

Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕에서 SiC 입자의 침강

김 중 한 · 권 혁 무*

연무대기계공업고등학교 금속과

*충남대학교 금속공학과

Settling of SiC Particles in the Al-Si/SiC_p Composite Melts

J.C. Kim and H.M. Kwon*

Dept. of Met. Eng. of Yeunmudae Mech. Tech. High School, Nonsan 320-830

*Dept. of Metallurgical Eng. of Chungnam Unive., Taejeon 305-764

(1996년 11월 20일 받음, 1997년 1월 15일 최종수정본 받음)

초 록 Al-xSi/ySiC(x:6~18wt%, y:3~9wt%, SiC 입자크기:10~28 μ m) 복합재료를 재용해한 후 항온 유지하고 응고시킬 때 SiC 입자가 몰드의 하부로 침강하는 현상을 계통적으로 조사하였다. Al-Si/SiC 복합재료 용탕을 항온으로 유지하면 입자가 없는 지역은 유지시간이 약 처음 30분 동안 빠르게 증가한다. SiC 입자의 크기가 클수록 SiC 입자의 침강속도가 빠르다. 또한 복합재료중 첨가한 SiC 입자의 부피분율이 증가하면 입자의 침강속도는 감소한다.

Abstract Remelting of Al-Si/SiC_p composites followed by isothermal holding and solidification, leads to the settling of SiC particles to the bottom of the mold. With the isothermal holding time for molten Al-Si/SiC_p composites, the particle free zone increases rapidly up to approximately first 30 minutes of the holding time. Experimental results of the particle settling confirm that the larger SiC particles sink faster than the smaller particles. An increase in volume fraction of SiC particles decreases the settling velocity of the particles.

1. 서 론

주조용 입자분산 금속기 복합재료 잉고트를 재용해하여 주물 제품을 주조하는 경우 복합재료 용탕에 강화재로 첨가한 세라믹 입자가 침강하거나 부유하는 현상이 발생하여 복합재료의 여러 가지 성질에 중대한 결함을 가져올 수 있다. 이러한 분산 입자가 침강하거나 부유하는 현상이 생기게 되는 이유는 기지 합금과 분산 입자간의 밀도 차에 의해 발생된다.

Al-xSi(x:6~18wt%) 합금의 밀도는 2.63~2.67인데 비하여 SiC 입자의 밀도는 3.2이고, Al₂O₃ 입자의 밀도는 3.7이다. 따라서 Al-Si 합금 용탕에 이러한 입자를 분산시킨 후 장시간 유지하면 용탕과 분산 입자간에 잘 습윤이 되었다 할 지라도 비중 차에 의하여 분산된 입자가 침강할 수 있다. 또한 Al-Si 합금에 비해 상대적으로 밀도가 작은 흑연, BN, B₄C 등은 용탕중에서 부유할 수 있다.

그러므로 주조용 Al-Si/SiC_p 복합재료를 용해할 경우 강화재의 침강 현상이 없이 액상선 이상의 적당한 온도에서 적합한 시간 유지할 수 있어야되며, 강화재의 침강이 이루어지기 전에 모든 주조 작업을 완료해야 한다.

그 동안 Al/SiC_p 복합재료의 침강에 관한 연구를 살펴보면, Rohatgi¹⁾는 A356/15vol%SiC_p(입자크기:9 μ m) 복합재료에서 유지시간에 따른 용탕 내에서의 SiC 입자의 침강

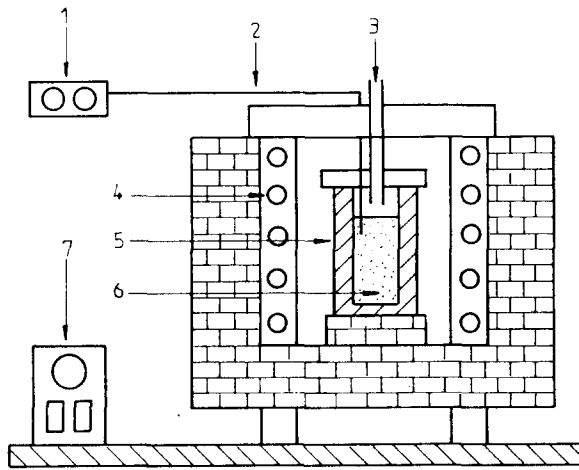
속도를 조사하였고, Lloyd²⁾ 등은 A356/10vol%SiC_p(입자크기:10 μ m) 복합재료에서 유지시간에 따른 용탕 내에서의 SiC 입자의 침강속도를 조사하였고, Parker^{3,4)} 등은 Al-7%Si 합금에 SiC_p와 mica(입자크기:15 μ m, 첨가량:10vol%)를 첨가한 복합재료에서 강화 입자의 침강속도를 조사하였다. 그러나 이들 연구에서는 복합재료 용탕내에서 유지시간에 따른 SiC 입자 침강 현상만을 다루었고, 이론적인 침강속도의 계산이나 입자 크기, 입자의 분산량 및 기지 합금에 따른 SiC 입자의 침강속도를 계통적으로 수행하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 Al-x%Si/y%SiC_p[x:6,10,14,18wt%, y:3,6,9wt%(2.5, 5, 7.5vol %)], SiC 입자크기:10,16,22,28 μ m] 복합재료 용탕에서 SiC 입자의 이론적인 침강속도를 계산하고, Al-Si/SiC_p 복합재료를 재용해하여 일정 시간 유지하였을 때 SiC 입자의 침강속도에 미치는 SiC 입자의 크기, SiC 입자의 첨가량 및 기지 합금의 영향에 관하여 계통적으로 조사하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 SiC 입자 침강 실험을 위한 전기저항로이며, 본 실험 순서의 개략도는 그림 2와 같다.

