

논문

Rheocompocasting한 Al-Cu-Ti/SiCp 복합재료의 조직

윤여창, 최정철*, 홍성길**

Microstructure of Rheocompocast Al-Cu-Ti/SiCp composite

Yeo-Chang Yoon, Jung-Chul Choe and Sung-Kil Hong**

Abstract

An Al-composite material was fabricated with using the rheocompocasting process and the microstructure of the Al-Cu/SiCp composite material was investigated depending on the stirring times and the amount of Ti additions. The distribution of SiC dispersion shows the good result at the stirring time of 30 min. The degree of microdistribution of the Al₂Cu and SiCp is improved when the amount of Ti addition is increased. At the composition of 0.3%Ti, the primary solid is the compound of Al₃Ti and no exist of the SiCp and Al₂Cu phase around the primary Al₃Ti. In the process of compositization, SiCp is found at the primary and final solid parts and is found at the final solid part after remelting. Al₂Cu and SiCp are distributed around and outside of dendrite or independently after remelting, which is different from the process of compositization.

1. 서론

기계적 용탕 교반법중의 하나인 레오컴포캐스팅법은 강화재와 액상기지합금사이의 낮은 젖음성(Wettability)을 감안하여 액상과 고상이 공존하는 반응용(slurry)상태의 합금을 강한 교반과 함께 연속 주조하고 반응용상이 갖는 점성도를 이용하여 단섬유(short fiber), whisker, 분말 등을 기지합금내에 분산시킬 수 있으므로 근래에 들어서 분산강화복합재료의 제조방법으로서 연구가 활발히 진행되고 있다.[1]~[3] 또한 기공의 생성을 감소시키면서 Al합금에 SiCp를 복합화하면 고강도, 경량화의 효과를 가진 분산강화 복합재료를 얻을 수 있다.[4][5]

금속기복합재료는 강화재의 강도에 기계적 성질이 의존하는 면도 있지만, FRP와 달리 용접을 할 수 있는 등 기지에 의한 면도 크다고 할 수

있다. 그러므로 제조시 강화재의 분산뿐만 아니라 기지의 편석, 기포, 용접성 등도 고려해야 하며 이들은 응고과정에 크게 영향받는다. Al합금 중에서는 Al-Cu계 합금이 강도가 가장 우수하여 복합재료의 기지로서 자주 거론되고 있다.[6]~[9] 한편 실용합금에는 기계적 성질의 향상, 결정립미세화등을 위하여 Ti, Cr, Mn, Zr등의 유효미량원소를 첨가하고 있다. 그러나 유효원소로 미량 첨가되는 Ti등에 대한 영향은 잘 알려져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 기지금속과 세라믹강화재와의 낮은 젖음성을 고려해 고액이 공존하는 영역이 넓은 Al-Cu slurry에 강화재를 첨가하여 복잡한 형상이 얻기 쉬운 레오컴포캐스팅법을 이용했다. 이 때 교반시간의 변화에 의한 강화재의 분산, 또 일반재료에서 미량 유효원소로서 첨가되어 결정립미세화제로 효과가 큰 Ti이 복합화

금원사(Kumwon Co. LTD)

*아주대학교 재료공학과(Department of Materials Science and Engineering, Ajou Univ., RASOM)

**한국기계연구원(Korea Institute of Machinery and Metals.)

에 미치는 영향과 분포거동에 대해서도 조사 검토했다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험장치로는 Thermo controller, Motor controller, 분위기 가스, Inlet(SiCp)등으로 나눌 수 있다.[11] 세부적으로는 Thermo controller에는 발열체를 칸탈선으로하여 자체 제작한 전기저항로와 원통형 알루미늄 도가니, K type 열전대등이 있고, Motor controller에는 DC Motor와 Impeller, 속도조절장치등이 있다. 또한, 분위기 가스에는 불활성가스인 Ar 가스와 수분제거용 필터를 이용하였으며, Inlet는 직경 3mm stainless tube를 사용하였다.

2.2 시편제작

실험에서 사용한 중간 합금은 순 Al ingot(99.9%)와 Al-50%Cu합금, Al-10%Ti합금을 이용하여 우선 Al-4wt%Cu합금 및 Ti 0.05, 0.15, 0.3wt% 첨가 합금을 제조하였다. 기지합금의 조성의 분석치는 Table 1에 나타난 것과 같다. 그리고, 3가지 합금에 공통으로 mesh 200으로 최대직경 130 μ m인 SiCp(99.9%)를 증류수로 세척한 다음 아세톤 내에서 초음파 세척기로 세척한 후 건조기에 넣어 건조한 시료를 5wt%첨가하였다. 준비된 Al합금계(액상선온도:650 $^{\circ}$ C, 고상선온도:580 $^{\circ}$ C)의 중간합금은 원통형 알루미늄 도가니에서 약700 $^{\circ}$ C로 용해후 C₂Cl₆로 탈가스처리하였다. 세척된 SiCp는 650 $^{\circ}$ C에서부터 교반하면서 고상률 40%인 639 $^{\circ}$ C의 온도에 도달했을 때 첨가하였는데, SiCp의 첨가로 인한 용탕의 온도변화를 방지하기 위하여 1g/min씩 첨가하며 400rpm으로 교반하였다. 고상률(fs)은 다음과

같이 예측하였다.[10]

$$f_s = [(T_1 - T) / (T_1 - T_s)]^{1/2} \times 100 \quad (2.2.1)$$

여기서, T₁은 액상선온도이고, T_s는 고상선온도다.

교반과 동시에 Al은 고온에서 산화가 대단히 빠르므로 Ar 가스를 필터를 통하여 분사하였다. 교반온도는 639 $^{\circ}$ C, 교반속도는 400rpm으로 고정하여 SiCp를 모두 주입한 후 분산도를 관찰하기 위하여 교반시간에 따라 10분, 20분, 30분에서 각각의 시편을 채취하였다. 또한, 재용해한 후 직경 20mm 길이 200mm인 봉형 흑연몰드에 주조한 시편을 얻었다.

2.3 시편관찰

제작된 시편은 적당한 크기로 절단하여 sand paper #1000까지 grinding후 미세화 정도를 관찰하기 위하여 Tucker's부식액(45% HCl+15% HNO₃+15% HF+25% H₂O)으로 적당한 거시조직이 보일 때까지 etching한 다음 수세하여 건조시킨 후 조직을 관찰하였다. 또한, grinding과 천연마를 거친 시편을 Keller's부식액(1% HF+1.5% HCl+2.5% HNO₃+95% H₂O)으로 micro etching하여 각 온도에서의 고상률과 교반시간에 따른 강화재의 미세분산조직 및 재용해후 주조된 시편을 광학현미경으로 관찰하였다. 강화재와 기지합금사이의 결합상태를 관찰하기 위하여 주사전자현미경으로 조직을 관찰하고 EDS(HITACH, S-2500C)분석을 행하였다.[3]

3. 실험결과 및 고찰

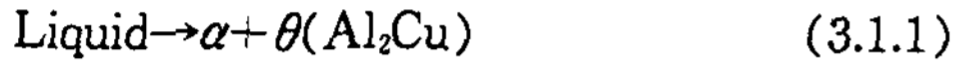
3.1 교반시간에 따른 기지합금의 조직

레오컴포캐스팅법을 이용한 복합재료의 제조에 있어서 기지합금과 강화재의 젖음성 향상을 위하여 기지합금을 반응용상태로 유지할 필요성

Table 1. Chemical composition of the matrix alloy.(wt%)

Alloy	Chemical composition					
	Cu	Ti	Fe	Ni	Zn	Al
Al-4Cu	3.9	—	0.19	0.04	0.01	bal.
Al-4Cu-0.05Ti	4.3	0.05	0.23	0.01	0.02	bal.
Al-4Cu-0.15Ti	4.1	0.16	0.17	0.01	0.02	bal.
Al-4Cu-0.3Ti	4.3	0.31	0.19	0.03	0.02	bal.

