論 文

주철 용탕 중 접종제의 접종 효과와 감쇄 거동

이해성 · 권해욱†

Effect and Fading Behavior of Inoculant in the Cast Iron Melt

Hae-Sung Lee and Hae-Wook Kwon†

Abstract

The abilities and fading behaviors of 5 different inoculants were evaluated by the thermal analyses of the melts which were held at constant temperature after addition in induction furnace. The silicon content was preserved at the high holding temperature of 1,450~1,500°C, which reduced by oxidation at the low one. The inoculation temperature should be higher to obtain better and reproducible result. The inoculation performance of 1%Ba-Fe-Si was the best on the bases of effect and fading behavior.

(Received March 20, 2003)

Key words : Cast iron, Gray cast iron, Inoculation, Inoculant, Melt treatment

1. 서 론

요구되는 특별한 성질을 가지는 주철을 생산하는 데 있어서 어려운 점이 많았다. 초창기에는 파면으로 주철의 특성을 판정하였고 비교적 최근에는 주물의 미세조직으로 판정하였다. 시행 착오를 거듭하여 주물 기술자들은 용탕을 효과적인 접종제로 적절하게 처리하여 주철을 금속공학적으로 잘 조절하면 상당히 좋은 결과를 얻는다는 것을 인식하게 되었다. 주철의 단면이 얇거나, 날카로운 구석 부분에서, 용탕 중 탄소 또는 규소 혹은 이 두 원소 모두의 함량이 낮을 때에, 장입물 중 흑연의 분율이 낮을 때에, 용해 속도가 높고 주입 온도가 높을 때에, 연 중 습도가 높은 기간 또는 특별한 기간 동안에, 또는 설명하기 어려운 여러 경우에 칠, 탄화물과 흑연이 섞인 조직 또는 백주철 조직이 생기기 쉽다[1]. 용탕을 주입하기 전에 용탕에 흑연 또는 페로실리콘을 첨가하면 여러 가지 나쁜 영향을 완화시키고 일관성이 있고 신뢰성이 있는 주철 조직을 얻을 수 있다. 오스테나이트-흑연 공정을 위한 핵생성 자리의 수를 증가시키기 위하여 용탕을 처리하는 과정을 접종(또는 후접종)이라 한다[1].

회주철을 접종하면 오스테나이트편상 흑연 공정이 형성하는 온도가 증가한다[2]. 이것은 이 공정을 위한 핵생성 자리의 수가 증가하는 것과 관련이 있다. 결과적으로, 공정 응고의 온도가 가장 높을 때에 방향성이 없고 균일하게 분포한 편상 흑연(ASTM A 형태)의 공정이 형성한다[2]. 각 공정은 기본적으로 셀의 형태로 응고한다. 즉, 각 셀은 흑연과 오스테나이트가 독립적으로 핵생성하여 편상 흑연과 오스테나이트 모두가 액상과 접촉한 상태에서 성장하여 나타난다. 응고가 진행됨에 따라서, 이 셀들은 서로 만나게 되어 제일 늦게 응고하는 액상이 셀 사이의 영역에 모인다. 이 공정의 응고는 오스테나이트와 액상의 조성이 변화하면서 한 온도 범위에 걸쳐서 일어난다. 규소, 니켈 및 구리를 제외한 용탕 속에 존재하는 다른 원소들 셀 사이의 영역에 선택적으로 편석하여 이 원소들의 농도는 증가한다.

주철의 접종은 응고가 일어나는 동안 오스테나이트-흑연의 핵생성을 촉진시키는 과정이다. 실제로는 균질 핵생성은 일어나지 않기 때문에 공정의 핵생성은 불균

영남대학교 공과대학 재료금속공학부(School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam University)
†E-mail : hwkwon@yumail.ac.kr

질하고 용탕 내에 공정 응고를 일어나게 하는 효과적인 핵생성 자리가 존재하여야 한다. 회주철 내의 각 공정 셀이 형성하는 데에는 오스테나이트-흑연 공정셀 중 흑연 형성이 시작되게 하는 핵생성제가 필요하다. 공정반응이 시작하는 데 있어서 흑연이 선도하는 상이다. 주철의 응고에 관한 문헌을 보면 효과적인 핵생성제의 성질을 설명하기 위한 이론은 여러 가지가 있으나, 현재에는 핵생성제는 필요한 계면 에너지를 충족시킬뿐만 아니라 흑연의 격자와 잘 일치하는 산화물, 산화-황화물 또는 규산염으로 되어 있다는 것을 대체로 이해하고 있다[1-6].