Compcasting법⁵⁾으로 제조한 Al-x%Si/y%SiC_p[x:6,10,14,18wt%, y:3,6,9wt%(2.5, 5, 7.5vol %)], SiC 입자



- 1. Thermometer
- 2. Thermocouple
- 3. Ar gas in
- 4. Electric crucible furnace
- 5. Graphite crucible
- 6. Al-Si/SiC melt
- 7. Power supply

Fig. 1. Schematic diagram of electric furnace and SiC particles settling test.

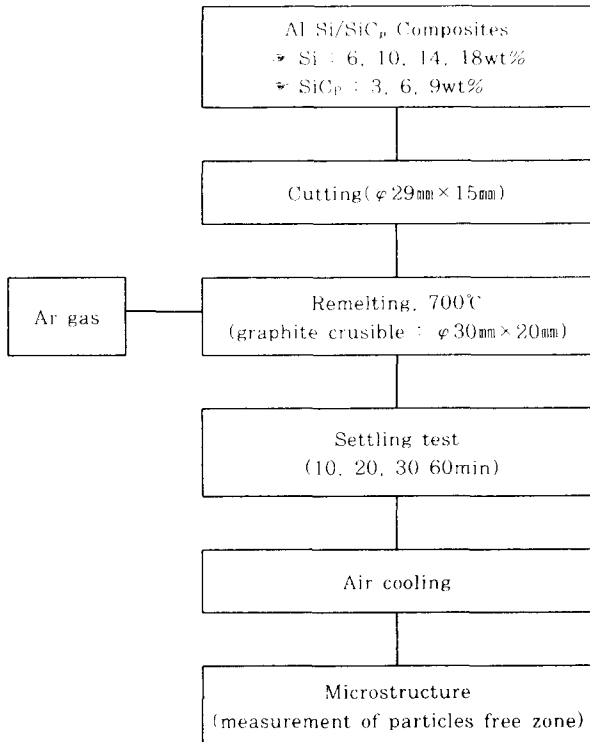


Fig. 2. Flow chart of experience procedure.

크기: 10, 16, 22, 28 μm] 복합재료를 $\phi 29\text{mm} \times 15\text{mm}$ 의 크기로 기계가공하여 $\phi 30\text{mm} \times 20\text{mm}$ 크기의 흑연도가니에 장입하고 700°C 까지 빠르게 승온시킨 후 10분, 20분, 30분 및 1시간 동안 항온 유지하였다. 항온 유지하는 동안 도가니 상부의 온도가 하부의 온도보다 0.5°C가 높아 용탕의 대류에

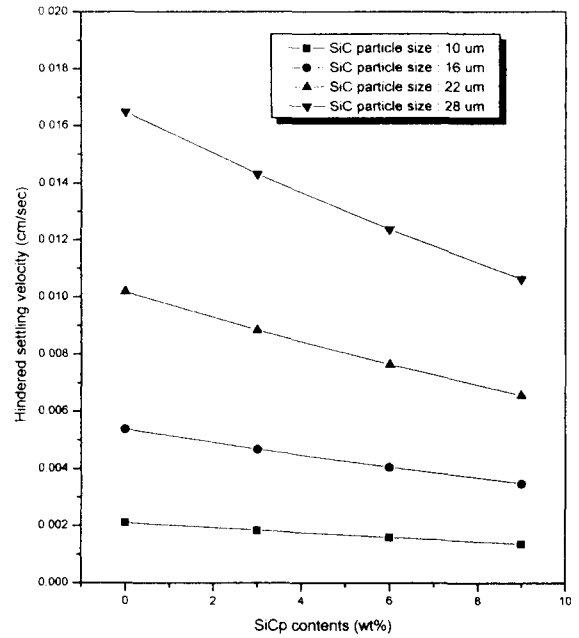


Fig. 3. Calculation results of hindered settling velocity of SiC particles with increasing in volume fraction of SiC particles.

