

■■■■■■■■■■
論 文
 ■■■■■■■■■■

알루미늄 B390 합금의 조직미세화에 미치는 Ca의 영향

김현주[†]

Effects of Ca on the Refinement of Microstructure in Aluminum B390 Alloy

Heon-Joo Kim[†]

Abstract

Effects of Ca content on the refinement of primary Si of Aluminum B390 alloy have been examined. Ca was found to have an effect on the refinement of primary Si particle. Primary Si particle size has been refined as Ca content of the melts decreased and cooling rate increased. A control of Ca content by the addition of CuCl_2 to the melt was the most efficient in the refinement of primary Si particles. The minimum size of primary Si particles in this study was $15.0 \mu\text{m}$ when a residual content of Ca element in the alloy was 5 ppm. Primary Si particle size was refined as primary Si crystallization temperature increased, which was attributed to the decrease of Ca content in the melts. (Received August 28, 2002)

Key words : B390 Al alloy, Effect of Ca content, Refinement of primary Si particle

1. 서 론

과공정 Al-Si합금 조직은 다각형의 초정Si이 기지조직에 분포하여 우수한 내마모특성, 고온강도특성과 함께 열팽창율이 적고 비강도가 큰 경량 주물재료로 자동차 엔진블록, 피스톤, 실린더, 펌프 등의 소재에 많이 사용되고 있다[1-4]. 이 합금은 비금속 초정Si입자가 기지금속에 분포하는 복합재료 조직특성을 지니므로, 합금개발 측면에서 초정Si 입자를 미세하고 균일하게 분포시키는 것이 주요 관심 사항이다. 이 기술이 개발된다면 기존의 고가 알루미늄기 복합재료의 특성을 유지하면서도 간단한 제조공정과, 재활용시 발생하는 강화재 처리문제가 없는 환경 친화적이며 저렴한 특성을 지닌 복합재료의 대체재료가 될 수 있다. 이런 장점을 지닌 합금으로 활용되기 위한 선결조건은 보다 효과적인 초정Si 입자미세화 기술의 개발이다.

기존의 초정Si 입자미세화 기술은 냉각속도를 제어하기 위한 용탕의 급냉[5], 저온주조[6], 가압주조 등의

방법이 있으며, 현재 비교적 널리 이용되고 있는 방법은 미량원소 첨가에 의한 초정Si의 불균질 핵생성 장소를 제공하는 것으로 P성분을 함유한 AlCuP 미세화제 첨가가 국내외에서 널리 사용되고 있다[7].

Ca성분은 금속Si에 불순원으로 함유되어 있으며, 일반적으로 Sr, Na 등과 함께 Al-Si합금의 공정Si 개량 효과를 나타내는 원소로 알려져 있다[8,9]. 그러나, 과공정 Al-Si합금 제조시 다량 첨가되는 Si에 혼입되어 용융금속의 Ca함량을 높이고 있으나 그동안 Ca영향을 조사한 연구가 거의 없다는 사실에 주목하여 B390합금의 미세조직에 미치는 Ca의 영향을 조사하였다.

본 연구는 용탕의 Ca함량 제어를 통해 초정Si 입자 크기 영향을 관찰하여 B390합금의 초정Si 입자미세화 가능성을 조사하였다. 또한, 간편하고 실용적인 용탕 Ca성분 제어를 위해 선정된 미세화제의 효과를 비교하여 B390합금의 초정Si 입자미세화 효과를 극대화하고자 하였다.

부경대학교 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University)

[†]E-mail : metjoo@pknu.ac.kr

2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 Aluminum Association(AA) B390합금(이하 B390으로 표기)으로 실제 화학조성은 Table 1과 같으며, International Organization for Standardization(ISO)의 A2390계열에 해당한다.

용해작업은 4번 흑연도가니를 사용한 실리코니트 전기로에서 행하였으며, 잉고트 용락이 일어나는 온도에서 용제를 도포하고 800°C에서 Ca함량 변화 미세화처리를 행하였다. 미세화처리 후, 750°C에서 30분간 진정시켰으며, 셸몰드(Shell mold pouring cup)와 SKD강의 금형 열분석용 컵에 용탕을 주입하고 냉각곡선을 측정하였다.

미량 첨가원소에 의한 미세화처리는 AlCuP(상품명) 미세화제를 용탕량의 0.3wt% 사용하여 750°C 용탕에 첨가하였으며, 미세화제를 첨가하지 않고 일반적인 탈개스를 행한 무처리 재료의 초정Si 입자크기와 비교하였다.

불순물 원소로 함유되는 Ca성분이 초정Si 입자크기에 미치는 영향에 주목하여, 용탕 Ca함량을 변화시켜 B390합금의 초정Si 입자 미세화 영향을 조사하였다. Al-4.5wt% Ca 모합금을 적정량 첨가하여 용탕의 Ca함량을 증가시켰다. 용탕의 탈 Ca처리는 용융금속의 용해온도 구간에서 Ca와 친화력이 큰 염화물[10]로 칼슘염화물(CaCl₂)을 형성시켜 Ca성분을 감소시켰으며, 탈Ca용 첨가제로 사용된 Ti₂Cl₆와 CuCl₂화합물의 1회 첨가량은 용탕량의 0.6wt%였다.

미세화효과 확인을 위해 시료들을 100배율의 광학현미경으로 5군데 부위를 관찰하고, 화상해석 프로그램으로 처리하여 초정Si 입자크기를 정량적으로 평가하였다. 미세화 처리된 시료는 유도결합 플라즈마 분광법(ICP)으로 Ca성분을 분석하였으며, 시료의 Ca함량과 초정Si 입자크기의 상관성을 비교하여 초정Si 입자미세화에 대한 Ca의 영향을 조사하였다. 또한, Ca함량이 각기 다른 용탕의 냉각과정을 열분석하여 용탕의 Ca함량에 따른 초정Si 및 공정Si 정출온도 변화를 모니터링하여 입자크기와의 관련성을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 초정Si 입자크기에 대한 Ca의 영향

알루미늄합금 용해과정에서 용제, 용해로의 내화물 및 금속Si에 함유된 불순원소 Ca이 용탕으로 혼입되며, 특히 과공정 Al-Si계 합금에서 다량 사용되는 금속Si로부터 Ca이 많이 유입되어 재료의 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이와 같이 과공정 Al-Si계 합금에 있어 초정Si 입자크기에 대한 Ca의 영향에 주목하여, Table 2와 같이 용탕의 Ca함량을 실험적으로 변화시켜 잔류Ca량과 B390합금의 초정Si 입자크기 사이의 상관성을 조사하였다.