접종 현상은 흑연 개재물이 생기게 하고 흑연을 핵생성시키기 위한 핵생성 자리를 마련하는 것이다. 접종제에는 페로실리콘기 접종제, 불순물을 함유하는 흑연 및 CaSi 및 SiC와 같은 규소기 접종제의 3 가지 기본 형태가 있다[2].

접종제는 용탕 내에 잘 혼합되어야 한다. 단순히 혼합된 핵은 첨가한 입자의 수와 같은 것은 아니다. 효과적인 접종제가 되기 위해서는, 접종하였을 때에 첨가한 입자의 수보다 훨씬 더 많은 핵을 생성시켜야 한다. 녹아 들어가는 각 접종제 입자로부터 형성하는 핵의 수는 매우 많아야 한다.

접종제의 주된 역할은 흑연 상의 핵생성을 위한 자리를 공급하는 것이다. 이와 같은 핵생성 자리는 산화물, 황화물, 탄화물 또는 복잡한 규산염일 수도 있다. 페로실리콘기 접종제의 경우에는 녹은 페로실리콘 입자 주위에 규소의 함량이 높은 영역이 생기고 이 지역에서 탄소의 활동도가 커진다. 그리하여 국부적인 지역이 과도하게 과공정 조성이 되게한다. 즉, 탄소로 과포화가 된다. 다른 말로 하면 FeSi 입자가 녹은 바로 주위에의 액상의 온도보다 흑연의 액상선 온도를 훨씬 더 높게 한다. 결과적으로, 용탕 내 또는 입자와 용탕 사이의 계면에서 형성하는 대부분의 고체 개재물이 흑연을 형성시키는 활성이 큰 핵생성 자리가 될 것이다. 대부분의 경우에 녹은 접종제로부터 형성한 개재물은 즉시 흑연을 핵생성시키고 흑연으로 둘러싸인다고 믿는다. 녹은 CaSi와 SiC 입자 주위에서도 규소의 함량이 증가하고 흑연이 핵생성하는 비슷한 기구가 제안되었다[2]. 이와 같이 접종제가 녹은 주위에서는 규소와 칼슘의 산화물 및 칼슘의 황화물이 형성하여 흑연이 핵생성하여 성장할 수 있는 핵생성 자리를 공급한다고 가정한다.

대부분의 경우에 녹은 접종제로부터 형성한 핵은 즉시 흑연을 핵생성시키고 흑연으로 둘러싸인다. 그러나 시간이 지남에 따라서 흑연으로 둘러싸인 핵은 녹은 접종제 입자 주위의 탄소 부화 영역으로부터 이동하여 멀어지고 불안정해진다. 핵생성 자리 개재물을 둘러싸고 있는 흑연 층은 재용해될 것이고, 특히 황의 함량이 낮은 철 중에서, 개재물은 용탕 중에 자유로이 노출된다. 이 입자들은 다른 개재물과 뭉친다. 또한 이 개재물들은 온도가 낮아져서 산소와 황의 용해도가 감소함에 따라 산화물과 황화물을 생기게 하는 핵생성 자리로 작용할 것이다. 이와 같은 개재물/핵이 노출됨에 따라서, 그 수는 감소하게 되고 특성이 충분히 바뀌어서 흑연을 핵생성시키는 효과가 떨어진다. 즉, 이 개재물 위에 흑연이 핵생성하여 성장하기 전에 더 큰 과냉이 필요하다. 결과적으로, 접종효과는 점점 감쇄한다. 감쇄 현상은 접종이 끝난 후부터 시작하는 연속적인 과정이다.

열분석 곡선은 주철 용탕의 과냉의 경향을 예측하는 데 좋은 도구이다. Te을 놓은 컵, 아무 것도 넣지 않은 컵 그리고 접종한 컵(CaSiBa)의 세 가지로부터 얻은 3 가지 곡선으로부터 용탕의 특성을 결정할 수 있다(Fig. 1). 아무 것도 넣지않은 컵의 과냉 온도와 탄화물 공정 온도의 차이를 비교하면 용탕의 탄화물 공정이 일어나는 데에 얼마나 가까운 가를 알 수 있다.

