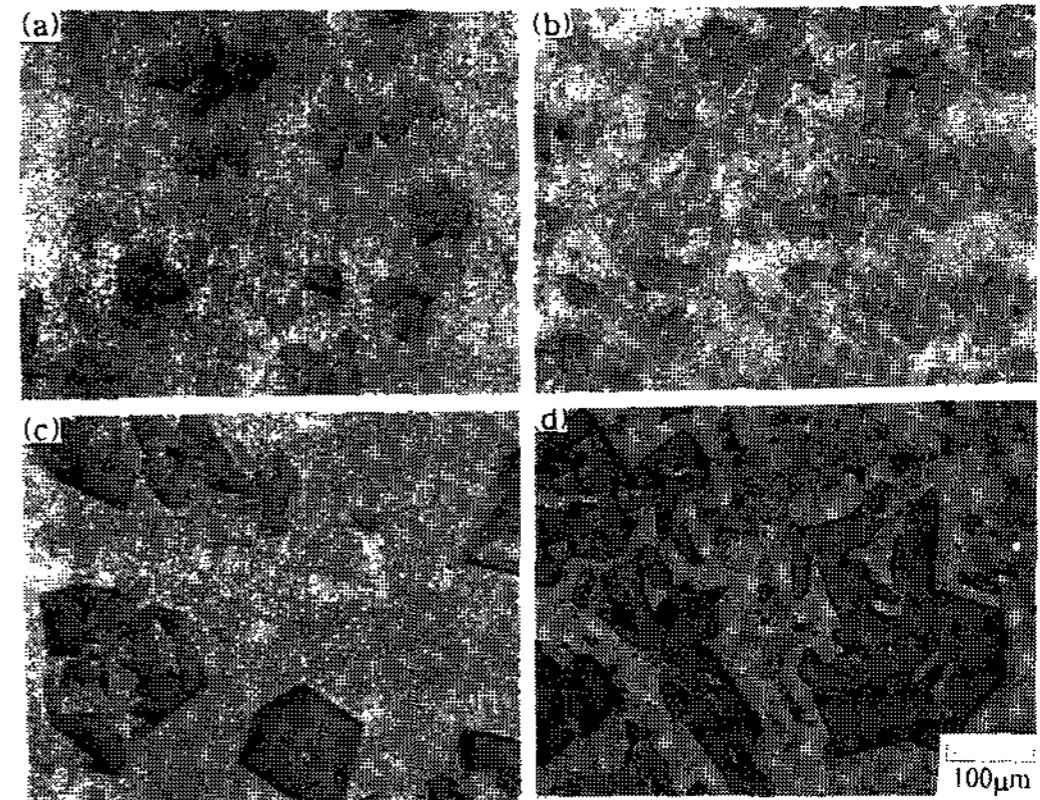


그림 10. Al 25wt%Si 합금을 금형주조한 미세조직: (a) 빠른 냉각속도, 주조상태; (b) a를 580°C에서 30분간 유지; (c) 느린 냉각속도, as-cast; (d) (c)를 580°C에서 30분간 유지.

금형주조시 냉각 속도가 느릴수록 초정 Si 입자의 크기가 큰 것은 성장할 시간이 충분했기 때문이며, 앞서 언급한 바와 같이 Si 입자가 성장함에 따라 α-halo가 성장하므로 냉각속도가 느릴수록 α-halo의 크기는 커진다. 반응용 처리했을 경우 α-halo는 기지의 상당부분을 차지할 정도로 크게 성장하였으며, α-halo 주위에 미세한 초정 Si 입자들이 다량 존재하고 있음을 볼 수 있다. 초정 Si 입자가 성장하면 입자 주위에 발생하는 국부적인 Si 성분 고갈로 인해 α-halo가 형성되고 Si 입자의 성장에 따라 상도 성장하게 된다. 이상의 성장에 의해 상 주위에 다시 국부적인 Al 성분 고갈이 발생하게 되어 미세한 Si 입자들을 형성하게 된다.

P을 첨가하면, 2원계와 비교하여 초정 Si 입자의 크기는 냉각속도가 빠를 경우에는 거의 변화가 없으나 냉각속도가 느린 경우에는 P이 들어간 경우 미세화되는 경향이 증대되었는데, 이는 입자가 성장하는데 충분한 시간이 있어야 첨가 원소 효과가 나타날 수 있기 때문이다. α-halo는 냉각속도에 따라 큰 변화가 없으며, 이는 다수의 핵생성에 의해 미세한 입자를 형성되는 P 첨가의 특성상 조대한 Si 주위에 국부적으로 집중되는 Si 고갈현상이 비교적 적었기 때문이다.