이 있다. 반응용상태의 점성도는 기계적교반 효과 및 강화재의 분산에 큰 영향을 미치는데도 불구하고 이에 대한 자료는 거의 전무한 상태이다. [8] Al-4wt%Cu의 경우는 주조용 합금으로서 강도와 절삭성 및 연신율이 좋고 비교적 응고온도범위가 넓어, 기지합금으로서 반응용상태 즉 고액공존영역의 유지가 쉽기 때문에 레오컴포캐스팅에 적합하다. 이 합금은 응고과정중 액상선으로부터 초정 α 를 정출하고 온도강하와 함께 이것이 성장하는 한편, 용액중의 Cu농도가 액상선을 따라 공정조성까지 농축되어 공정반응에 의하여 $\alpha+\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 가 정출한다.



Al-Ti합금의 경우 주조과정에 있어서 포정반응을 하기 때문에 본 실험에서는 Ti의 조성을 포정점을 중심으로 0.05%, 0.15%, 0.3%로 구분하였다. Ti양은 실용 전신재가 약 0.05%, 주조재에서 0.15% 그리고 주조재에서 가장 많은 양일 경우 0.3%라는 점에서 선정했다. 0.3%합금은 응고가 진행됨에 따라 액상선에서 $\beta(\text{Al}_3\text{Ti})$ 가 정출한다.[9] 그후 조성에 따라 아래와 같이 포정반응이 일어나며 비평형 응고시는 포정계 반응은 고상이 관여하는 관계로 충분히 진행되지 못하는 경우가 많다.



Photo 1은 Al-4wt%Cu 2원 합금을 각 온도에서 수증소입한 조직사진이다. 고상률은 각각 20%, 40%, 50%이다. 원래 액상이었던 부분은

급냉으로 인하여 미세한 덴드라이트조직을 보이고 있다. 조대한 덴드라이트 모양이 초정 α 이며 그 간격에는 $(\alpha+\theta)$ 의 공정조직이 존재하고 있다. θ 상은 비평형 응고에 의한 것으로 α 응고시 배출된 농축 액상이 균질화하지 못하고 정출되어 실온에 이른 것이다. 실온에서는 Al-4wt%Cu의 경우 용해도 곡선을 통과하여 θ 상의 석출이 기대되나 639°C로 부터 급냉 되었으므로 석출상은 나타나지 않는다. slurry상에 강화재를 첨가했을 경우 이 액상영역으로 침적하게 되며 그림에서 알 수 있듯이 온도감소에 따라 고상률이 증가하게 된다. 고상률의 증가는 점성도를 증가시켜 강화재의 침적을 향상시키지만 지나친 고상률의 증가는 상대적으로 액상량이 감소하기 때문에 강화재가 좁은 액상영역에 미시편재 될 수 있으므로 알맞은 고상률의 유지가 필요하다.

레오컴포캐스팅법에서 최적의 공정을 좌우하는 것은 강화재의 표면상태, 교반속도, 교반온도 등이지만 교반온도의 경우 6061합금에서는 고상률 약 40%정도가 알맞은 조건으로 보고되어 있다.[11] 따라서 본 실험에서는 Al-Cu계의 상태를 기준으로 lever-rule에 의해 계산된 고상률 40%인 639°C에서 시편을 제조하였다.

Photo 2에 본 실험에 사용한 SiCp의 주사전자 현미경 사진을 나타내었다. SiCp는 괴상의 분말을 나타내며, 그 크기는 mesh 200으로 최대 130 μm 이다. Photo 3은 상기 Al-Cu 및 SiCp를 가지고 복합재료를 만들며 교반시간에 의한

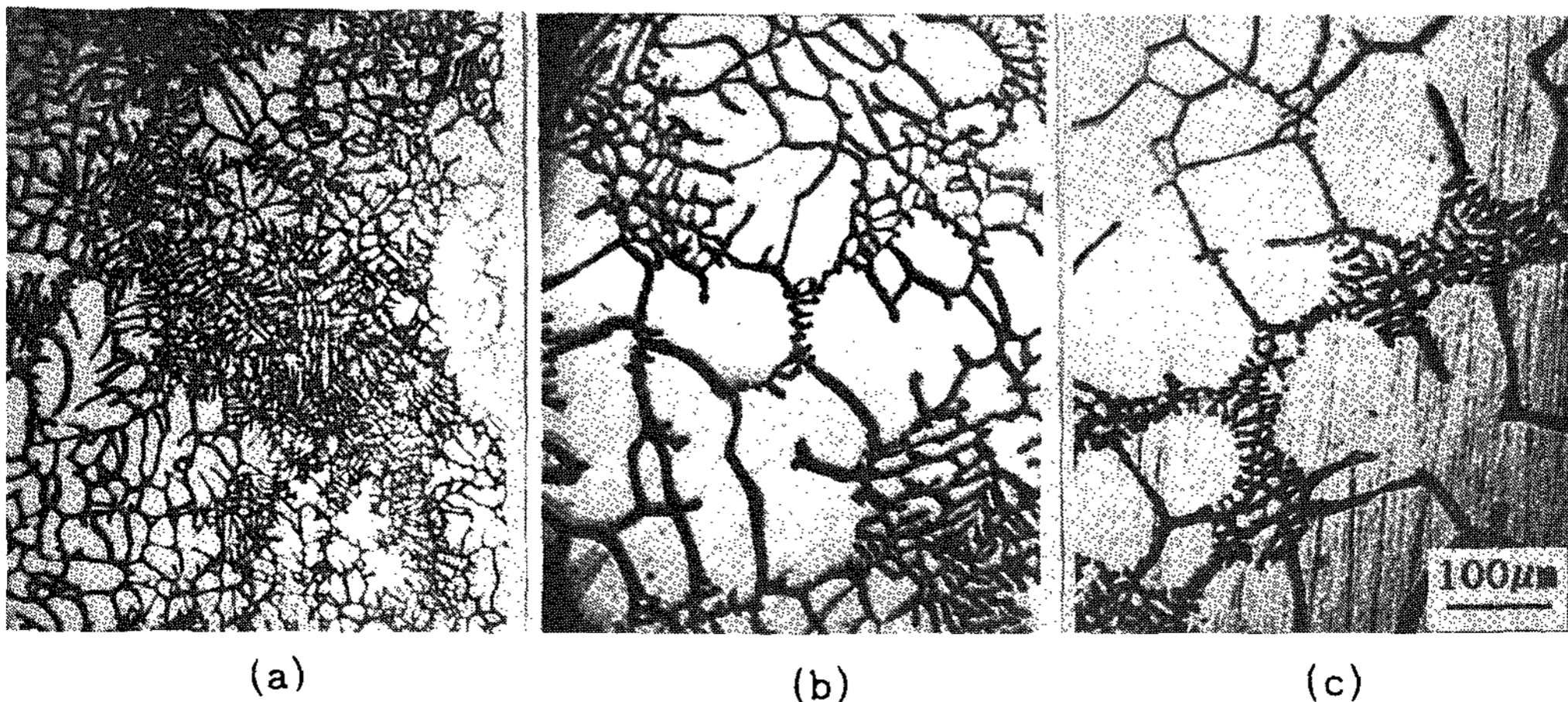


Photo 1. Solid fraction in slurry at (a)(647°C)20% (b)(639°C)40% (c)(633°C)50%



Photo 2. Scanning electron microphotograph of the SiC particles.