본 연구에서는 고주파 유도로에서 주철 용탕을 얻은 후 일정한 온도에서 유지하면서 일정한 시간 간격으로

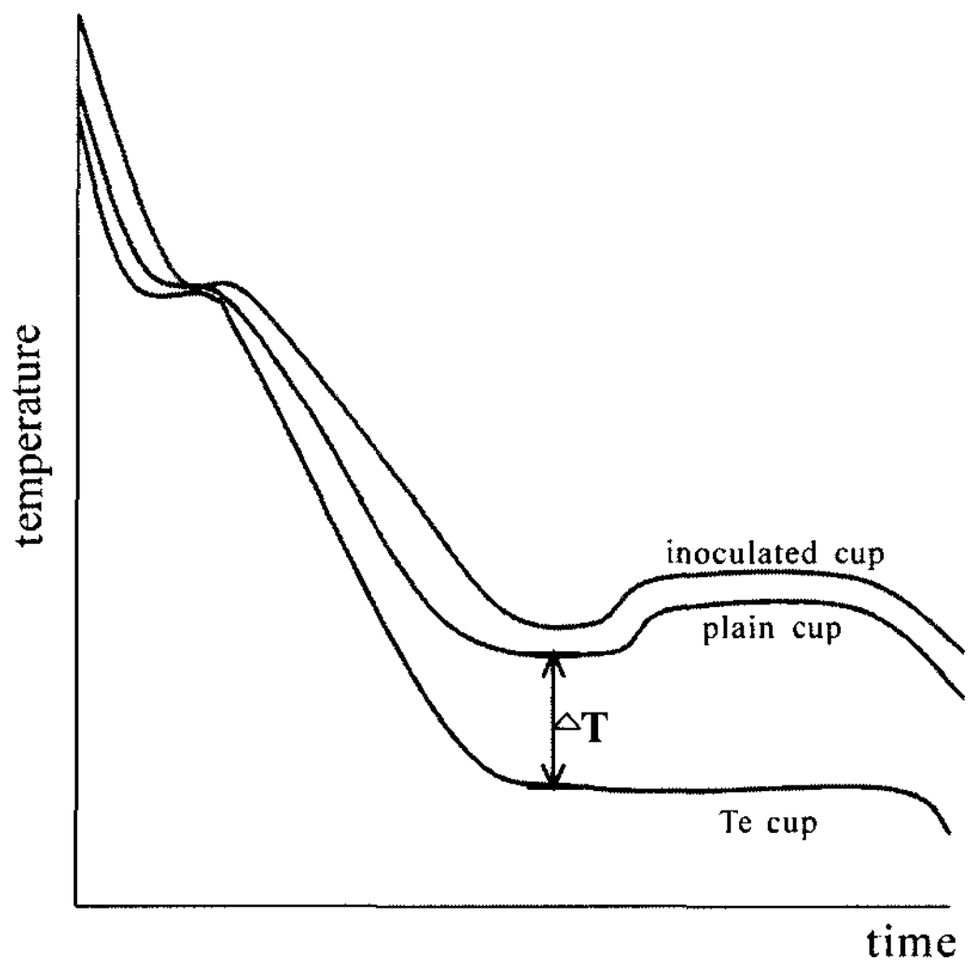


Fig. 1. 3-cup thermal analysis curves.

열분석 시험을 하여 Fe-75%Si, Fe-75%Si(접종용), 1%Ba-Fe-Si, 16%Ca-1%Ba-Si 및 16%Ca-Si의 5종류의 접종제의 접종능과 감쇄 현상을 평가하여 새로운 접종제를 개발하기 위한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 용해 및 용탕 유지 실험