잔류 Ca량이 다른 B390합금 시료들을 셸몰드 열분석 컵에 주입한 시편의 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. 시료의 잔류 Ca량을 ICP분석한 결과, 셸몰드 주조 조직에서 Al-Ca모합금을 첨가하여 잔류 Ca량이 많을

Table 1. Chemical composition of B.390 alloys.

	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Al
B.390 Standard	17.0	4.5	0.55	<1.5	<0.5	<1.3	Rem.
B.390 Used	18.7	4.0	0.56	0.68	0.13	1.0	Rem.

Table 2. Description of melts treatment.

	Melts Treatment	Specimen
		Retained Ca Content
Ca Addition	Addition of Al-Ca master alloy	190 ppm
	Addition of Al-Ca master alloy	140 ppm
	Addition of Al-Ca master alloy	45 ppm
Non Treatment	As received from ingots	34 ppm
Ca Reduction	1 times of melt treatment by Ti ₂ Cl ₆ agent	26 ppm
	4 times of melt treatments by Ti ₂ Cl ₆ agent	16 ppm
	1 times of melt treatment by CuCl ₂ agent	16 ppm
	4 times of melt treatments by CuCl ₂ agent	5 ppm

수록 시료(a), (b), (c)의 순서로 초정Si 입자가 조대하였다. 초정Si을 미세화시키기 위해 탈 Ca처리한 시료(d)의 초정Si 입자크기를 비교해 보면, 잔류 Ca량과 초정Si 입자크기의 관련성이 명확히 나타났다. B390합금에 함유된 Ca원소는 초정Si 입자를 조대화시키므로, 초

정Si 입자 미세화를 위해서 용탕 Ca함량을 줄이는 탈 Ca처리가 필요하였다. 잔류 Ca량을 감소시키기 위한 탈 Ca처리는 용탕에 함유되어 있는 Ca원소와 친화력이 큰 화합물을 용탕과 반응시키는 방법을 택하였다.

Fig. 2는 B390합금을 셸몰드 컵에 무처리 주조한 시

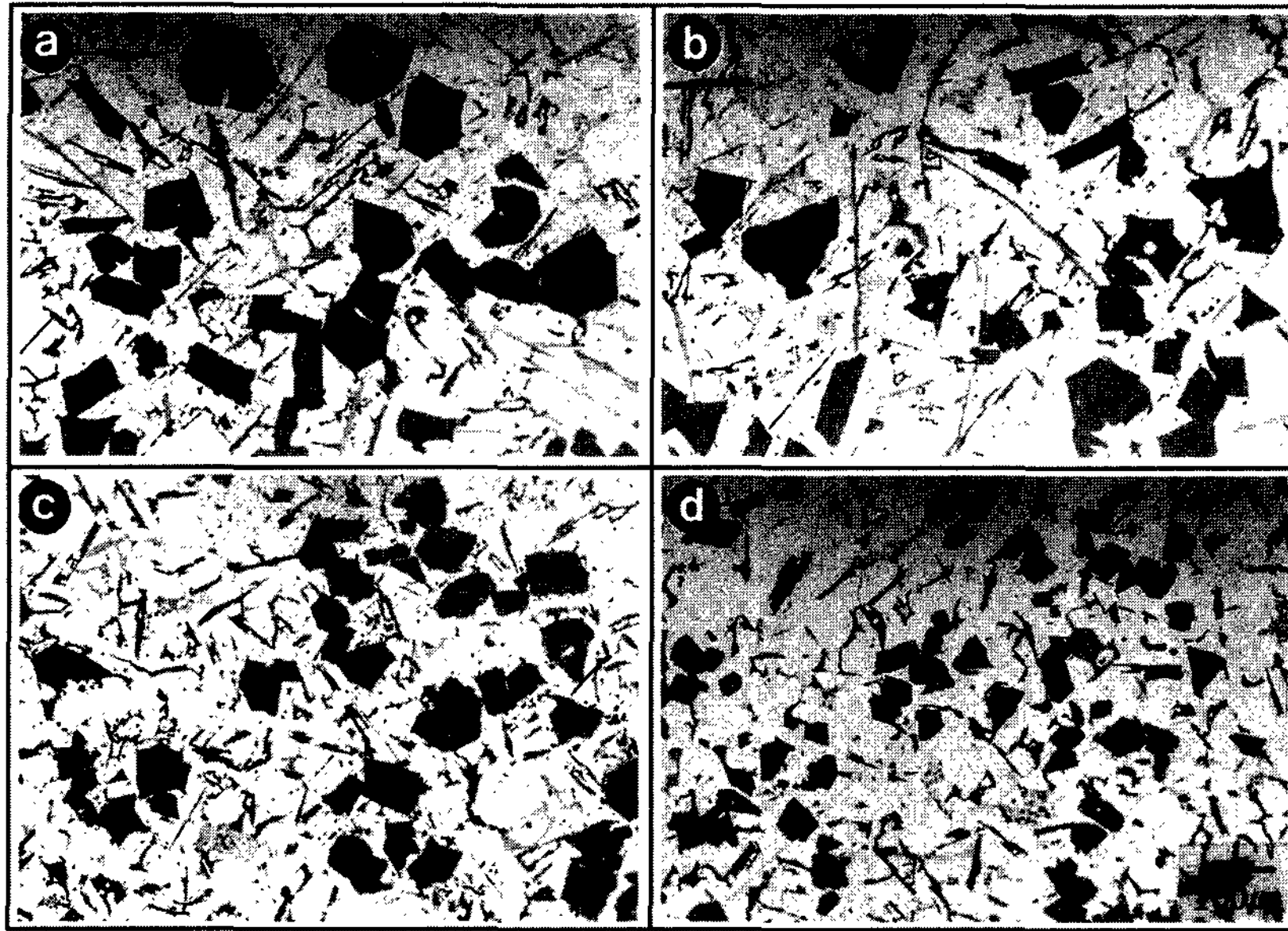


Fig. 1. Variation of primary Si size with different treatment in shell mold cast B.390 alloys. (a) 190 ppm Ca (b) 140 ppm Ca (c) 45 ppm Ca (d) 5 ppm Ca