SiC분산도를 관찰한 조직이다. Al-4wt%Cu합금에 5wt% SiCp를 첨가하며 고정된 교반온도(639°C)에서 10, 20, 30분간 각각 교반하였다. Fig. 1에서 관찰되는 θ 상은 관찰되지 않는다. 이는 부식을 하지 않았기 때문에 담황색의 연한 θ 상은 진한 SiCp 및 기공에 가려 보이지 않기 때문이다. 실제 θ 상은 SiCp 인접부위 및 모재에 존재한다.

그림에서 검게 나타난 부분은 기지합금의 slurry내에서 분산되지 않고 남아 있는 SiCp이 포함된 기공인데 주로 10분, 20분의 교반시간에서 관찰되었다. 10분 교반한 경우는 SiCp가 편재하고 기포로 된 SiCp덩어리도 존재하지만 이들은

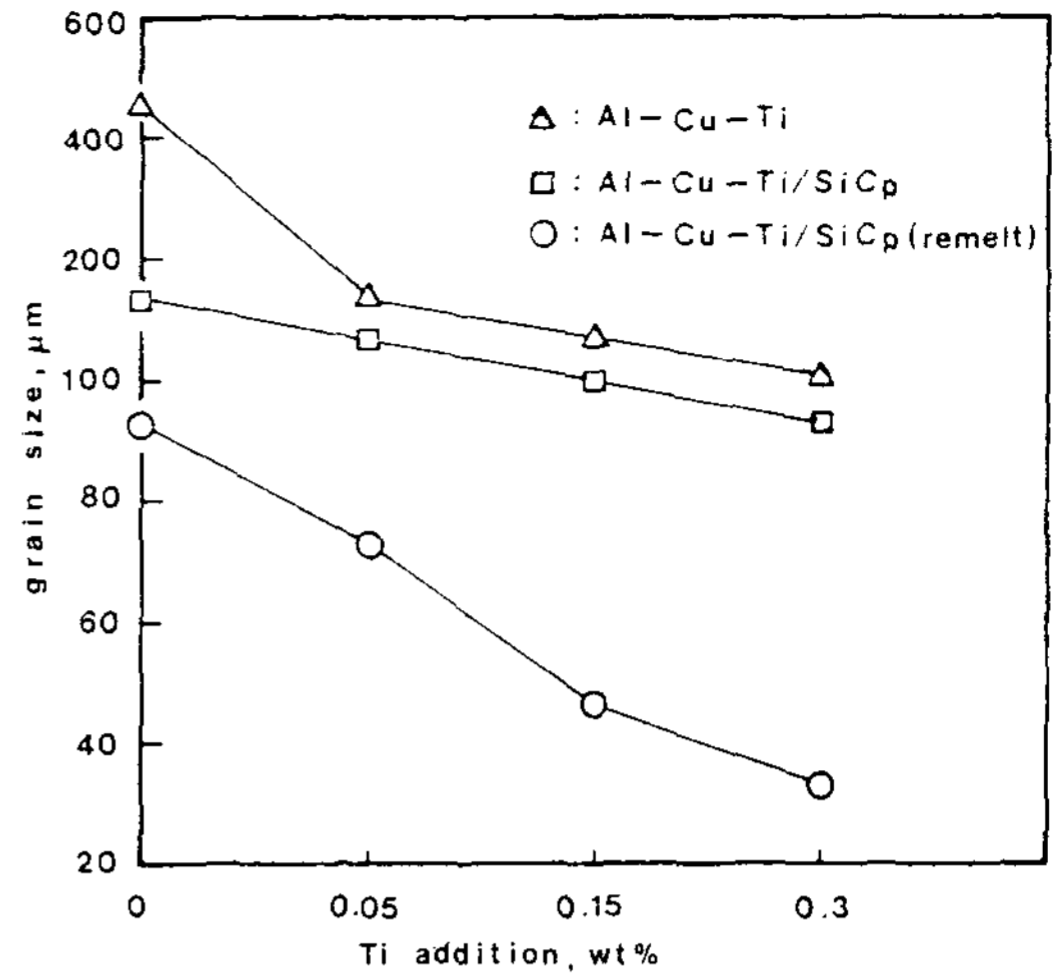


Fig. 1. Grain size change with Ti addition.

10분, 20분, 30분으로 교반시간이 증가함으로써 효과적으로 파괴되어 기지금속내에 분산되는 것을 알 수 있다.

또한, 이미 보고된 바에 따르면 고온에서 진행되는 항온교반이기때문에 교반시간이 증가하면 고상이 조대화되어 강화재의 균일한 분산에 저해가 된다고 보고하고 있지만 기공의 감소와 강화재의 분산정도를 감안하면 본 실험에 사용한 합금에서는 30분의 교반시간은 비교적 적당하다고 사료된다.[1]

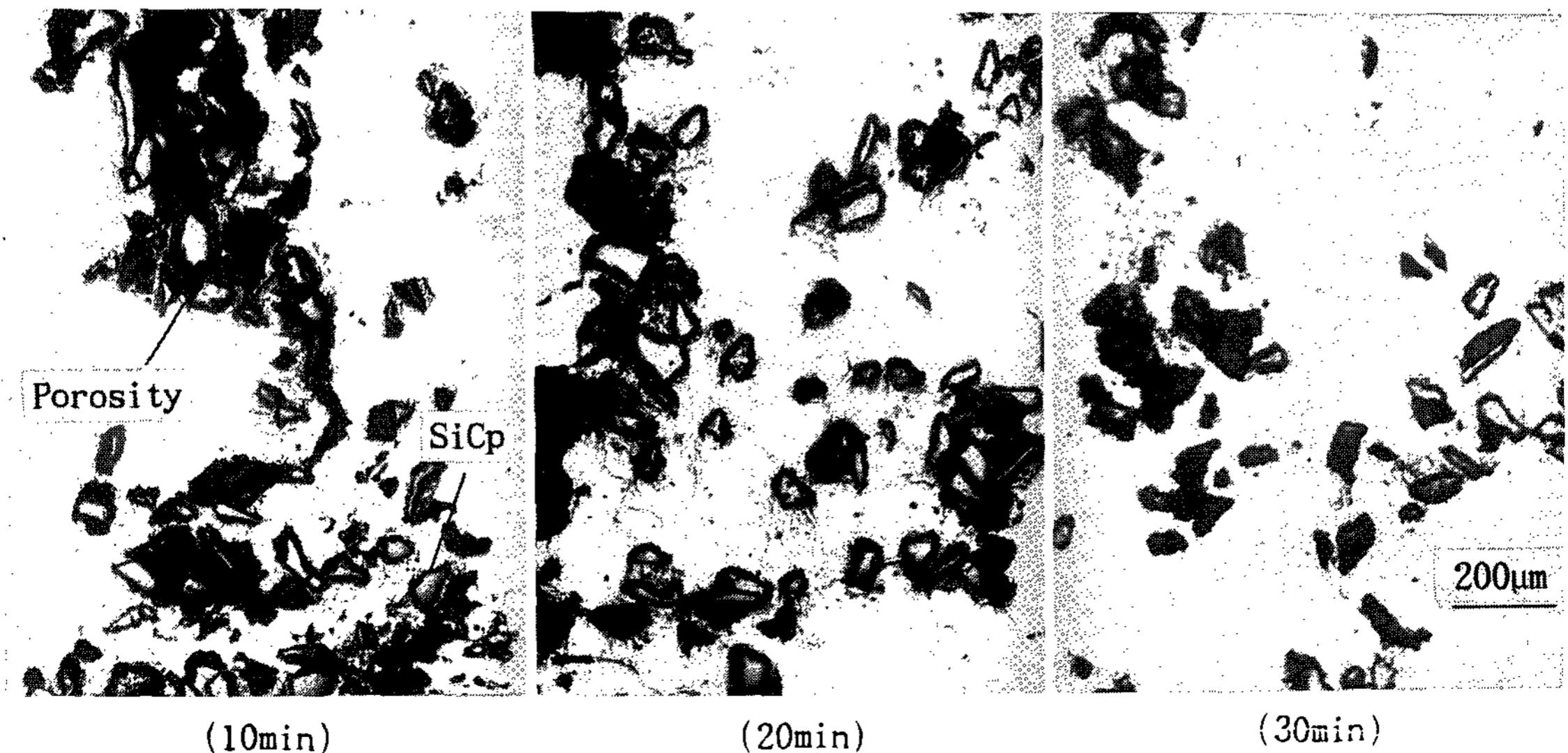


Photo 3. Optical micrographs of 5wt% SiCp/Al-4wt%Cu composite quenched from 639°C.