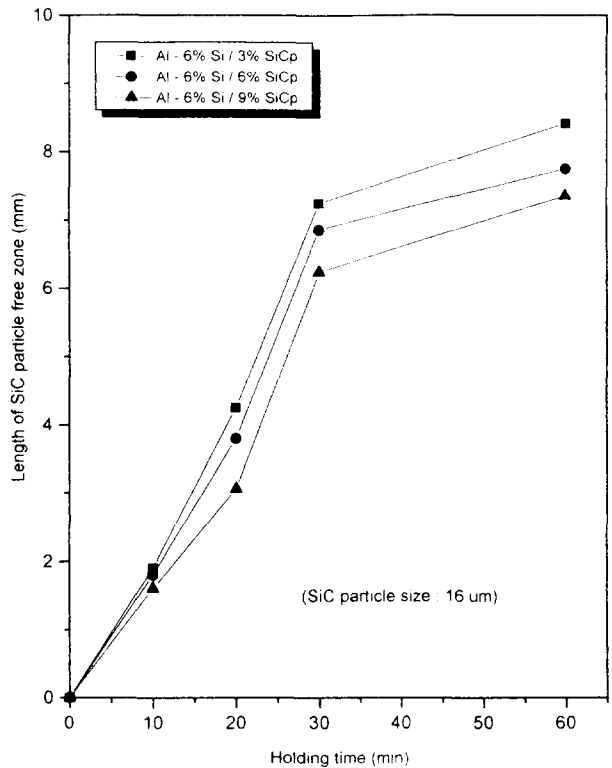


Fig. 4. Length of SiC particles free zone vs holding time of the melt of Al-6%Si/SiC_p composites at 700°C.

의한 영향이 최소가 되도록 하였다. 이때에 Al의 산화와 드로스의 형성을 억제하기 위하여 알곤 가스를 2~3 ℓ/min 씩 도가니의 상부로 흘려보냈다. 항온 유지가 완료된 후 도가니를 꺼내어 공랭하였다.

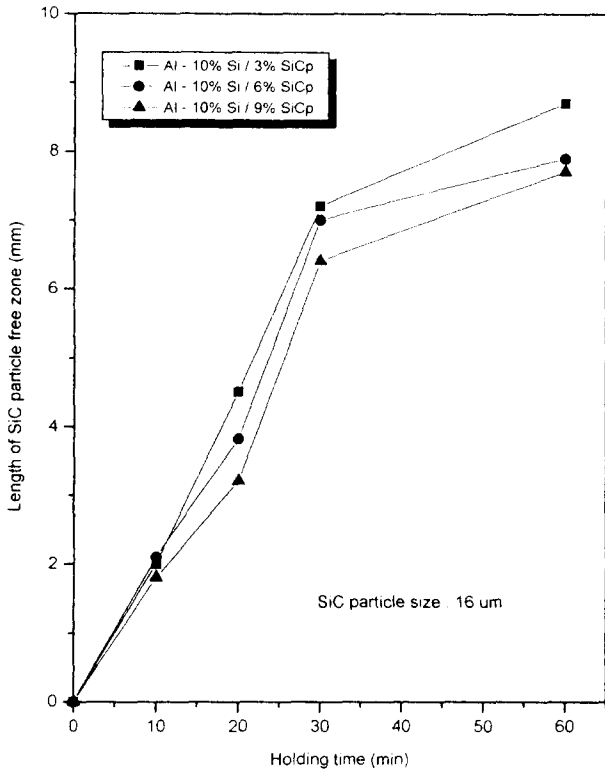


Fig. 5. Length of SiC particles free zone vs holding time of the melt of Al-10%Si/SiC_p composites at 700°C.

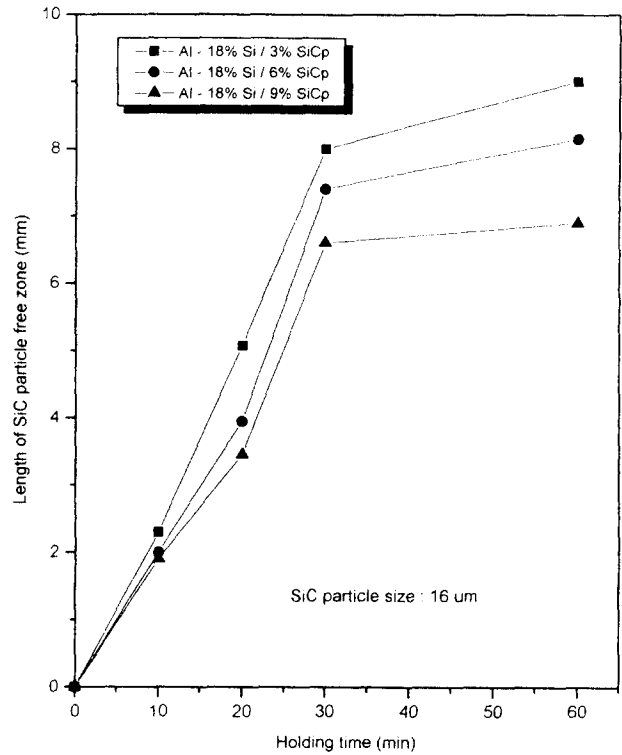


Fig. 7. Length of SiC particles free zone vs holding time of the melt of Al-18%Si/SiC_p composites at 700°C.