먼저 기본 장입물의 조성을 일정하게 하기 위하여 3.5%C 및 2.0%Si를 목표 조성으로 주물선 및 고철을 용해하여 100 kg의 인고트를 주조하였다. 1,450~1,500°C의 온도 범위에서 용탕 유지 실험을 한 첫 번째 용해에서 사용한 인고트의 조성은 3.17%C 및 1.85%Si로 그 조성이 낮았다(Table 1). 따라서 기본 용탕의 조성 3.5%C 및 2.0%Si인 25 kg의 용탕을 얻기 위하여 17.4 kg의 인고트와 7.6 kg의 주물선을 용해한 후 규소의 함량을 0.44%증가시키기 위하여 용탕중량의 0.58%인 144 g의 75%Si 조성의 페로실리콘을 첨가하여 규소의 함량을 조절하였다. 이때 용해한 주물선과 75%Si 조성의 페로실리콘의 화학적 조성은 각각 Table 1 및 2에서 보이는 바와 같다. 또한 두 번째 용해의 경우에는 150 kg의 인고트를 주조하였으며 그 조성도 Table 1에서 보이는 바와 같이 2.80%C 인 1.83%Si로 낮았으며 이때에는 30 kg의 용탕을 얻기 위하여 15.5 kg의 인고트와 14.5 kg의 주물선을 장입하여 용해한 후 규소의 함량을 0.57% 증가시키기 위하여 용탕 중량의 0.75%인 224 g의 75%Si 조성의 페로실리콘을 첨가하여 규소의 함량을 조절하였다. 두 번째 용해에서는 장입물을 용해한 후 1,350~1,400°C의 온도 범위에서 유지하였다.

2.2. 접종 처리

장입물이 모두 용해한 후 용탕의 온도가 유지 온도에 도달하였을 때 규소의 함량 2.5%를 목표로 용탕 중량의 0.5%의 규소 함량을 증가시키기 위하여 16%Ca-Si를 제외한 네 가지 서로 다른 접종제로 노중 용탕에 첨가하였다. 16%Ca-Si 접종제의 경우에는 용탕 중량의 0.2%를 첨가하였으며 부족한 규소의 함량은 Fe-75%Si로 조절하였다. 처음에 용탕을 레이들에 출탕을 하면서 스트림 접종을 하고자 하였으나 용탕의 양이 충분하지 않아서 온도강하가 심하였으며 충분히 녹아 들어가지 않아서 노중 용탕에 접종제를 첨가하는 방법으로 접종처리를 하였다.

시험한 다섯 종류의 접종제의 화학적 조성은 Table 2에서 보이는 바와 같다. 규소의 함량은 0.5% 증가시키기 위하여 Fe-75%Si, Fe-75%Si(접종용) 및 1%Ba-Fe-Si 접종제는 각각 용탕 중량의 0.62%를 그리고 16%Ca-1%Ba-Si 접종제는 용탕 중량의 0.76%를 첨가하였다. 그리고 16%Ca-Si 접종제의 경우에는 Ca의 함량이 매우 높기 때문에 Ca의 목표 조성을 0.06%로 하여 첨가량을 결정하였으며 0.2%를 첨가하였다. 이때 규소의 함량을 0.82%를 증가시키기 위하여 75%Si 조성의 페로실리콘으로 조절하였다.

2.3. 열분석 시험

탄소 당량 측정 장치의 탄소 당량 측정용 쉘 컵 받

Table 1. Chemical composition of charge material.

material	C	Si	Mn	S	P	remark
pig iron	4.25	1.00	0.090	0.025	0.060	
ingot I	3.17	1.85	0.072	0.012	0.037	Heat 1
ingot II	2..80	1.83	0.120	0.010	0.020	Heat 2

Table 2. Chemical composition of inoculant tested. (wt%)

inoculant	Si	Ca	Al	Ba	Fe	remark
Fe-75%Si	76.37	—	1.73	—	bal.	
Fe-75%Si(I)*	74~79	1.0max.	1.0max.	—	bal.	
1%Ba-Fe-Si	74~79	0.8~1.3	0.8~1.2	0.8~1.3	bal.	
16%Ca-Si	60~65	14~18	1.0max.	—	bal.	
16%Ca-1%Ba-Si	60~65	14~18	1.0max.	14~18	bal.	

* for inoculation

침대 3개를 K-형태의 열전대로 온도 기록용 소프트웨어가 내장된 컴퓨터에 연결하여 구성한 열분석 장치를 이용하여 열분석 시험을 하였다. 오스테나이트-탄화물 공정이 일어날 때의 냉각 곡선으로부터 탄화물 공정 온도를 측정하기 위하여 Te을 넣은 컵, 실제 시험하고 있는 용탕의 접종능과 감쇄현상을 평가하기 위한 아무것도 넣지 않은 컵, 그리고 충분히 접종된 상태에서 오스테나이트-흑연 공정 온도를 측정하기 위하여 미세한 16%Ca-1%Ba-Si 분말을 넣은 컵의 3 종류의 컵을 사용하였다.