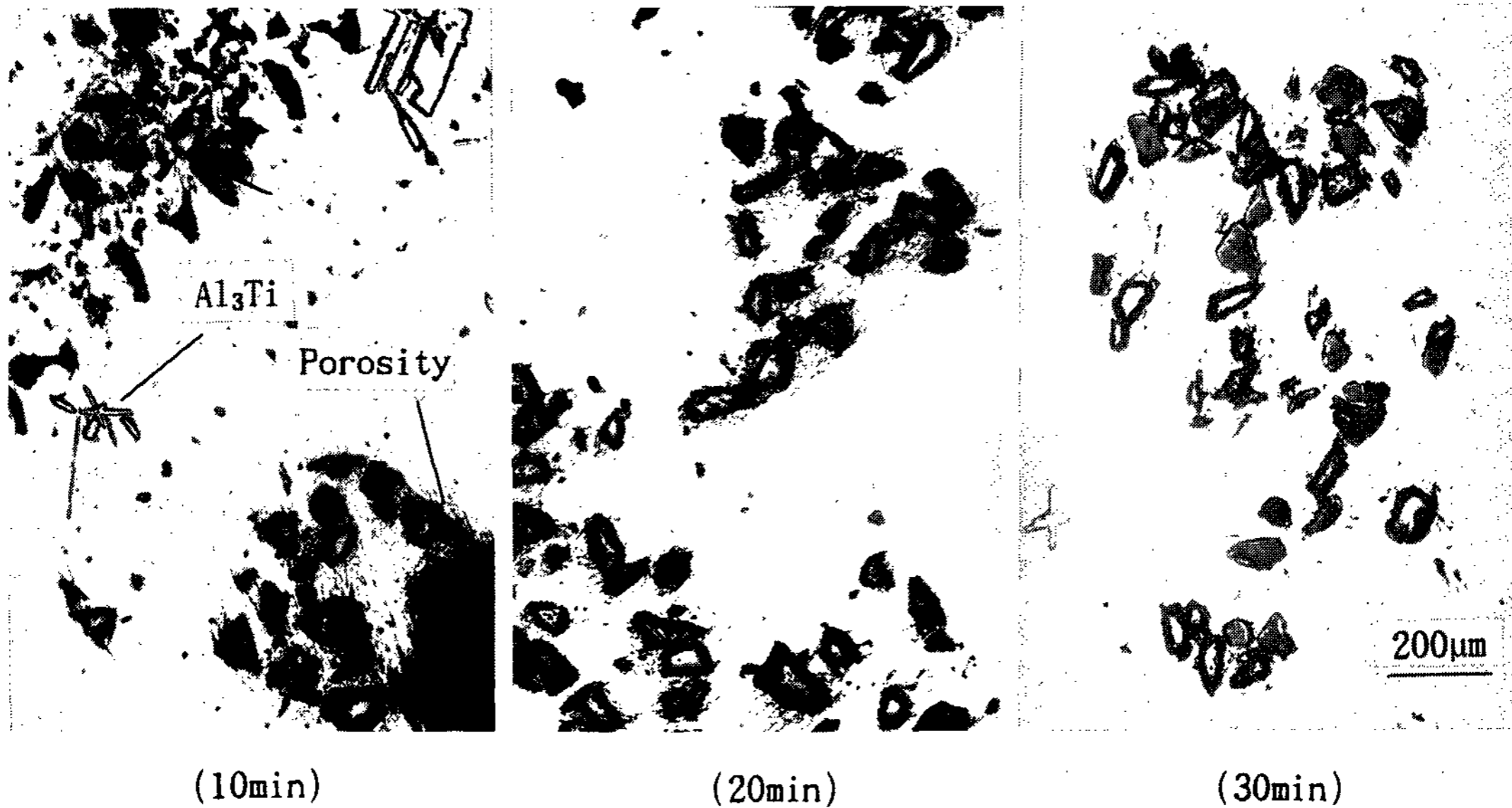


Photo 4. Optical micrographs of 5wt%SiCp/Al-4wt%Cu-0.3wt%Ti composite quenched from 639°C

0.05 및 0.15wt%Ti를 첨가한 경우는 조직적으로 현저한 차이가 없기 때문에 Photo 4에 Ti를 0.3wt%로 증가시켰을 때의 고액 공존 조직을 수냉한 조직을 나타내었다. 이 경우는 상태에서 예견되듯이 피상의 β(Al₃Ti)상이 관찰된다. SiCp와는 형상 및 위치에서 명료히 구별된다. 상 분석치로 0.16wt%까지는 관찰되지 않았다. 0.15wt%가 포정개시점이나 어느 정도까지 포정반응이 억제됨을 알 수 있었다. SiCp와 달리 응고 특성상 최초 응고부에 위치하며 숫적으로도 많지 않기 때문에 SiCp분산에는 큰 영향이 없는 것으로 관찰된다. 따라서 SiCp의 분산은 639°C에서 교반시간이 길수록 잘 분산되며 Ti의 증가에 따라 큰 차이는 없지만 SiCp분산에 기여하는 것으로 사료된다.[1]

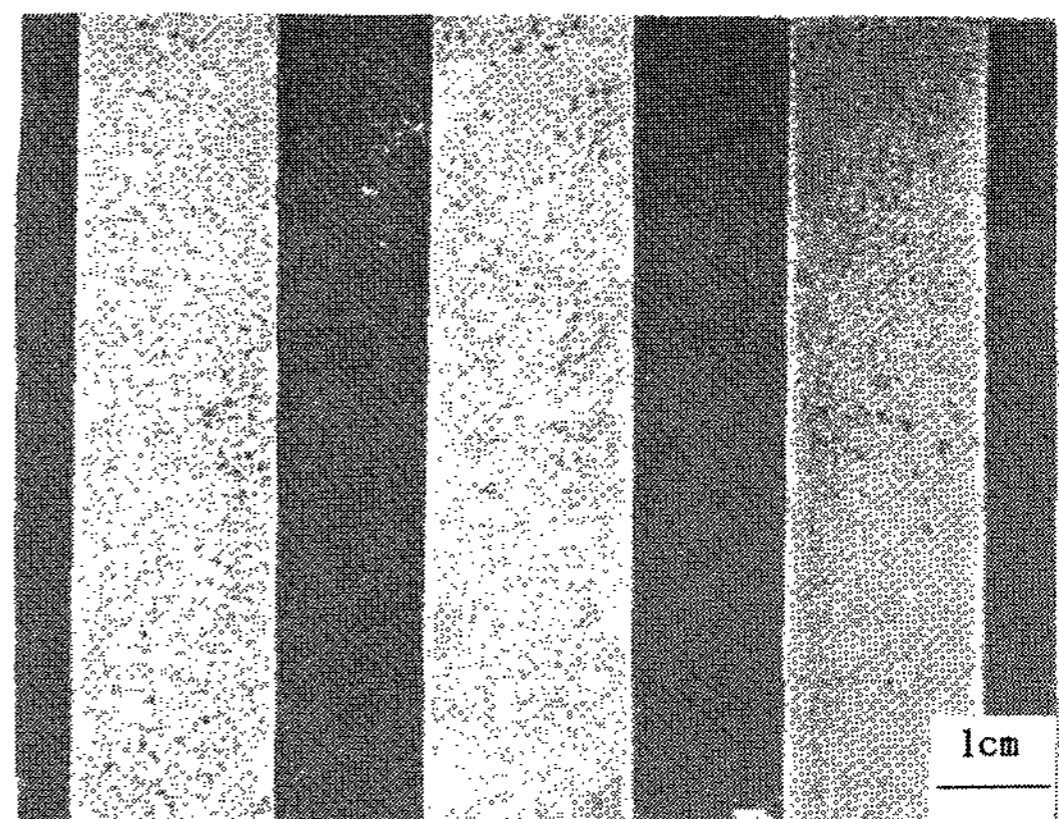
Ti를 첨가하면 결정립 미세화가 이루어지므로 SiCp가 각 결정립계와 같은 최종 응고부에 분포하면 미세분산의 큰 효과가 있을 것이다. 그러나 교반시간이 늘어나면 다결정 형태로 고상이 성장하여 SiCp가 각 결정립계에 분산되지 못하여 Ti양에 따른 큰 차이가 나타나지 않을 것으로 생각된다.