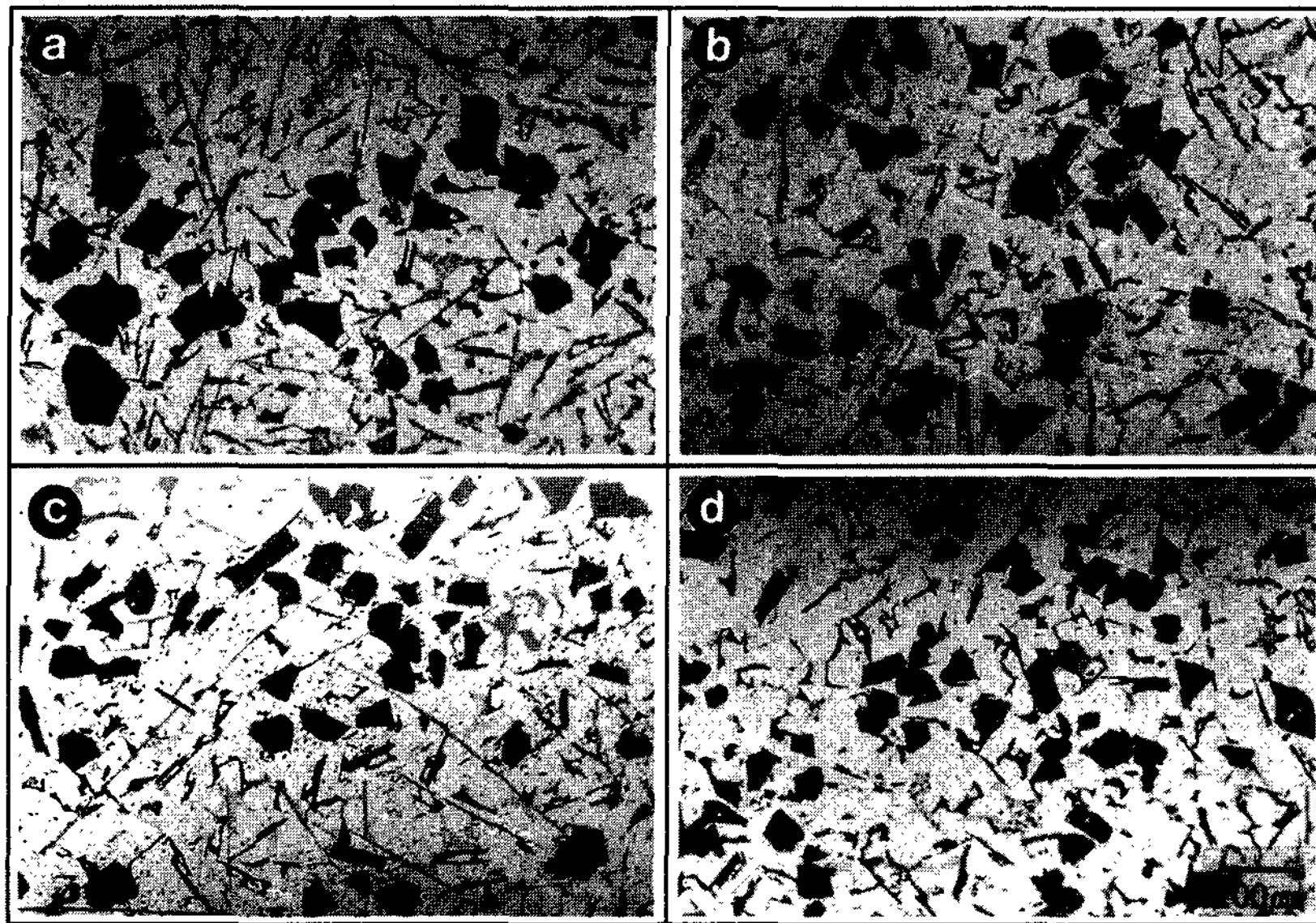


Fig. 2. Effect of Ca content reduction on primary Si size in shell mold cast B.390 alloys. (a) 34 ppm Ca (b) 26 ppm Ca (c) 16 ppm Ca (d) 5 ppm Ca

료(a)와 탈 Ca처리한 시료(b), (c), (d)의 미세조직을 나타내었다. 탈 Ca용 첨가제는 과공정 Al-Si계 주조합금 용탕의 용해온도 구간에서 Ca원소와 친화력이 큰 염화물인 Ti_2Cl_6 와 $CuCl_2$ 화합물을 선정하여, 칼슘염화물을 형성시켜 Ca성분을 제거하였다. 시료의 잔류 Ca량은 Ca와 친화력이 다른 화합물의 종류와 첨가량에 따라 좌우되는 것으로 사료된다. 초정Si 입자크기를 최대한 미세화시키기 위해서 용융금속의 용해온도 구간에서 Ti_2Cl_6 보다 Ca와 친화력이 강한 $CuCl_2$ 화합물 [10]을 사용하여 용탕에 수회 반응시켰을 때, 시료(d)와 같이 잔류 Ca량이 더욱 감소하고 미세한 초정Si 입자가 생성되었다. 이들 탈 Ca과정에서 형성된 $AlCl_3$ 화합물의 기화작용으로 용탕의 탈 수소가스 효과도 부수적으로 얻을 수 있었다.

실험에 사용된 B390합금 시료의 Ca성분 분석결과와 셸몰드 주입 시료의 초정Si 입자크기를 종합하여, 초정Si 입자크기에 미치는 잔류 Ca량의 영향을 Fig. 3에 나타내었다.

과공정 Al-Si합금 응고과정에서 P원소에 의한 AIP가 초정Si의 불균질 핵생성에 필요한 seed역할을 한다고 알려져 있다[11]. 용탕 Ca함량이 높을 때, P성분이 Ca와 반응하여 Ca_3P_2 를 우선적으로 형성시켜[12] 초정Si 미세화에 필요한 유효 P량이 감소된다. 따라서 P와 반