장입물을 용해한 후 기본 용탕의 열분석 장치와 탄소 당량 측정기를 이용하여 열분석 시험과 탄소 당량을 측정한 후 접종 처리를 하였다. 접종제를 노중 용탕에 첨가하여 모두 용해된 후 다시 열분석 시험과 탄소 당량 측정을 하였으며 용탕 유지 온도에서 40분까지 각각 유지하면서 5분 간격으로 열분석 시험과 탄소 당량 측정을 하여 감쇠 현상을 평가하였다. 이때 액상선 온도, 오스테나이트-흑연 공정 온도, 오스테나이트-탄화물 공정 온도, 시험 용탕의 공정 반응 과냉 온도 및 재휘온도(recolescence temperature)를 측정하였으며 이 공정 반응 과냉 온도와 오스테나이트-탄화물 공정 온도의 차이(ΔT)를 계산하였다. 용해 및 용탕 유지 실험의 전체 과정을 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 실험 과정의 재현성 확인과 의미 있는 평균값을 얻기 위하여 동일한 접종제를 1,450~1,500°C의 고온에서 용탕을 유지한 첫 번째 용해의 경우에는 2 차례 1,350~1,400°C의 저온에서 용탕을 유지한 두 번째 용해의 경우에는 3 차례 반복하여 실험하였다.

2.4. 화학 성분 분석, 칠 및 거시조직 시험

기본 용탕, 접종 후 그리고 정온 유지시 용탕의 화학 조성의 변화를 조사하기 위하여 열분석 시험 탄소 당량을 측정하기 위하여 용탕을 레이들에 출탕하여 네 개의 컵에 주입한 후 바로 화학적 분석 시험용 시편을 얻기 위한 금형과 칠 시편을 얻기 위한 ASTM 방법 B의 2C 형태의 칠 시편용 쉘 주형에 주입하였다. 화학 성분 분석용 시편은 Shimadzu사의 방출 스펙트럼 분석 장치(PDA-5500 II Model)로 분석하였으며 칠 시편은 파괴하여 파면으로부터 clear칠과 전체 칠 깊이를 측정하였다.

열분석 실험 결과와 실제 용탕의 접종 결과와 감쇄 현상을 비교하기 위하여 응고후 시험 용탕을 주입한 컵으로부터 얻은 시편을 열전대 끝 부분인 바닥에서 32 mm 위치에서 절단하여 광학현미경 조직 시험용 시편을 얻어서 마운팅하였다. 전통적인 방법으로 조연마 및 세연마를 한 후 공정 셀 조직을 관찰하고 수를 측