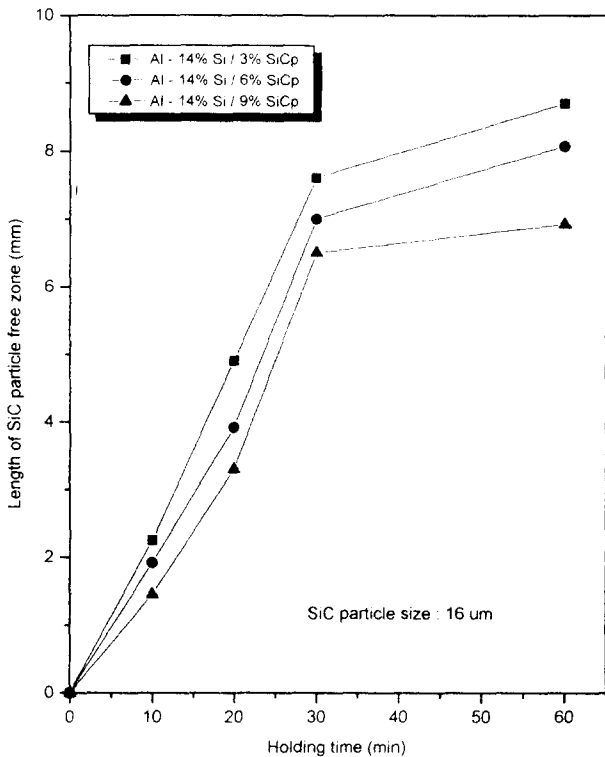


Fig. 6. Length of SiC particles free zone vs holding time of the melt of Al-14%Si/SiC_p composites at 700°C.

침강이 완료된 시료를 절단하여 용탕의 상부로부터 SiC 입자가 가라앉은 지역까지의 입자가 없는 부위(SiC parti-

cles free zone)의 길이를 측정하였다.

3. 이론 침강 속도

만일 Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕내에 SiC 입자가 완전히 균일하게 분포한다면, SiC 입자의 침강 현상은 이론적으로 다음과 같은 가정 하에서 Stokes' 법칙¹⁰⁾을 사용하여 구할 수 있다.

- ① SiC 입자는 구형 입자이다.
- ② 첨가된 이웃된 입자 사이에는 반응이 없다.
- ③ 분산된 입자와 용탕은 완전히 젖는다.

Stokes' 법칙은 다음 식 (1)과 같다.

$$V_p = \frac{2R_p^2(\rho_p - \rho_m)g}{9\eta} \quad (1)$$

여기서 V_p : 입자의 침강 속도,

R_p : 입자 반경,

ρ_p : 입자 밀도,

ρ_m : 기지 밀도,

g : 중력 가속도,

η : 용융 금속의 점성이다.

식 (1)에 의한 Stokes' 침강속도는 직경의 제곱에 비례하기 때문에 큰 입자의 침강속도는 보다 빠를 것으로 예상된다.

그러나 여러 가지 입자가 있을 때는 각기 다른 크기의 입자의 존재로 인해 침강에 방해가 받는다. 이러한 방해를 받

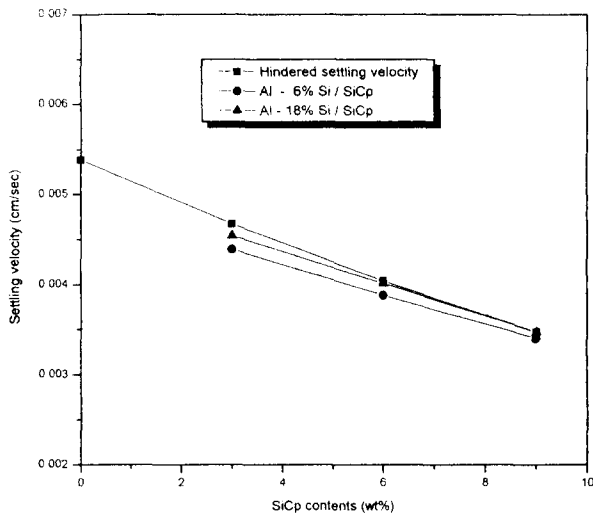


Fig. 8. Comparison with hindered settling velocity and experimental results of Al-Si/SiC_p composites.