위의 경우에 긴 시간 반응용 처리하면, 고액공존 영역에서의 유지시간이 길어져 평형 고상률에 가까워지면서 고상확산보다 액상확산에 가깝게 되어 확산이 용이하게 된다. 이로써 Ostwald 성장이 강해지며, 미

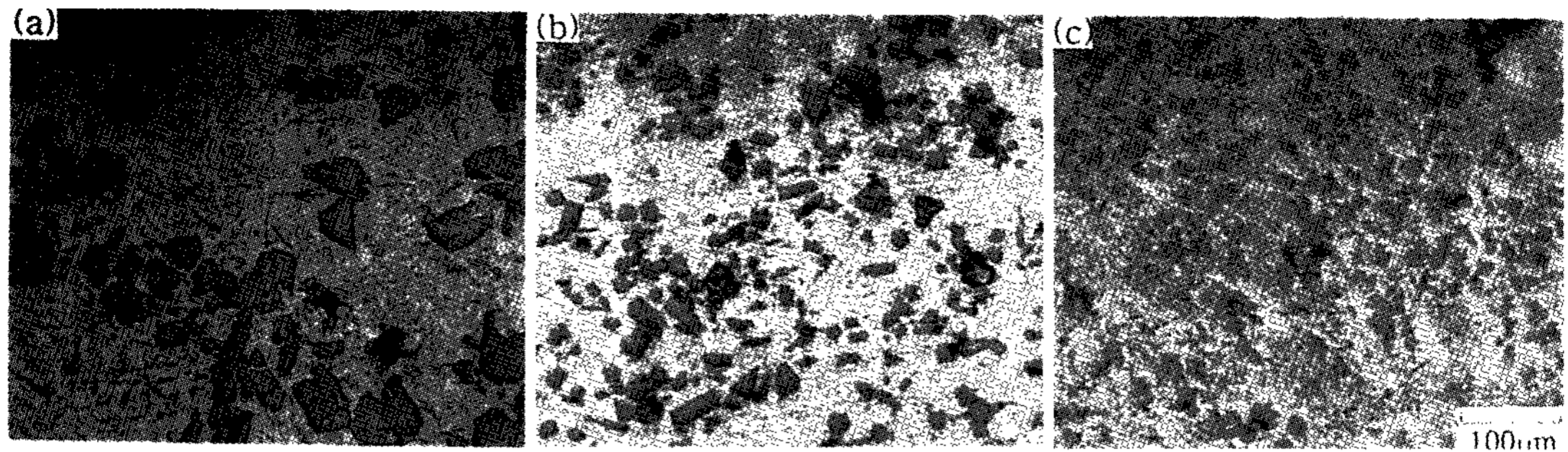


그림 11. 압연 판재에서의 미세조직: (a) Al-25wt%Si; (b) Al-25wt%Si-0.6wt%Cu-0.1wt%P; (c) Al-25wt%Si-0.1wt%Sr.

세한 Si 입자가 소멸하여 평균 입자크기가 다소 증가하고, 용이한 확산에 의해 기지 조직의 전반적인 균질화(homogenization) 경향이 나타나면서 조대하게 성장하였던 α-halo가 다시 감소하게 된다.

열간압연 후의 미세조직 변화는 그림 11의 예에서 보인 바와 같으며, 첨가원소 P과 Sr의 초정 Si 미세화 현상은 매우 강하게 나타났는데, 이는 압연으로 인해 재결정이 촉진되고 입자 분리에 필요한 임계값이 낮아졌기 때문이다.

Si 입자 강화 Al기 복합재를 반응용 처리시, 초정 Si 입자의 크기에는 큰 변화가 없었으며 특히 다른 방법으로 제조된 경우와 달리 α-halo가 거의 형성되지 않았는데, 이는 압출한 분말이 산화막을 가지고 있어서 기지와 초정 Si 입자간 확산이 어려웠기 때문이다. 분말 첨가시 각 분말을 둘러싸고 있던 산화막이 확산 장벽(diffusion barrier) 역할을 하여, α-halo는 거의 형성되지 않다가 반응용 후 냉각 단계에서 약간만 형성되는 양상을 나타낸다.

α-halo 형성기구를 그림 12에 도시하였다. 주조재 형성시 국부적인 Si 성분 고갈로 인해 α-halo가 형성되고, 이를 반응용 처리시 α-halo가 성장하면서 다시 국부적인 Al 성분 고갈이 발생하게 되어 미세한 Si 입자를 형성한다.