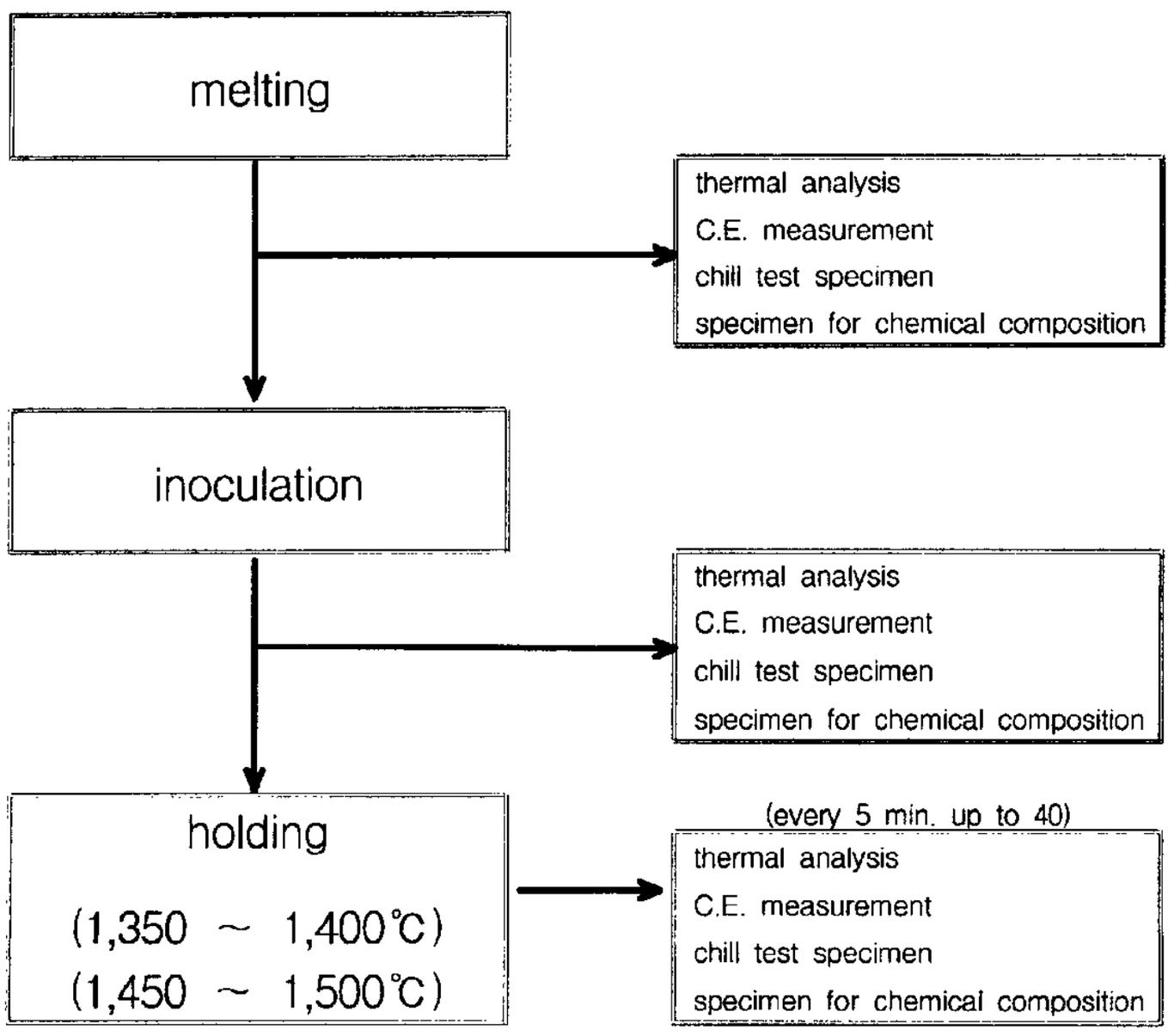


Fig. 2. Experimental procedure.

정하기 위하여 Stead의 부식액으로 부식시켰으며 10배에서 광학 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 용탕의 유지 온도

용탕 중 규소와 탄소는 다음의 반응에 의하여 평형을 이룬다. 고온에서는 용탕중

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO \quad (1)$$

탄소가 산화되어 일산화탄소가 발생하면서 산화규소가 환원이 되거나 용탕 중 규소는 보호가 되며 저온에서는 규소 및 다른 금속 원소의 산화가 일어난다[7]. 이와 같은 현상의 반전이 일어나는 온도의 범위는 용탕의 화학적 조성에 따라서 다르며 이 온도는 약 1,390~1,440°C의 범위인 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 첫 번째 용해에서는 장입물이 용해된후 용탕 중 탄소가 산화되고 규소가 보호되는 온도인 1,450~1,500°C에서 유지시키면서 접종제의 접종능 및 감쇄 현상을 시험하였다. 두 번째 용해에서는 규소가 산화되는 온도인 1,350~1,400°C의 온도 범위에서 유지시켰다.