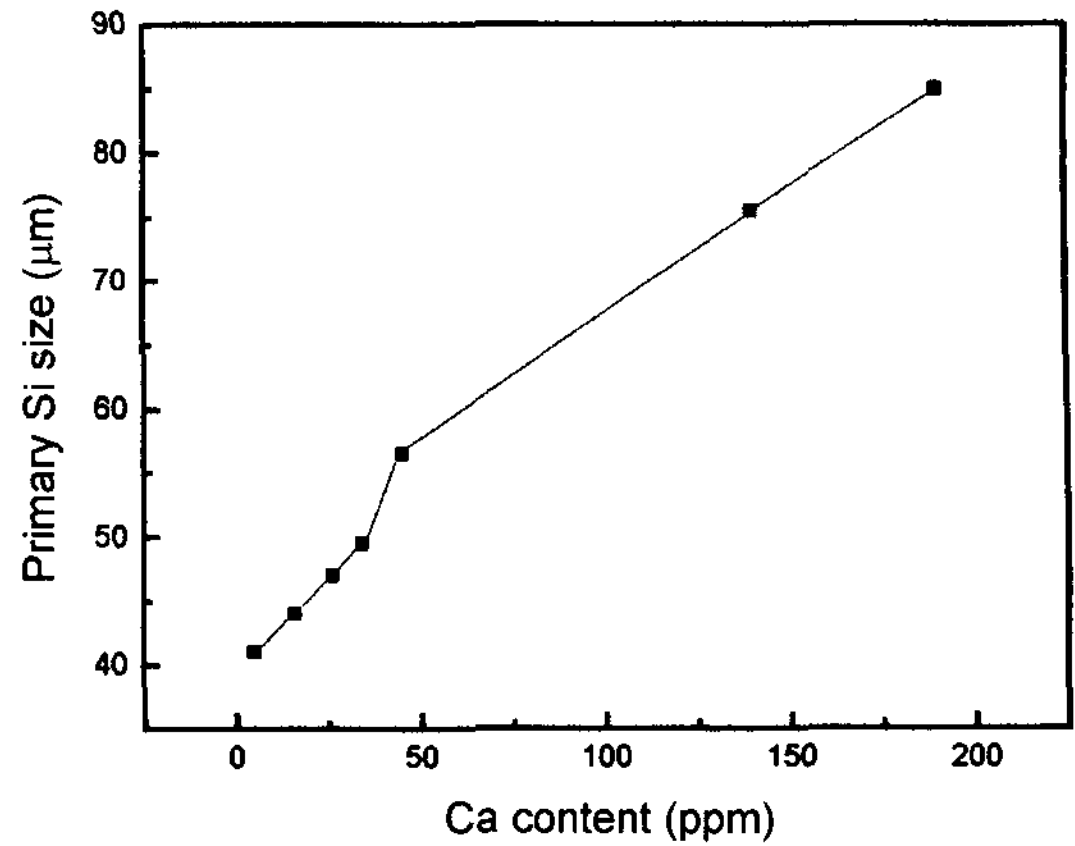


Fig. 3. Effect of Ca content on primary Si size in shell mold cast B.390 alloys.

응하는 Ca원소를 용탕에서 감소시키는 탈 Ca처리로 AIP형성에 의한 초정Si 불균질 핵생성을 조장시켜 초정Si 입자를 미세화시킨 것으로 사료된다. 잔류 Ca량이 감소할수록 B390합금의 미세조직 사진에 나타난 초정Si 입자는 미세화되는 경향을 나타내었으나, 탈 Ca처리에 의해 초정Si이 미세화되는 정확한 기구를 해명하기 위해서는 지속적인 연구가 필요하다.

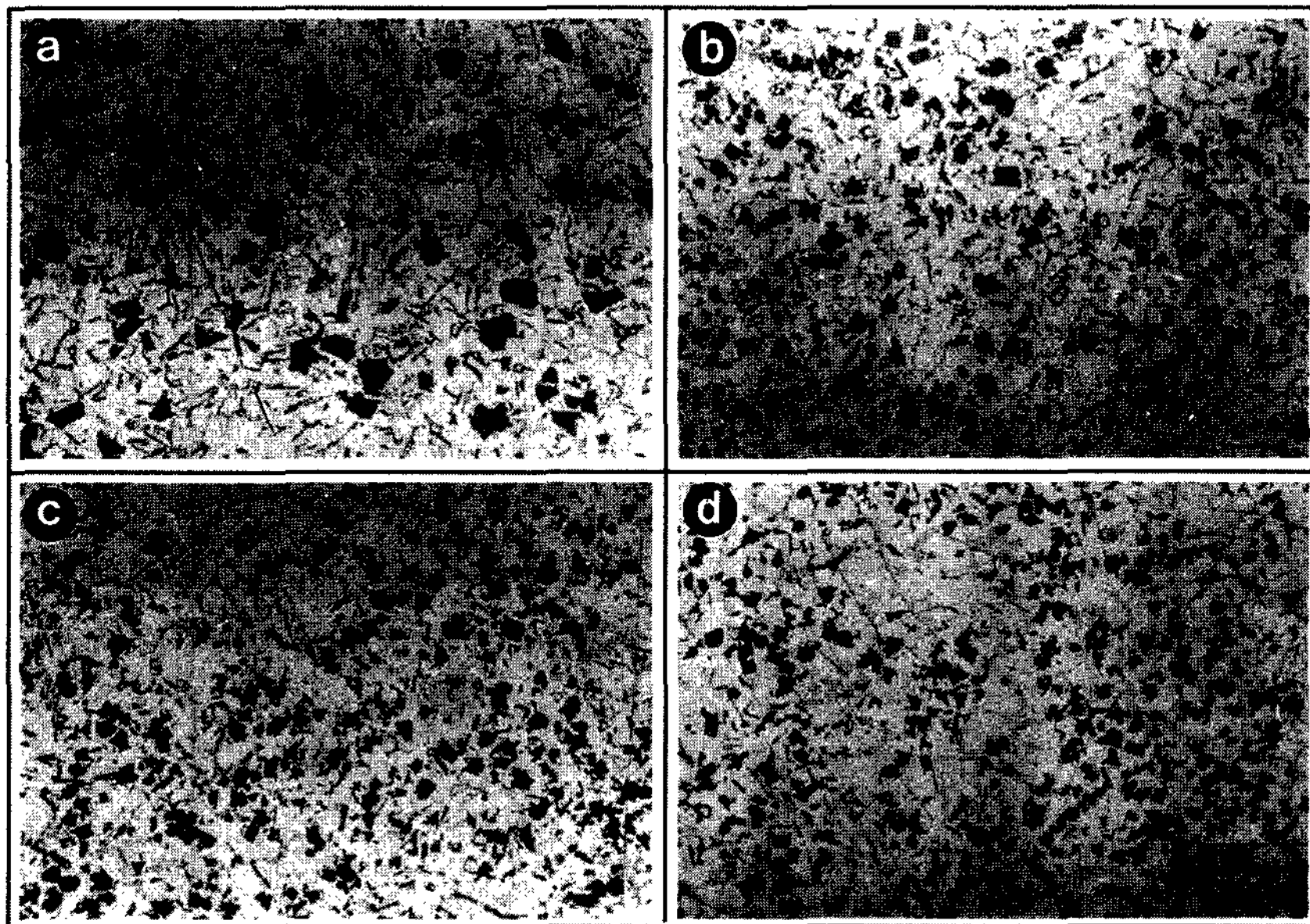


Fig. 4. Effect of Ca content on primary Si size in metal mold cast B.390 alloys. (a) 190ppm Ca (b) 34ppm Ca (c) 16ppm Ca (d) 5ppm Ca

3.2. 초정Si 입자크기에 대한 냉각속도와 P 첨가원소의 영향

과공정 Al-Si계 합금에 있어 초정Si 입자미세화를 위해 널리 사용되는 방법으로 앞절에서 고찰한 용융금속의 Ca함량 제어 외에, 초정Si의 불균질 핵생성장소를 제공하기 위한 P원소 미량 첨가[13]와 냉각속도 제어 방법[5]이 있다. 일반 주조공정에서 용융금속의 냉각속도를 극대화하는 것은 적용되는 경우에 따라 한계가 있지만 냉각속도 조절에 의한 초정Si 미세화효과는 매우 우수하다. 본 실험에서도 셸몰드 주형의 열분석용 컵과 동일 치수의 금형 열분석용 컵에 용탕을 주입하고 초정Si 입자크기를 측정하기 위해 광학현미경으로 미세조직을 촬영하였다.