7. 결 론

알루미늄 합금의 반고상 성형은 많은 관심 하에 개발, 연구되어지고 있다. 지금까지 아공정 합금에 대한 반고상 성형 연구는 많이 이루어져 왔으나, 과공정 합금에 대해서는 비교적 적은 관심하에 연구되어져 왔다. 본 해설에서 살펴 보았듯이 일반적으로 반고상 상태에서의 과공정 합금의 미세조직 거동 규명은 비교적 많은 연구가 이루어졌으나, 이에 반해 반고상 합금 슬러리의 제조 및 성형에 관한 연구는 아직 많이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 주요 분야로는 반고상 성형 공정의 모델링, 반고상 합금 조직 미세화, 반고상 합금 변형 거동, 적용 합금의 다양화 등을 들 수 있으며, 가장 중요한 연구의 개념은 반고상 성형에 적합한 미세 조직 설계 및 변형 거동 규명을 들 수 있을 것이다. 특히 알루미늄 합금의 경우 현재까지의 개발 연구의 결과로 볼 때 부품제조 기술로서 상당한 진척이 이루어졌다고 볼 수 있다[19, 20]. 그러나 과공정 알루미늄 합금의 경우 아공정 알루미늄 합금의 경우와 비교하면 아직 기초 연구가 부족한 편이며, 향후 위에서 언급한 분야 등에서 활발한 개발 연구가 이루어진다면, 과공정 알루미늄합금의 반고상 성형 기술은 본격적인 부품제조를 위한 생산 공정으로 자리잡을 수 있

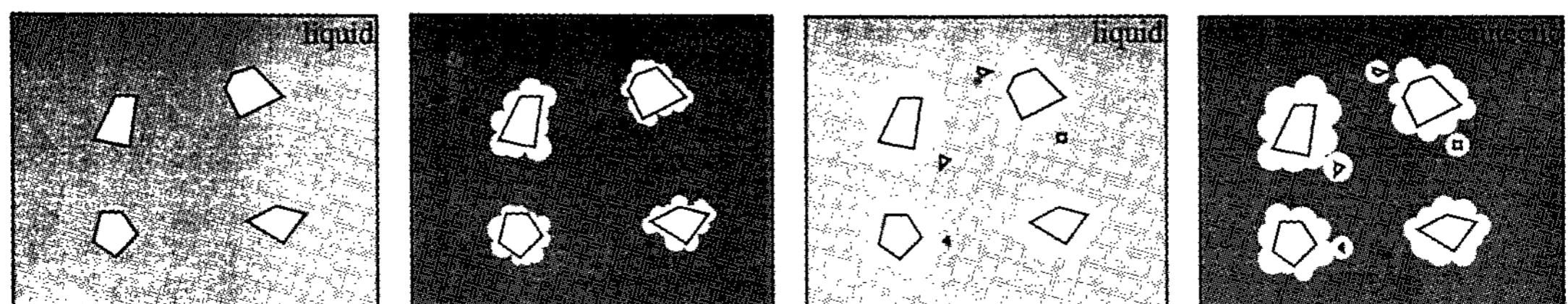


그림 12. 금형주조된 과공정 Al-Si 합금을 580°C에서 30분간 유지시 나타나는 α-halo 형성에 대한 모식도.

게 될 것이다.

참 고 문 헌

[1] B. D. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings: *Met. Trans. A*, 3 (1972) 1925

[2] M. Suery and M. C. Flemings, *Metall. Trans. A*, 13A (1982) 1809

[3] K. P. Young, D. E. Taylor, H. P. Cheskis and W. G. Watson: U. S. Patent 4, 482, 012 (1984)

[4] P. W. Wilson and T. Z. Kattamis: *J. of Mat. Sci.*, 23 (1988) 2882

[5] M.C. Flemings: *Metall Trans. A*, 22A (1991) 957

[6] P. A. Joly and R. Mehrabian: *J. of Mat. Sci.*, 11 (1976) 1393

[7] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young: *Mater. Sci. Eng.*, 25 (1976) 103

[8] Akihiko Nanba: *輕金屬*, Vol. 45 (1995) 42

[9] G. Wan and P. R. Sahm: *Acta Metall. Mater.*, 38 (1990) 967

[10] G. Wan and P. R. Sahm: *Acta Metall. Mater.*, 38 (1990) 2367

[11] G. Wan, S. C. Hardy and P. W. Voorhees: *ACTA Metall. Mater.*, 39 (1991) 2931

[12] 김달식, 김길수, 김영직: *한국주조공학회지* 제16권 3호 (1996) 205

[14] K. Sekihira, S. Onishi, S. Kamado and Y. Kojima: *경금속*, 45 (1995) 516

[15] K. Sekihira, S. Onishi, S. Kamado and Y. Kojima: *경금속*, 45, (1995) 560

[16] S. Kamado, K. Sekihara, S. Ohnishi and Y. Kojima: *경금속*, 46 (1996) 77

[17] 정운재, 김기태, 홍준표: *한국주조공학회지*, 16 (1996) 384

[18] 정운재 (1997) 연세대학교 박사학위 논문

[19] G. Chiarmetta: in *Proc. on 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Ed. by D. H. Kirkwood and P. Kapranos, The Univ. of Sheffield (1996) 204

[20] K. P. Young: in *Proc. on 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Ed. by D. H. Kirkwood and P. Kapranos, The Univ. of Sheffield (1996) 229