3.2 재용해후의 주조조직

실용상 레오컴포캐스팅법으로 제조한 복합재

료를 사용할 때는 near net shape로 가져가는 것이 필요하다. 그러기 위해서는 복합화 되지 않은 SiCp가 산화되어 기공이된 부분을 제거하고 유동성이 좋은 액상으로 하기 위하여 재용해 해야한다.

Photo 5는 Ti의 첨가량에 따른 조직의 변화를 보기 위하여 교반이 끝난 후 재용해하여 예열된 봉형흑연몰드에 주조한 시편의 종단면을 macro etching한 거시조직을 나타낸 것이다. 각 시료



(a) non-addition (b) 0.05wt%Ti (c) 0.3wt%Ti

Photo 5. Macrostructural change with Ti addition in Al-4wt%Cu/5wt%SiCp composite.

공히 미세한 등축정으로 되어 있으며 Ti의 첨가량이 증가함에 따라 결정립이 미세화됨을 확인할 수 있다. Fig. 1은 micrometer가 장착되어있는 광학 현미경을 이용하여 조성이 다른 각 합금의 결정립 크기를 측정한 결과이다. 재용해 전의 시료는 원래 고상이었던 부분의 결정립 크기를 구한 것이다. 639°C에서 30분간 교반후는 Al-4wt%Cu가 480 μ m, 5wt% SiC첨가로 170 μ m, SiCp첨가 복합재료를 재용해 했을 경우 85 μ m로 나타났다. 이것은 일반적으로 레오컴포캐스팅법을 이용하여 용탕을 교반하면 덴드라이트가지를 절단하고 이것이 핵생성 계기가 되어 미세결정립을 형성하게 된다. 본 실험에서처럼 복합재료를 반응용상태에서 소입한 것과 재용해한 것에서 결정립크기에 큰 차이가 있는 것은 재용해 전에는 고온 항온 교반으로 결정성장이 이루어지고, 액상으로 재용해하면 Ti와 SiCp의 효과에 의해 결정립미세화가 이루어진다고 사료된다.

Photo 6은 재용해 후 주조된 조성이 다른 세 가지 합금의 미세조직의 변화를 보기 위한 것이다. 강화재의 분산 정도를 비교해 보면 Ti가 첨가되지 않은 Fig. 9(a)의 경우는 Ti가 첨가된 시료보다 비교적 강화재의 양이 감소함으로써 강화재간의 간격이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 재용해시 기지 합금의 점성도가 감소하여 액상에

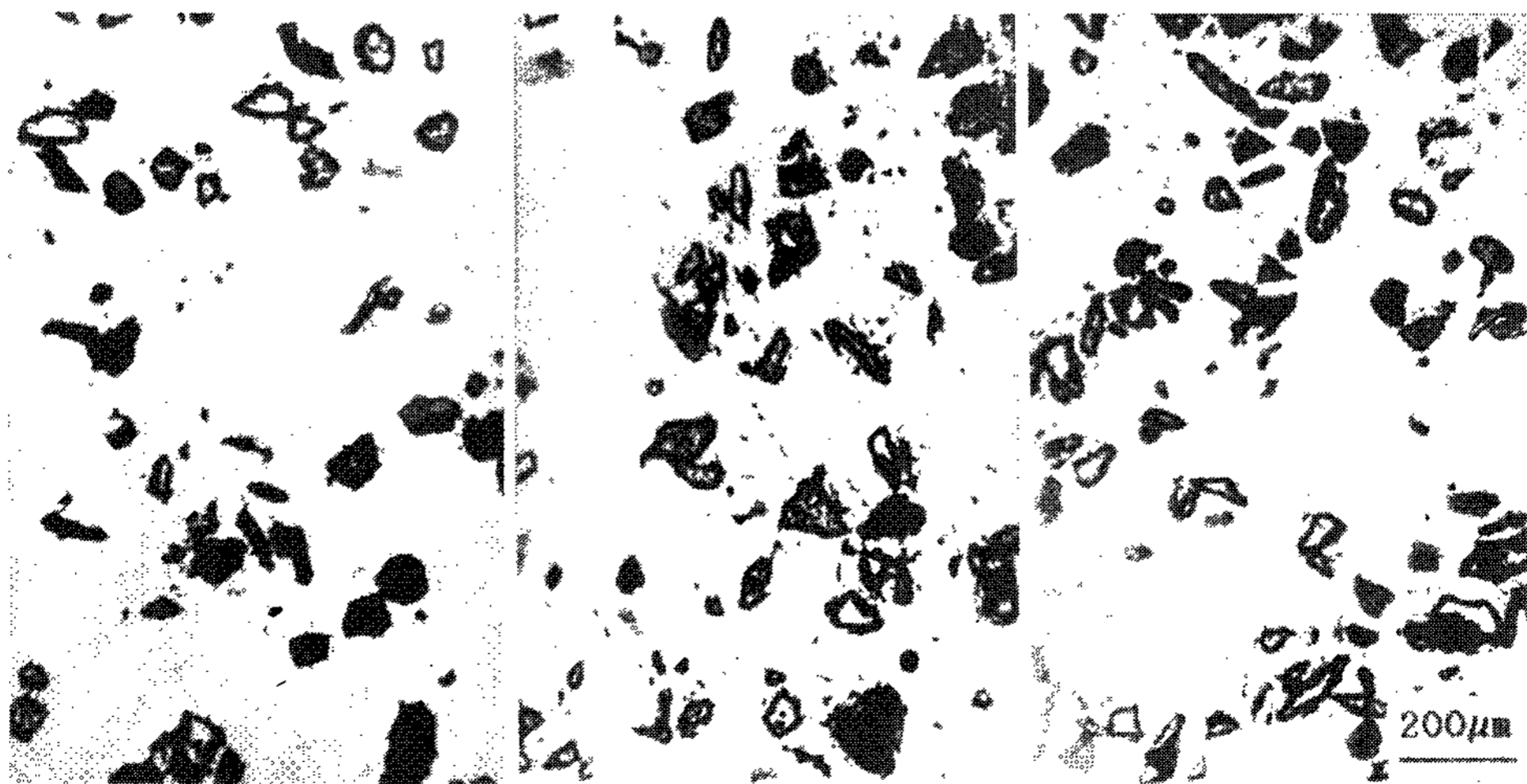
존재하는 강화재가 액상기지 밖으로 축출되기 때문인 것으로 사료되며, 실제로 주조후에 도가니 벽이나 밑부분에 미량의 강화재(SiCp)가 잔존해 있음을 확인할 수 있었다. 상대적으로 (b),(c)에서는 강화재의 고른 분포를 볼 수 있는데, 단위면적당(mm⁻²) 강화재의 수는 (a)는 66particles/mm²로, (b)는 78particles/mm²로, (c)는 111particles/mm²로 증가하고 있다.