Fig. 4는 셸몰드주형 열분석용 컵에 주입된 것과 동일한 용탕을 금형 열분석용 컵에 주입한 시료의 미세조직 사진이다. 셸몰드주입 시료에서 채취된 Fig. 1과 Fig. 2의 동일 Ca함량과 비교하면, 금형에서 채취된 시료의 초정Si 입자크기가 훨씬 미세하다.

Fig. 5는 셸몰드주형과 금형주형에 Ca함량을 각기 달리한 용탕을 주입하고 초정Si 입자크기를 측정한 것이다. 모든 시료에서 용탕의 Ca함량이 감소됨에 따라 초정Si 입자는 미세화되었으며, 금형에 주입된 시료의 입자크기가 훨씬 미세하였다. 용탕의 Ca함량 감소에 따른 초정Si 입자 미세화효과는 금형주입 시료보다 셸몰드주입 시료에서 더욱 크게 나타났다. Ca원소를 첨가하여 잔류 Ca량이 190 ppm인 셸몰드주입 시료의 경우 초정Si 입자직경은 85.0 μm 이며 동일조건인 금형주입 시료의 초정Si 입자직경은 28.5 μm 인 반면, CuCl_2 화합

물로 용탕을 4번 탈 Ca처리한 시료의 잔류 Ca량은 약 5 ppm으로 셸몰드주입 시료의 경우 초정Si 입자직경은 41.0 μm 이며 금형주입 시료의 초정Si 입자직경은 15.0 μm 로 가장 미세하였다. 동일한 잔류 Ca량 조건에서, 금형주입 시료의 초정Si 입자크기는 셸몰드주입 시료 초정Si 입자크기의 약 1/3 정도이다. 이것은 용융금속의 응고구간에서 금형으로 급속한 열전달로 금형주입 시료가 셸몰드주입 시료보다 빠른 냉각속도로 용탕 급냉 효과를 받은 것으로 추정된다.

냉각속도가 초정Si 입자크기에 미치는 영향을 조사하기 위해 주입 직전에 금형 열분석용 컵을 25, 100, 200°C로 예열하고 용탕을 주입하였다. Ca의 영향을 배제시키고 순수 냉각속도의 영향을 평가하기 위해서 5 ppm Ca B390합금을 대상으로 초정 정출온도와 공정온도 구간에서 측정된 냉각속도에 따른 초정Si 입자크기를 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 용탕 조건에서 셸몰드주형과 예열온도를 달리하는 금형에 주입된 용탕의 냉각속도 차이로 인하여 초정Si 입자크기는 변화되어, 응고구간의 냉각속도가 빠를수록 초정Si 입자크기는 감소되었다.

B390합금의 초정Si 입자미세화에 대한 미량 원소첨가의 영향을 조사하기 위하여, 탈 Ca처리를 행하지 않은 용탕에 AlCuP 미세화제를 첨가하여 초정Si 입자크기 변화를 관찰하였다. 과공정 Al-Si합금에서 초정Si을 미세화시키기 위한 미량 첨가원소법은 분말야금법으로 제조하고 열처리하여 AlP를 미리 형성시킨 AlCuP 미세화제를 용탕에 첨가하는 방법으로 국내외에서 널리 사용되고 있다.

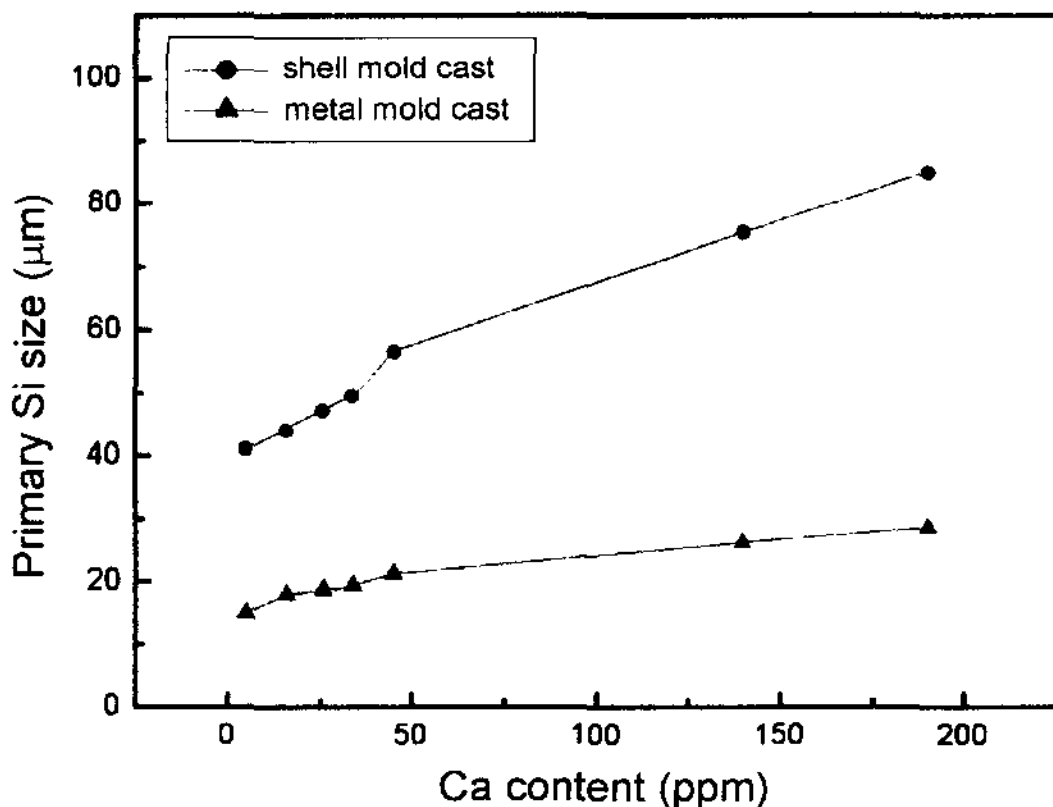


Fig. 5. Variation of primary Si size with the changes of mold materials and Ca content in B.390 alloys.