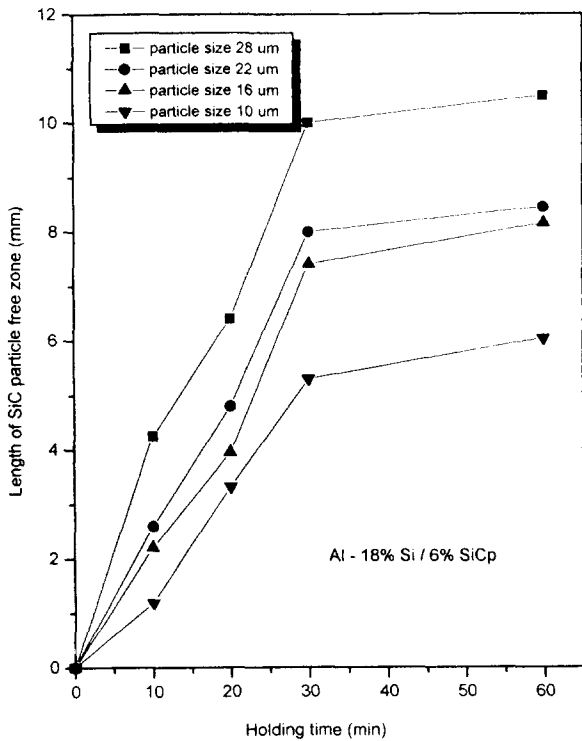


Fig. 9. Length of SiC particle free zone vs holding time on the SiC particle size for Al-6%Si/6%SiC_p composites.

는 침강 속도는 각각의 입자에서 침강 속도를 계산한 것보다 작을 것으로 예상된다. 이러한 방해를 받은 침강속도는 Richardson⁷⁾에 의해서 주어진다. 즉,

$$V_c = V_p(1-\phi)^n \quad (2)$$

여기서 V_c : Richardson의 침강 속도
 V_p : Stokes의 침강속도
 ϕ : 입자의 부피분율

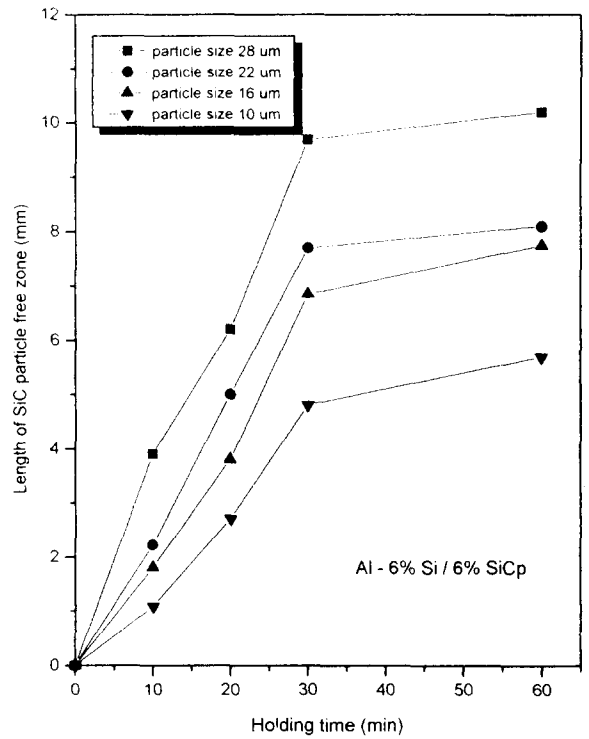


Fig. 10. Length of SiC particle free zone vs holding time on the SiC particle size for Al-18%Si/6%SiC_p composites.

$$n = 4.65 + 19.5 \frac{d}{D} \quad (3)$$

단 $Re < 0.2$

$$\text{그리고 } n = (4.35 + 17.5 \frac{d}{D}) Re^{-0.03} \quad (4)$$

단 $0.2 < Re < 1$

여기서 d : 입자 직경
 D : 용기의 직경

$$Re : \text{레이놀드 수} = \frac{V_p d \rho_m}{\eta} \quad (5)$$

이며, SiC 입자의 크기가 16 μ m일 경우 레이놀드 수는 약 1.55×10^{-4} 이다.

그림 3은 식 (1)과 식 (2)에 의해서 계산된 Al합금 용탕내에서 SiC 입자의 크기에 따른 방해를 받은 입자 침강속도의 이론적인 값을 나타낸 것이다. 이 그림에서 SiC가 0wt%일 때는 SiC 1개의 입자일 경우로, 식 (1)의 Stokes' 법칙에 의한 SiC 입자의 침강속도를 나타낸 것이다. SiC 입자 1개의 크기가 10 μ m일 경우의 침강속도는 2.1×10^{-3} cm/sec 정도이고, 16 μ m일 경우는 5.4×10^{-3} cm/sec 정도이며, 22 μ m일 경우는 10.2×10^{-3} cm/sec 정도이며, 28 μ m일 때는 16.5×10^{-3} cm/sec 정도로 입자의 크기가 커지면 침강 속도는 커지게 된다.