이것은 일반적으로 널리 알려진바와 같이 Ti가 Al기내에서 결정립 미세화제로 작용하기 때문이다. 따라서 결정립이 미세화됨으로서 강화재가 미세화된 입계에 균일하게 분포되는 것으로 사료된다.

3.3 복합화 과정

복합재료화 함에 있어 응고과정 및 정출물의 분포가 어떻게 진행되는지 복합화 과정을 규명하는 것은 건전한 복합재료를 만드는데 중요하다.

Photo 7에 각 정출물에 대한 분포를 확인하기 위하여 1%NaOH용액으로 etching한 조직사진을 나타내었다. 전술한 조직보다 강하게 부식하여 정출물은 검게 나타나며, 용질원소 Cu 및 Ti이 형성하는 α 덴드라이트를 관찰할 수 있다. 또한 덴드라이트 간격이나 결정립계에 존재하는 θ (Al₃Cu) 화합물의 정출을 확인할 수 있으며, 입계내



(a) non-addition

(b) 0.05wt%Ti

(c) 0.3wt%Ti

Photo 6. Optical micrographs showing the effect of Ti addition in Al-4wt%Cu/5wt%SiCp composite re-melted at 660°C.



(a) non-addition



(b) 0.3wt%Ti

Photo 7. Distribution of non-equilibrium crystallized phase in Al-4wt%Cu/5wt%SiCp composites.

에 정출하는 $\beta(Al_3Ti)$ 화합물을 확인할 수 있다. 이로부터 정성적이지만 Cu 및 Ti의 현저한 용질 농도의 편석을 알 수 있으며, 각 화합물의 존재 위치 및 응고 선후를 분명히 한다. 즉 Ti를 첨가한 재료에서는 Ti의 현저한 농도차에 의해 나타나는 cored조직이 확인된다. 일반재료에서 보고된 타 문헌과 마찬가지로 복합재료에서도 동일 현상의 농화 조직이 나타나며 이는 SiCp의 분산에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Photo 8은 0.05wt%Ti첨가 재료의 재용해후 주조한 시편을 EDS(Energy Dispersive Spec-

trometer)로 Si, Cu, Ti 에 대하여 선분석한 사진이다. 덴드라이트 간격이나 결정립계 그리고, SiCp의 주변에서 Cu의 다소의 입내분포변화 및 θ 상을 확인할 수 있다. 결정립 내부에 Ti의 분포는 神尾등에 의하면[12] cored조직중심에서 0.6-0.8wt%정도이고 외부에서 급격히 떨어져 0.01wt%정도로 나타난다. 그러나 EDS의 특성상 검출될 수 없는 범위이므로 조직사진으로만 확인된다. Photo 9는 Si, Cu, Ti 에 대하여 dot mapping한 사진이다. Cu의 용질분포가 SiCp주위에서 보다 희게 되어 있는 것은 공정화합물인 Al_2Cu 가 생성한 것으로, 이것으로 부터 SiCp주

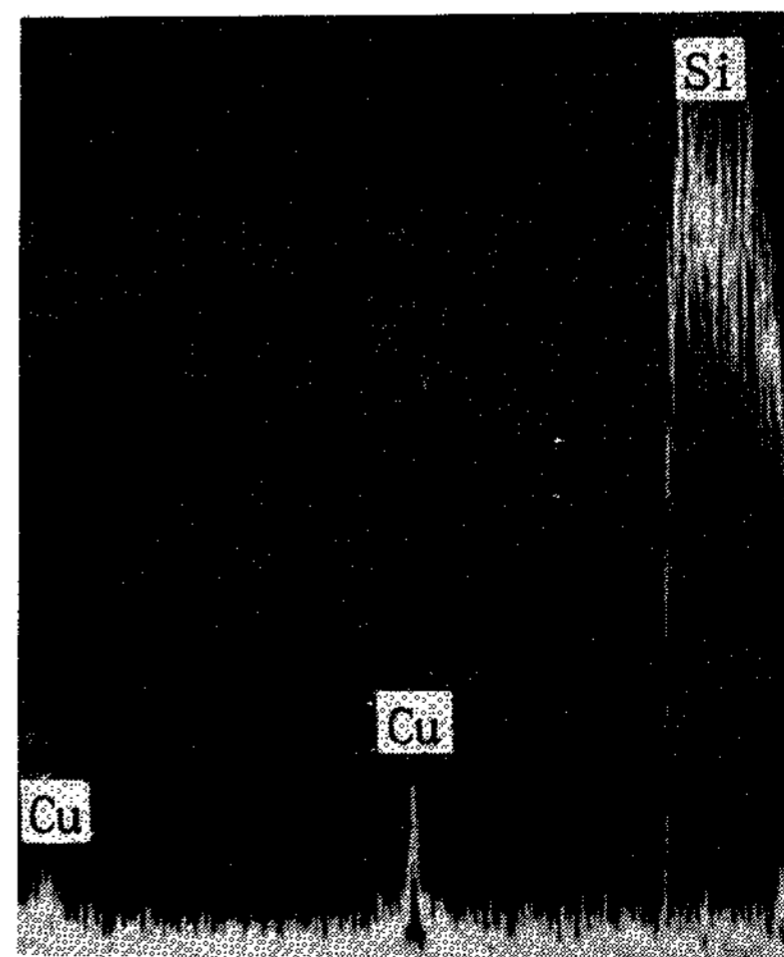
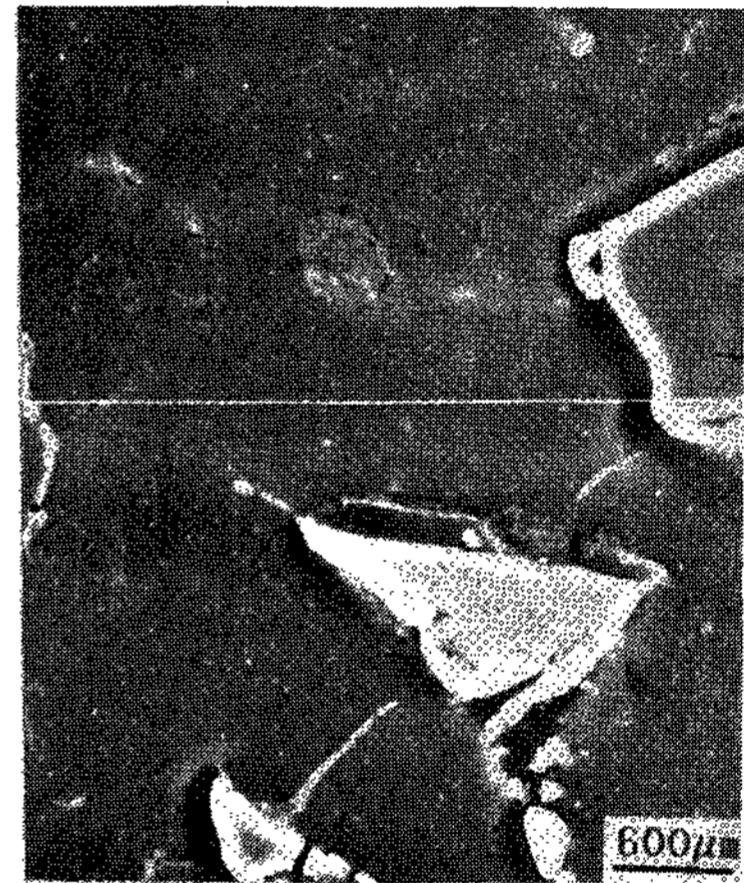


Photo 8. Line analysis of Si, Cu and Ti in 5wt%SiCp/Al-4wt%-0.05wt%Ti composite.