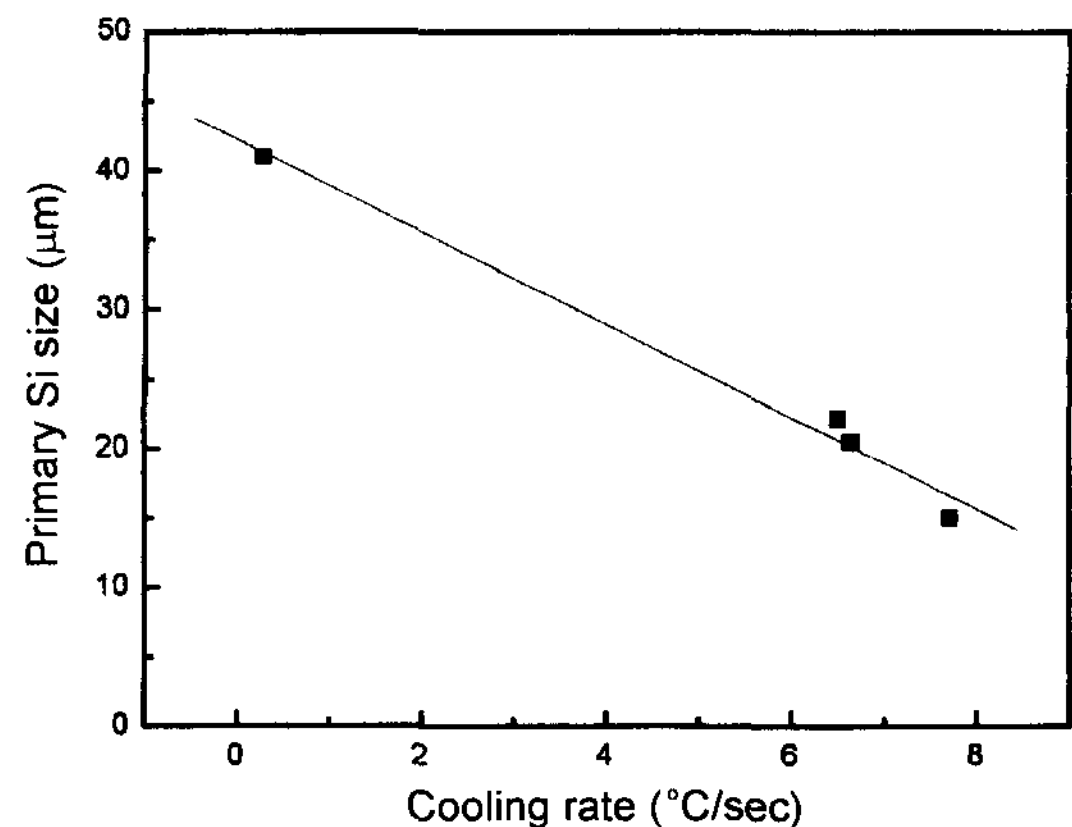


Fig. 6. Effect of cooling rate on primary Si size of the B.390 alloy with 5 ppm Ca.

미량 P원소 첨가법과 탈 Ca처리에 의한 B390합금의 초정Si 입자미세화 효과를 분석하기 위해 냉각속도가 일정한 상온의 금형 열분석용 컵에 시료들을 주입하였다. Fig. 7은 용탕에 AlCuP 미세화제를 첨가한 시료와 탈 Ca처리에 의해 Ca함량이 5 ppm인 시료를 상온의 금형에 주입하고 각각의 초정Si 입자크기를 비교한 사진이다. AlCuP 미세화제 첨가시료는 용탕에 AIP를 형성시켜 초정Si 불균질 핵생성 장소를 제공하므로[11] 무처리 시료의 초정Si 입자보다 훨씬 미세하다.

과공정 Al-Si합금에서 미세한 초정Si 입자를 얻기 위해 대표적으로 적용되는 미세화기술은 용탕 급냉법[5]과 미량 원소첨가법[7,13]이다. 용탕 급냉법과 P원소로 대표되는 미량 원소첨가법에 의해 초정Si이 미세화되는 기구는 상이한 것으로 설명되고 있다[14]. P 첨가 원소에 의한 방법은 twin plane re-entrant edges(T. P. R. E) 형성[15,16]에 의해 Si성장이 어려워져 초정Si 입자가 미세한 것으로 설명된다. 반면, 용탕급냉에 의해 형성된 초정Si은 투과전자현미경 관찰에서 트윈(twin)이 거의 관찰되지 않아 미세화기구가 다른 것으로 추정되고 있다. 본 실험에서 AlCuP 미세화제를 첨가한 시료보다 탈 Ca처리 시료의 초정Si 입자가 미세

하여 더욱 효과적인 미세화방안으로 생각된다. 그러나, 탈 Ca처리에 의한 초정Si 입자 미세화에 대한 현상과 기구는 현재까지 밝혀져 있지 않다.

3.3. 조직미세화와 열분석곡선

용탕 Ca함량에 따른 B390합금 초정Si 입자크기 변화를 응고과정의 열분석곡선에 나타난 초정Si 응고거동 변화와 관련시켜 해석하였다. 용탕 냉각과정을 열분석하여 Ca함량 변화에 따른 초정Si 정출온도 변화를 초정Si 형성과 관련된 응고거동 변화로 생각하여, 초정Si 정출온도 변화와 초정Si 입자크기의 관계를 조사하였다.

Fig. 8은 셀몰드주형 컵에서 측정된 열분석곡선으로, 탈 Ca처리에 의해 초정Si 입자크기가 미세할수록 초정Si 정출온도가 높게 나타났다. 액상금속에서 정출되는 초정Si이 불균질 핵생성 기구에 의해 형성되는 것을 가정하면[11], 탈 Ca처리에 의해 용탕 Ca함량이 적은 시료의 초정Si 정출온도가 높은 것은 초정Si 핵생성을 위한 임계핵 생성이 Ca함량이 많은 시료보다 용이하다는 것을 의미한다. N. Tenekedjiev 등의 열분석실험에서 초정Si 입자가 조대화될 때 액상선온도가 저하된 실험결과와 일치한다. Al-17% Si합금에서 Sr이 첨가되면 P와 반응한 결과, 유효 P함량이 감소하여 초정Si 핵생성이 어려워 초정Si 입자크기가 조대화되면서 액상선온도가 저하되었다[17].