Richardson의 식 (2)에 의하면 각각의 입자 크기에서

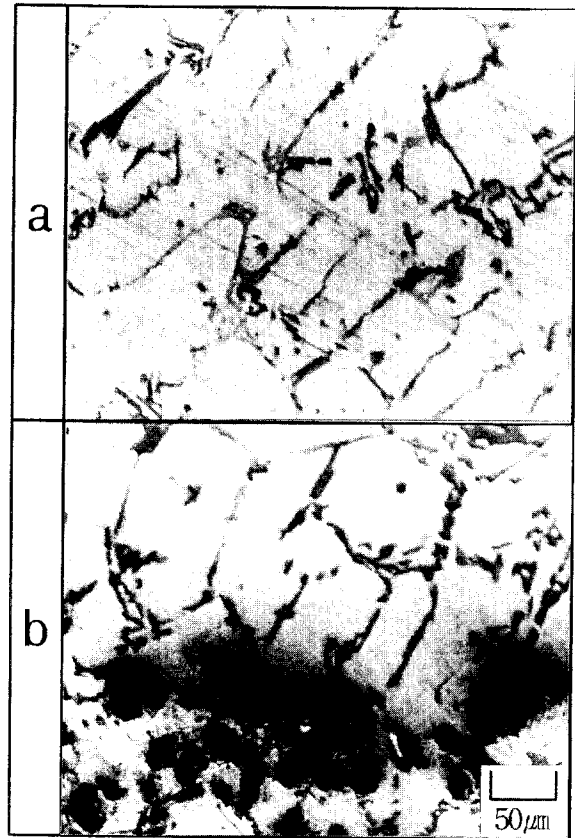
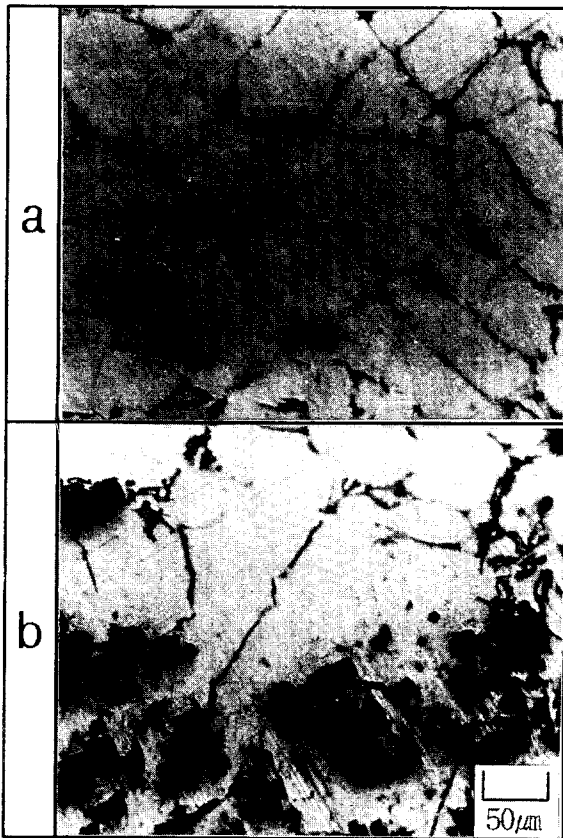


Photo 1. Microstructures of Al-6%Si/6%SiC_p composite after 30 min. holding at about 700°C in particles settling test near the interface of particles free and containing zone.(SiC particle size : 16µm) (a) SiC particles free zone (b) interface of SiC particles free and settling zone

Photo 2. Microstructures of Al-10%Si/6%SiC_p composite after 30 min. holding at about 700°C in particles settling test near the interface of particles free and containing zone.(SiC particle size : 16µm) (a) SiC particles free zone (b) interface of SiC particles free and settling zone

부피 분율의 증가는 방해 효과를 가져오기 때문에 입자의 침강율이 더욱 감소할 것이다. SiC의 입자 크기가 16µm인 경우 Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕에서 3wt% SiC의 첨가에 따른 SiC 입자의 침강속도 계산 결과 4.67×10^{-4} cm/sec이며, 6wt% SiC의 경우 4.0×10^{-4} cm/sec이며, 9wt% SiC의 경우 3.5×10^{-4} cm/sec 정도로 SiC 입자의 첨가량이 증가함에 따라 SiC 입자의 상호간에 방해를 받아 SiC 입자 침강속도가 직선적으로 감소하고 있는 것을 나타낸다.

4. 실험 결과 및 고찰

SiC 입자 크기가 16µm인 Al-xSi/ySiC_p(x:6,10,14, 18wt%, y:3,6,9wt%) 복합재료 용탕을 700°C에서 0, 10, 20, 30 및 60분 유지한 결과 그림 4~그림 7과 같다. 그림 4는 Al-6%Si/y%SiC_p(y:3,6,9)의 경우이고, 그림 5는 Al-10%Si/y%SiC_p(y:3,6,9)의 경우이며, 그림 6은 Al-14%Si/y%SiC_p(y:3,6,9)의 경우이며, 그림 7은 Al-18%Si/y%SiC_p(y:3,6,9)의 경우이다. 용탕내에서 기지 합금과 강화 입자의 밀도차에 의해 발생한 SiC 입자 침강 현상의 결과로 SiC 입자가 없는 부위가 용탕의 상부에 생기게 된다. 이러한 SiC 입자가 없는 부위의 크기는 그림에서와

같이 유지 시간이 증가함에 따라 증가한다. SiC 입자가 없는 부위는 유지 시간이 처음 30분 까지 시료전체 길이(15 mm)의 50% 정도인 6~8mm까지 직선적으로 증가한다. 하지만 유지시간이 30분에서 1시간 까지는 SiC 입자가 없는 부위가 천천히 증가하는데, 이는 30분 동안 침강된 부분의 SiC 입자의 부피 분율이 초기의 부피 분율보다 증가하기 때문에 식 (2)에 의해서 유지시간 30분 이후에는 침강의 방해를 받아 천천히 침강하는 것으로 사료된다.