변이 최종응고부인 것을 알 수 있다. Ti의 용질 분포는 현저한 편석을 나타내지만 EDS분석상 차가 나타나지 않는다. 그리고 이러한 것로부터 SiCp과 화합물을 형성하지 않음을 보여주고 있다.

지금까지의 자료와 Al-Cu계 및 Al-Ti계의 상태를 종합하여 비평형응고과정에 대한 모식도를 정리하였다. Fig. 2는 Ti가 포함되지 않은 합금의 복합화 과정과 재용해후의 응고과정을 나타낸 모식도이다. 복합화 과정 즉, 재용해전의 경우 650°C의 액상선을 지나면서 초정 α 가 핵생성되며 고상률 40%인 639°C에서는 첨가된 SiCp이 α 상에 강제교반에 의한 기계적 혼입을 하며 나머지는 액상에 존재한다. 최종적으로 Al_2Cu 의 공정화합물이 덴드라이트 간격이나 결정립계에 정출된다. 반대로 재용해후는 첨가된 SiCp가 불순물, 금속간화합물과 함께 최종응고부에 위치하게 된다.

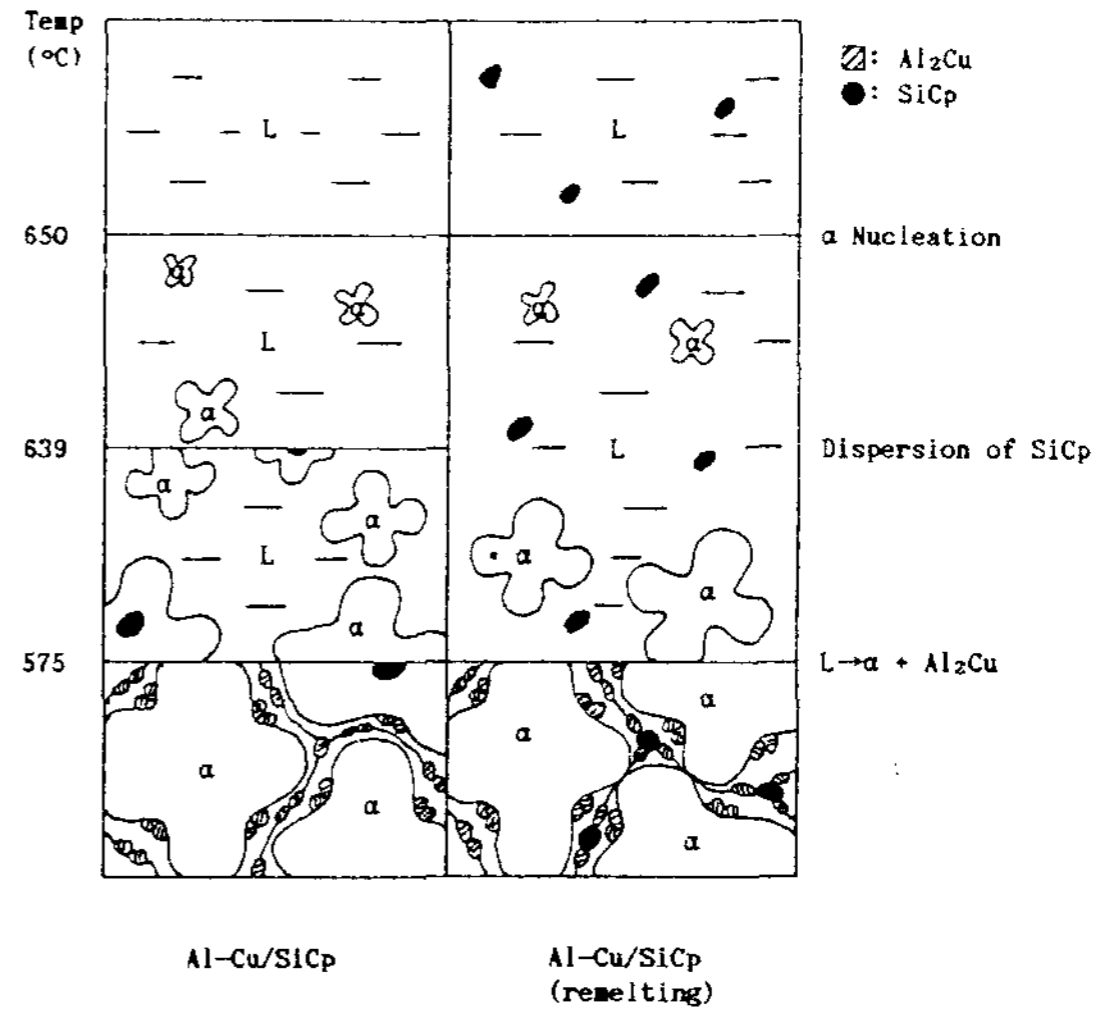


Fig. 2. Schematic diagram of non-equilibrium solidification process in Al-Cu/SiCp composite material.