초정Si이 핵생성될 때 AIP와 같은 불균질핵생성 seed로부터 형성된다면 Ca원소가 이 seed의 크기와 분포에 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 용탕의

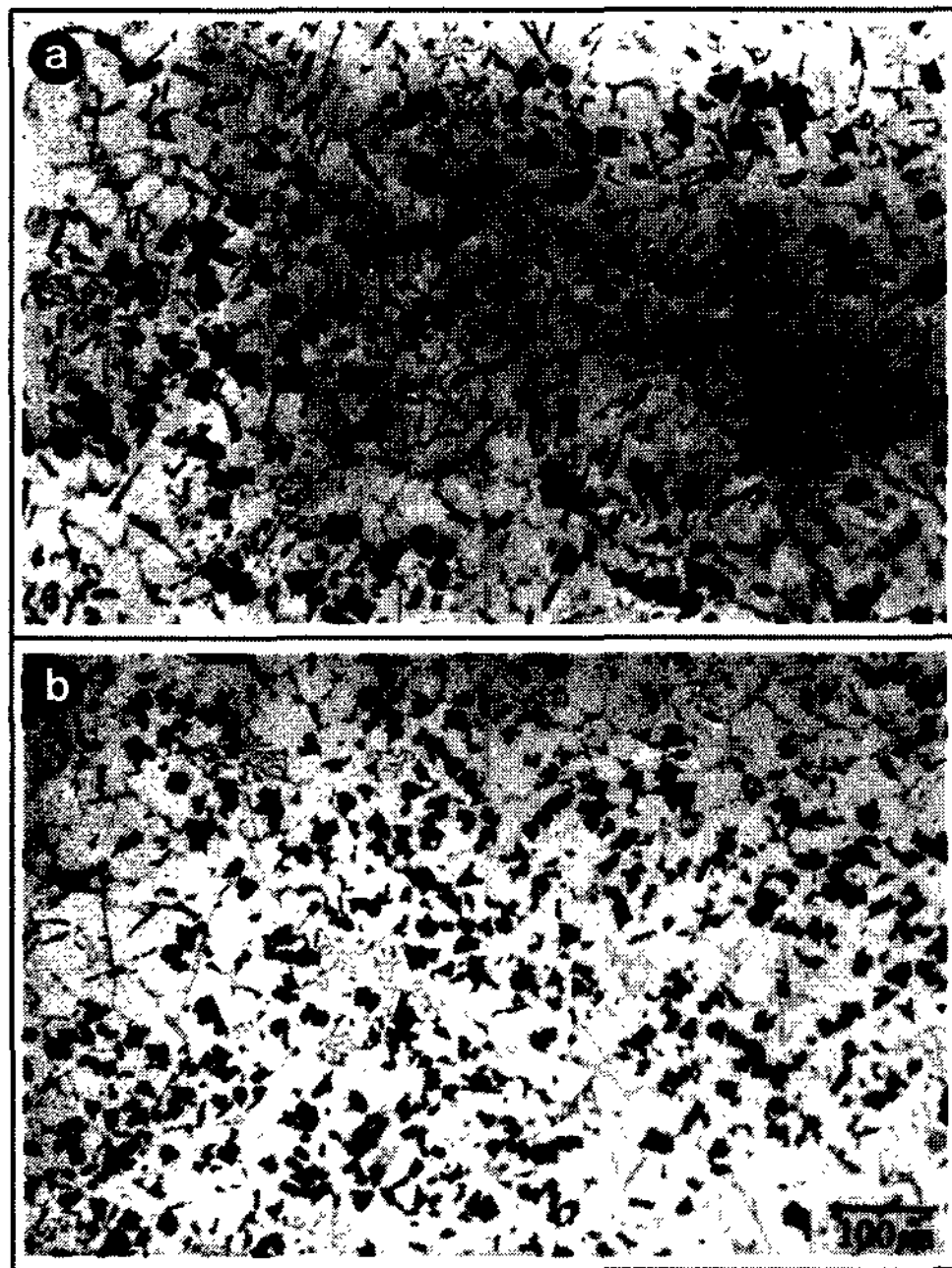


Fig. 7. Effect of AlCuP inoculation method on the refinement of primary Si size in metal mold cast B.390 alloys. (a) AlCuP treated specimen (b) 5ppm Ca specimen

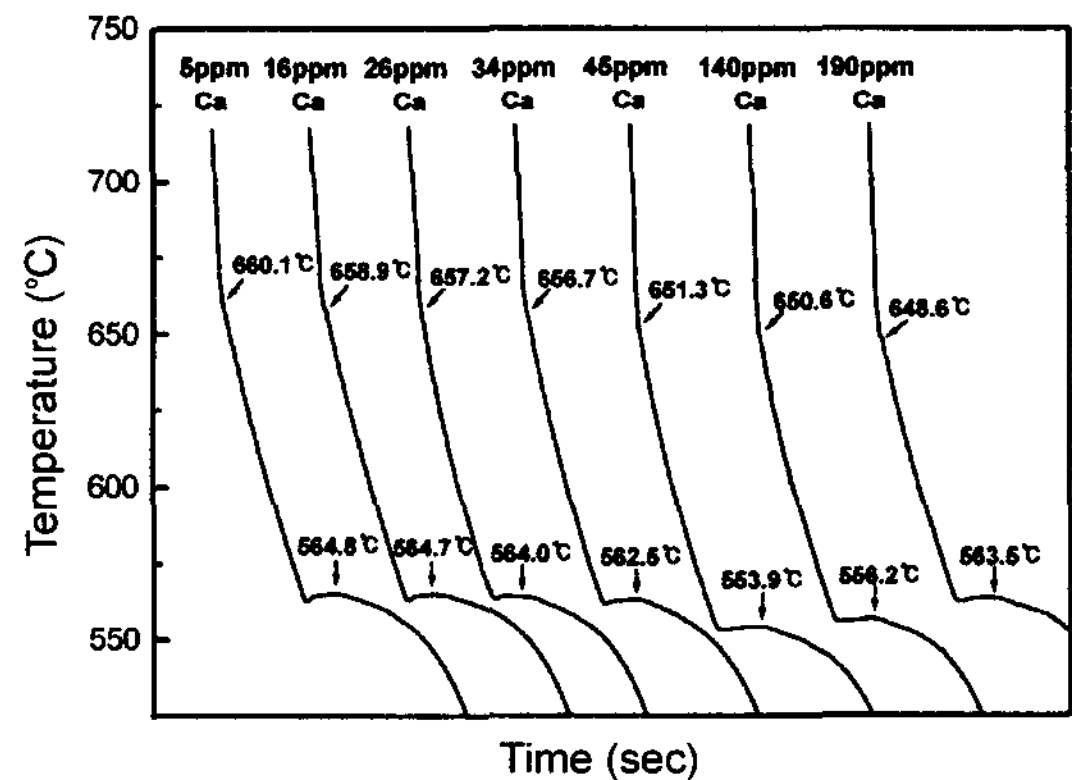


Fig. 8. Effect of Ca content on the cooling curve of shell mold cast B.390 alloys.

Table 3. Effect of Ca content on crystallization temperature of primary Si and Si eutectic temperature of B.390 alloys.