한편 기지 합금의 Si 함유량이 6%에서 18%로 증가함에 따라 SiC 입자가 없는 부위의 크기가 약 0.4mm~0.8mm 증가하고 있다. 이것은 Al-6%Si 합금과 SiC의 밀도차가 0.4422인데 비하여 Al-18%Si 합금과의 밀도차는 0.4866으로 0.0444의 차이가 있어 기지 조성이 6%Si인 아공정조성에서의 SiC 입자의 침강속도가 18%Si인 과공정조성에서의 SiC 입자 침강속도보다 약 6~9% 정도 빠르게 된 것을 알 수 있다.

또한 Al-Si 합금중에 SiC 입자의 첨가량이 3wt%에서 9wt%로 증가하면 입자가 없는 부위의 길이가 약 1~1.5 mm 정도 작아지는데 식 (2)과 그림 3에서 예상한 것과 같이 SiC 입자의 첨가량의 증가는 입자 침강의 방해 효과를

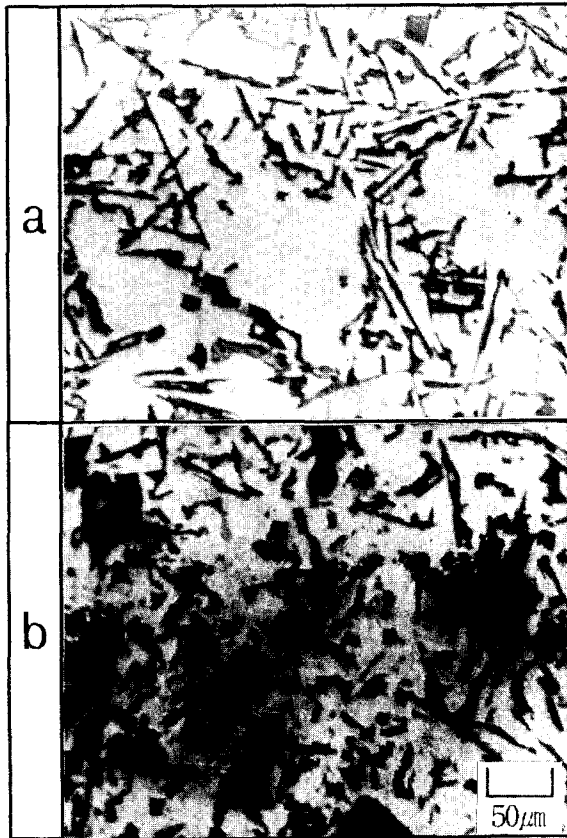


Photo. 3. Microstructures of Al-14%Si/6%SiC_p composite after 30 min. holding at about 700°C in particles settling test near the interface of particles free and containing zone. (SiC particle size : 16µm) (a) SiC particles free zone (b) interface of SiC particles free and settling zone

가져와서 SiC 입자의 침강속도가 감소하는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과를 이론적으로 산출한 그림 3과 비교하여 보았다.

그림 8은 16µm 입자 크기를 갖는 Al-Si/SiC_p 복합재료에서의 식 (2)에 의한 Richardson의 방해받은 SiC 입자 침강속도의 이론적인 예상 값과 실제 실험 결과를 나타낸 것이다. SiC 입자의 침강속도는 시편의 유지시간이 30분일 때 SiC 입자가 가라앉은 지역의 길이를 시간으로 나누어 구하였다. 실제 SiC 입자 침강속도가 이론적으로 계산한 SiC 입자 침강속도보다 약간 작게 나타났지만, 이론적으로 계산한 결과와 마찬가지로 실제 실험에서도 주어진 SiC 입자의 크기에서 SiC 입자의 분산량이 3wt%에서 9wt%로의 증가는 입자 상호간의 방해 효과를 가져오기 때문에 SiC 입자의 침강율이 더욱 감소하므로 식 (2)에 의한 Richardson의 이론 식이 잘 적용된 것으로 사료된다.

Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕에서 SiC 입자의 크기에 따라 SiC 입자의 침강상태를 조사한 결과 그림 9 및 그림 10과 같다. 분산된 SiC 입자의 크기가 커지면 SiC 입자의 침강이 빠르게 됨을 알 수 있는데, 이는 전술한 식 (1)의

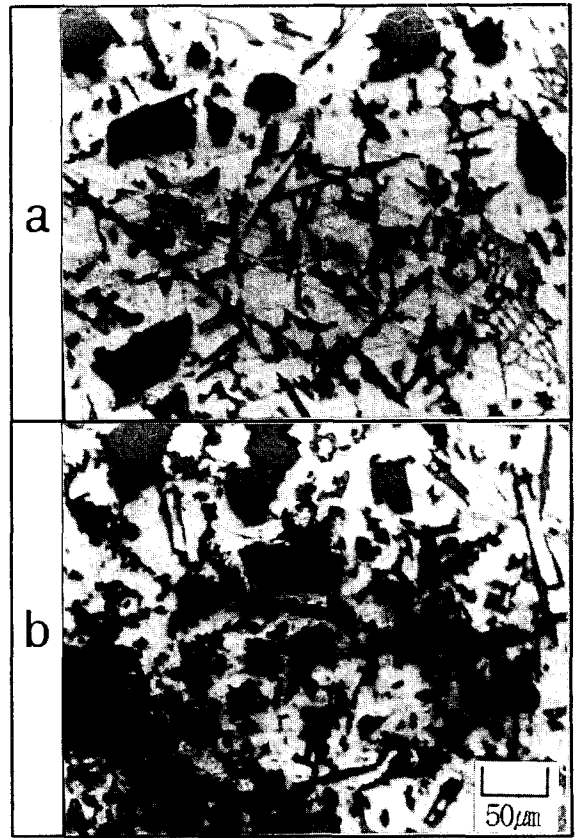


Photo. 4. Microstructures of Al-18%Si/6%SiC_p composite after 30 min. holding at about 700°C in particles settling test near the interface of particles free and containing zone. (SiC particle size : 16µm) (a) SiC particles free zone (b) interface of SiC particles free and settling zone

Stokes' 법칙에서 입자의 침강 속도는 입자의 직경에 비례한다는 것과 잘 일치한다.

사진 1~사진 4는 SiC 입자 크기가 16µm이고 분산량이 6wt%인 Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕에서 SiC 입자 침강 시간을 30분간 유지한 것의 미세 조직 사진이다. 각각의 사진에서 (b)는 입자가 없는 부위와 SiC 입자를 포함한 부위 사이의 계면 근처의 조직 사진으로, SiC 입자가 하부로 침강이 되어 있음을 알 수 있다. 각각의 사진에서 (a)는 입자가 없는 부위와 SiC 입자를 포함한 부위 사이의 계면 직상부의 입자가 없는 부위를 나타낸 것으로 SiC 입자의 침강으로 인해 SiC 입자가 보이지 않음을 알 수 있다.

기지 조직이 6%Si와 10%Si인 아공정조성의 경우 침전된 입자는 초정 α 결정입계에 집중돼 있으며, 14%Si와 18%Si인 과공정조성의 경우는 초정 Si 위에 존재함을 알 수 있다.

입자가 침강된 부위의 수직상간 간극은 입자가 없는 부위와 비교할 때 상대적으로 미세한데 이것은 분산된 SiC 입자가 Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕의 수직상응고 구조에 영향을 준 것으로 보여진다.

5. 결 론

Al-xSi/ySiC_p(x : 6,10,14,18wt%, y : 3,6,9wt%, SiC particle size: 10, 16,22,28/μm)계 복합재료 용탕을 700℃에서 10분~1시간 유지하여 SiC 입자의 침강 현상을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Al-Si/SiC_p 복합재료 용탕에서 SiC 입자의 침강 거리는 유지시간에 비례하여 증가하고, 처음 30분 동안 빠르게 증가한다.

2) Al-Si/SiC_p 복합재료에서 기지합금 중 Si의 함유량이 6wt%에서 18wt%로 증가하면 SiC 입자의 침강속도는 약 6~9% 정도 빨라진다.

3) Al-Si/SiC_p 복합재료에서 분산된 SiC 입자의 크기가 클수록 SiC 입자의 침강속도는 빨라진다.

4) Al-Si/SiC_p 복합재료에서 분산된 SiC 입자의 첨가량이 증가하면 SiC 입자의 침강속도는 감소한다.

참 고 문 헌

1. M.K. Surappa and P.K. Rohatgi : Met. Trans., **12B** (1981) 327.
2. D.J. Lloyd and B. Chamberlain : Cast Reinforced metal Composites, ASM, (1988) 263-269.
3. N. Setargew, B.A. Parker and M.J. Couper : Proceeding of the Korea-Australia Joint Seminar on Advanced Light Alloys, RASOM KOREA (1994) 45-57.
4. N. Setargew, B.A. Parker and M.J. Couper : "Advanced Composites '93", TMS. Warrendale, Pa., (1993) 1021.
5. J.C. Kim : Ph.D. Thesis at the Chungnam National Univ., (1996) 33-61.
6. G.H. Geiger and D.R. Poirier : Transport Phenomena in Metallurgy, Addison-Wesley Publishing, (1973) 10.
7. J.F. Richardson and W.N. Zaki : Sedimentation and Fluidization Part I, Trans. Instn. Chemical Engineering, **32**(3), (1954) 65.