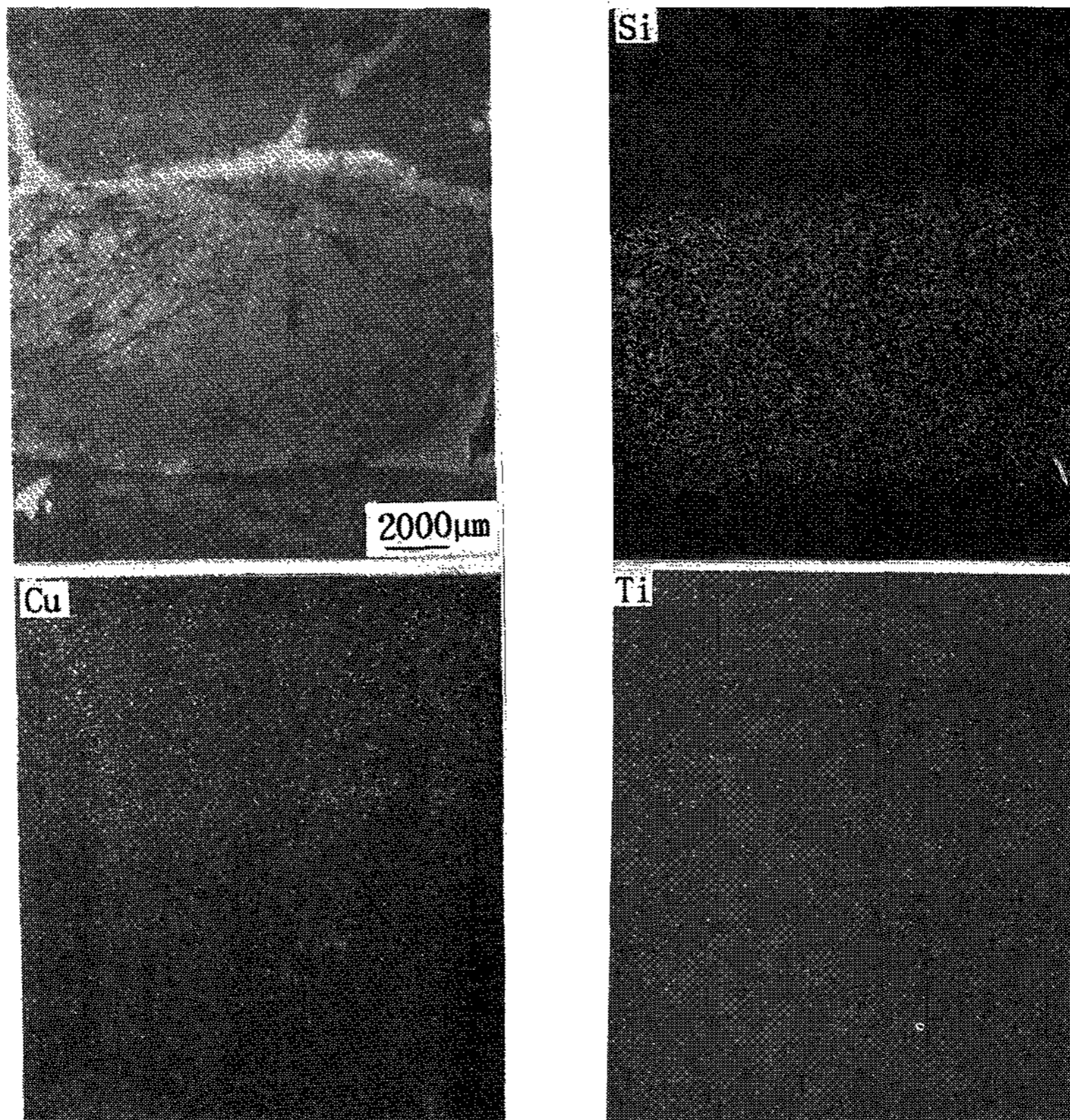


Photo 9. Dot mapping of Si, Cu and Ti in 5wt% SiCp/Al-4wt% Cu-0.05wt% Ti composites.

Fig. 3은 Ti를 첨가했을 때의 모식도를 나타낸 것이다. 0.3%Ti를 첨가했을 경우는 730°C의 액상선을 지나면서 정출된 Al₃Ti와 639°C에서 첨가된 SiCp로 결정립이 미세화 되고 덴드라이트 간격이나 결정립계의 최종응고부에 θ상이 정출된다.[12] 따라서 Al₃Ti는 최종응고부, SiC는 최초 혹은 최종응고부에 위치하며 이것을 재용해하였을 경우는 Al₃Ti는 여전히 이질핵생성 자리로 작용하여 α상내에 존재하지만 SiCp은 결정립계에 침적되어 θ상과 같이 최종응고부에 위치하는 것으로 사료된다.

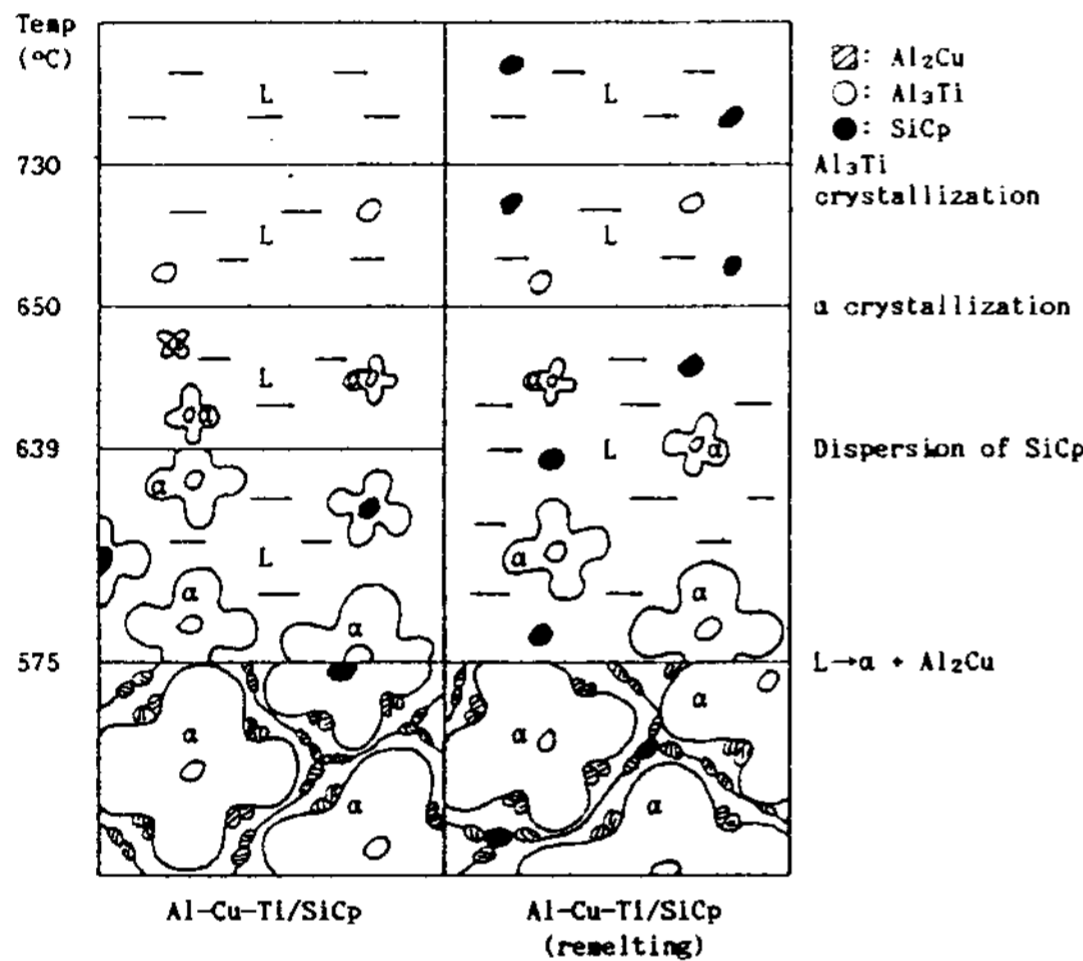


Fig. 3. Schematic diagram of non-equilibrium solidification process in Al-Cu-Ti/SiCp composite material.

4. 결 론

이상과 같이 레오컴포캐스팅법을 이용하여 Al기 복합재료를 제조하고, 교반시간과 Ti의 첨가량을 변화시킨 Al-Cu/SiCp 복합재료의 조직을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SiC의 분포는 639°C 10, 20, 30분의 교반시간 중 30분 때가 가장 양호하였다.
- 2) Ti의 증가에 따라 덴드라이트 간극 및 결정립계에 존재하는 금속간화합물 Al₂Cu와 분산

재인 SiCp의 미세분포정도가 개선되었다.

3) 0.3%Ti의 조성에서는 최초 응고부에 Al₃Ti 화합물이 생성되며, 이 화합물 주위에는 SiCp 및 Al₂Cu상은 존재하지 않는다.

4) SiCp은 복합화 과정에서는 최초 및 최종응고부, 재용해후에는 최종응고부에 위치한다.

5) Al₂Cu와 SiCp은 복합화 과정에서와는 달리 재용해후에는 덴드라이트 외부에 함께 혹은 독립하여 분포한다.

참고문헌

- [1] 森信辛, 大城桂作, 松田公扶: 日本金屬學會誌, 48, 9(1984) 936
- [2] 박익민, 신광선, 윤의박: 주조, 9, 1 (1989) 412
- [3] 여인동, 이지환: 주조, 15, 2 (1995) 138
- [4] 문정탁, 김명한, 조형호: 주조, 15, 1 (1995) 45
- [5] 조인성, 홍준표: 주조, 15, 2 (1995) 156
- [6] J.E.Schouten, K.Tempo: "Introduction to metal matrix composite materials", MMCIAC, Santa Barbara, California, (1982)
- [7] Van Vlack: "Elements of Materials Science and Engineering", Fourth Edition, (1979) 508
- [8] "Metal Handbook", Vol. 15, 110, 9th edition, ASM, (1990)
- [9] 남궁철 역: "비철금속의 현미경사진과 해석", (1988) 7
- [10] 이학주, 광현만, 홍준표: 주조, 11, 2 (1991) 126
- [11] 이우인: "Rheo-compocasting에 의한 SiCp/6063Al복합조직에 관한 연구" 아주대학교 석사학위 논문, (1990) 6
- [12] 神尾 彰彦, 手塚 裕康, 崔政喆, 高橋 恒夫: 輕金屬, 35, 5 (1984) 133