Crystallization Temperature		Specimens						
		Retained Ca Content(ppm)						
		5	16	26	34	45	140	190
Primary Si (°C)	Metal Mold	681.7	671.7	666.3	662.4	658.4	655.5	649.1
	Shell Mold	660.1	658.9	657.2	656.7	651.3	650.6	648.6
Eutectic Si (°C)	Metal Mold	566.0	564.8	568.5	561.0	558.9	563.5	559.3
	Shell Mold	564.8	564.7	564.0	562.5	553.9	556.2	563.5

Ca함량이 높을 때, Ca와 P성분이 반응하여 Ca_3P_2 를 형성하여 소모됨으로써[12], 초정Si 미세화에 필요한 AIP형성에 유효한 P량이 용탕에서 감소된다. 따라서 용탕의 탈 Ca처리로 P성분 소모를 사전에 예방하여 유효한 AIP 분포를 증대시켜 초정Si을 미세화시키는 것으로 사료된다. B390합금의 냉각곡선 분석결과로부터 초정Si 입자를 미세화시키기 위해 용탕의 탈 Ca처리가 효과적 방법임을 알 수 있다.

공정 Al-Si합금에서 Ca첨가는 Na, Sr 등에 비해 미약하지만 공정Si 형상개량 효과를 지니, Ca함량이 높을수록 Si 공정온도가 낮아져 미세한 공정Si 형상으로 변화한다[8,9]. 과공정 Al-Si합금에서 공정Si형성에 대한 Ca영향은 지금까지 알려져 있지 않지만 상당량의 Ca이 합금에 함유되므로 조직과 기계적특성에 미치는 영향을 연구할 필요성이 있다. 셀몰드주형 컵에서 측정된 Fig. 8의 열분석곡선에 나타난 것처럼 초정Si 정출온도와는 달리 용탕의 Ca함량 변화에 따른 Si 공정온도는 뚜렷한 경향이 없다. 그러나 공정Si의 형성과 관련하여 Ca함량이 높은 시료에서는 1°C 미만의 과냉이 관측되었으나, 탈 Ca처리에 의해 용탕 Ca함량이 적은 시료에서 2°C의 큰 과냉이 나타났다.

Table 3은 용탕의 Ca함량을 달리하여 셀몰드주형 컵과 금형주형 컵에 주입하여 측정된 초정Si 정출온도와 공정온도를 정리한 것이다. 냉각속도가 빠른 금형주형 컵의 시료에서 동일 Ca함량 셀몰드주형 컵 시료보다 초정Si 정출온도는 상당히 높아져, 초정Si 입자크기가 미세할수록 초정Si 정출온도가 증가하는 관계를 나타내었다.

4. 결 론

과공정 Al-Si계 합금에 있어 초정Si 입자크기에 대한 Ca원소의 영향에 주목하여, B390합금을 대상으로 용탕의 Ca함량 제어를 통한 초정Si 입자미세화 영향을 조

사한 실험을 통하여 다음 결과를 얻었다.

1. 용탕의 Ca함량이 높을수록 초정Si 입자가 조대하였으며, 초정Si 입자미세화를 위해서 용탕의 Ca함량을 줄이는 탈 Ca처리가 필요하였다.

2. 탈 Ca처리는 용해온도 구간에서 Ca원소와 친화력이 큰 $CuCl_2$ 화합물을 용탕에 첨가하고 반응에 의한 칼슘염화물을 형성시켜 용탕의 Ca성분을 제거하였다.

3. 동일한 Ca함량 조건에서 용탕의 냉각속도가 빠를수록 초정Si 입자크기는 미세하였다. 탈 Ca처리에 의해 Ca함량 5 ppm인 용탕을 금형 열분석 컵에 주입한 시료의 초정Si 입자크기는 15.0 μm 로 본 실험조건에서 가장 미세하였다.

4. 초정Si 입자를 미세화시키기 위해 용탕의 탈 Ca처리가 AlCuP 미세화제 첨가 보다 더 효과적인 미세화 방법이었다.

5. 응고과정의 냉각곡선에서 초정Si 정출온도가 증가할수록 초정Si 입자크기가 미세하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R02-2000-00237)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. B. Andrews : AFS Transactions, "A New, Highly Wear-Resistant Aluminum-Silicon Casting Alloy for Automotive Engine Block Applications", 92(1984) 209-216.
- [2] G. K. Sigworth : AFS Transactions, "Refinement of Hypereutectic Al-Si Alloys", 95(1987) 303-314.
- [3] J. L. Jorstad : Transactions of the Metallurgical Society of AIME 242, "The Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys 390 and A390", (Jul 1968) 1217-1221.
- [4] Metals Handbook, Properties and Selection : Nonferrous Alloy and Special Purpose Materials, ASM, Metals Park, OH., USA, 2(1992) 171.
- [5] J. Zhou, J. Duszczek and B. M. Korevaar : J. of Materials

- Science, "Microstructural Features and Final Mechanical Properties of the Iron-modified Al-20Si-3Cu-1Mg Alloy Product Processed from Atomized Powder", 26(1991) 3041-3050.
- [6] E. L. Rooy : AFS Transactions, "Summary of Technical Information on Hypereutectic Aluminum Silicon Alloys", 80(1972) 421-426.
- [7] Wolfgang Schneider : "Light Metals", ed. Subodh K. Das, The Minerals, Metal, and Materials Society, "A New Method for the Refinement of Primary Si of Hypereutectic AlSi Alloys in Direct Chill and Ingot Casting", (1993) 815.
- [8] T. Kobayashi, H. J. Kim and M. Niinomi : *Materials Science and Technology*, "Effect of Calcium on Mechanical Properties of Recycled Aluminium Casting Alloys", 13(1997) 497-502.
- [9] T. Kobayashi, M. Niinomi, M. Yamaoka, Y. Shimomura and T. Harata : *J. Jpn Inst. Light Met.*, 43(1993) 581.
- [10] JANAF Thermochemical Tables, 3rd Ed., ACS, Midland, Michigan, USA, 14(1985) 696.
- [11] P. B. Crossley and L. F. Mondolfo : *Modern Casting*, "The Modification of Al-Si alloys", 49(1966) 53.
- [12] *Thermochemical Data of Pure Substances, Part I*, VCH, (1992) 340.
- [13] Sterner-Rainer : U. S. Patent 1, 940, 922, Dec. 26, 1933.
- [14] Shu-Zu Lu and A. Hellawell : *Metall. Transactions*, "The Mechanism of Silicon Modification in Aluminum-Silicon Alloys: Impurity Induced Twinning", 18A(1987) 1721-1733.
- [15] R. S. Wagner : *Acta Metall.*, 8(1960) 57.
- [16] D. R. Hamilton and R. G. Seidensticker : *J. Appl. Phys.*, 31(1960) 1165.
- [17] N. Tenekedjiev, D. Argo and J. E. Gruzleski : AFS Transactions, "Sodium, Strontium and Phosphorus Effects in Hypereutectic Al-Si Alloys", 97(1989) 127-136.