3.2. 화학 조성

기본 용탕의 화학적 조성은 3.5%C 및 2.0%Si을 목표로 하였으며 목표 탄소 당량은 4.17%였다. 화학적 성분 분석 결과는 탄소 함량이 목표 조성보다 약간 낮은 경우가 많았으나 3.38~3.54%의 범위로 나타났으며 규소 함량은 칼슘의 함량으로 인하여 접종제의 양을 용탕 중량의 0.2%를 첨가한 16%Ca-Si 접종제의 경우에는 2.14 및 2.20%로 나타났으나 다른 접종제를 사용한 경우에는 1.98~2.02%의 범위로 대체로 목표 조성의 범위에서 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

첫 번째 용해의 경우에는 탄소가 산화되는 높은 온도 범위인 1,450~1,500°C의 온도 범위에서 용탕을 유지하였으므로 용탕 유지시간에 따라 탄소 함량은 감소할 것으로 예측되었다. 그 결과는 한 예로 75%Si 조성의 페로실리콘으로 접종하여 시험한 첫 번째 용해의 첫 번째 용탕의 경우의 화학 성분 분석 결과는 Table 3에서 보이는 바와 같으며 각 접종제별로 평균값의 변화는 Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같다. 예측된 바와 같이 이 경우에는 용탕 유지 시간에 따라 탄소 함량은 감소하였다.

규소의 경우에는 접종후 목표 조성이 2.5%였으며 첫 번째 용해의 경우 16%Ca-Si를 접종한 경우에는 2.13 및 2.30%로 나타났으며 그 이외의 경우에는 2.35~2.50%로 나타났다. 접종제의 접종능 평가와 용탕 유지에 따른 접종능 감쇄 경향을 비교하는데 적당한 결과로 나타났다. 그리고 접종 후 용탕 유지 시간에 따라 한 예로 첫 번째 용해의 첫 번째 용탕의 경우에 Table 1에서 그리고 사용한 접종제별로 규소의 평균 함량의 변화는 Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같다. 16%Ca-Si를 접종한 경우에는 규소의 함량은 2.15~2.20%의 범위에서 약간 감소하였으나 거의 일정하다고 봐도 무방할 것이다. 다른 접종제를 사용한 경우에는 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

탄소 당량의 경우에는 4.3%를 목표로 접종처리를 하였으나, 3.80~4.21%의 범위로 약간 낮게 나타났으며 용탕이 고온에서 유지됨에 따라 점차 감소하였다. 이것은 탄소 당량에 차지하는 탄소 함량이 규소의 함량

Table 3. Chemical composition of melt inoculated with Fe-75%Si. and held at 1,450~1,500°C (wt%)

time(min.)	C	Si	Mn	P	S	C.E	remark
base	3.47	1.99	0.13	0.048	0.023	4.13	
0	3.35	2.46	0.13	0.048	0.023	4.17	
5	3.30	2.47	0.13	0.048	0.021	4.12	
10	3.28	2.40	0.13	0.048	0.022	4.03	
15	3.24	2.40	0.13	0.047	0.022	4.04	
20	3.20	2.48	0.13	0.048	0.022	4.03	
25	3.20	2.36	0.12	0.046	0.023	3.99	
30	3.12	2.45	0.13	0.047	0.021	3.94	
35	3.10	2.47	0.13	0.048	0.021	3.92	
40	3.08	2.44	0.13	0.049	0.021	3.89	

보다 크기 때문에 탄소 함량이 감소하므로 예측할 수 있는 결과이다.

3.3. 열분석 시험

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 열분석 시험으로부터 3가지의 냉각 곡선을 얻을 수 있다. 이중 특히 접종제의 접종능과 감쇠 거동은 시험 용탕으로부터 얻은 냉각 곡선으로부터 얻은 공정 반응의 과냉 온도와 오스테나이트-탄화물 공정 온도의 차이를 측정하여 비교함으로써 평가할 수 있다. 접종 효과가 좋을수록 응고 도중 공정 반응이 일어나기 시작하는 과냉 온도가 높을 것이므로 이 두 가지 온도의 차이가 클수록 접종능이 좋을 것이며 이 온도의 차이가 용탕 유지 시간에 따라 크게 감소하지 않을수록 감쇠가 잘 일어나지 않는다는 것을 나타낼 것이다.

1%Ba-Fe-Si로 접종하여 1,450~1,500 및 1,350~1,400°C의 온도 범위에서 유지한 경우의 시험 용탕의 공정 과냉 온도와 γ-탄화물 공정 온도의 변화를 각각 Fig. 4(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다. 1,450~1,500°C의 높은 온도 범위에서 용탕을 유지한 경우에도 규소와 다른 금속의 불순물 원소가 보호되고 탄소가 산화가 될 것이므로 실험결과가 재현성이 있는 것으로 나

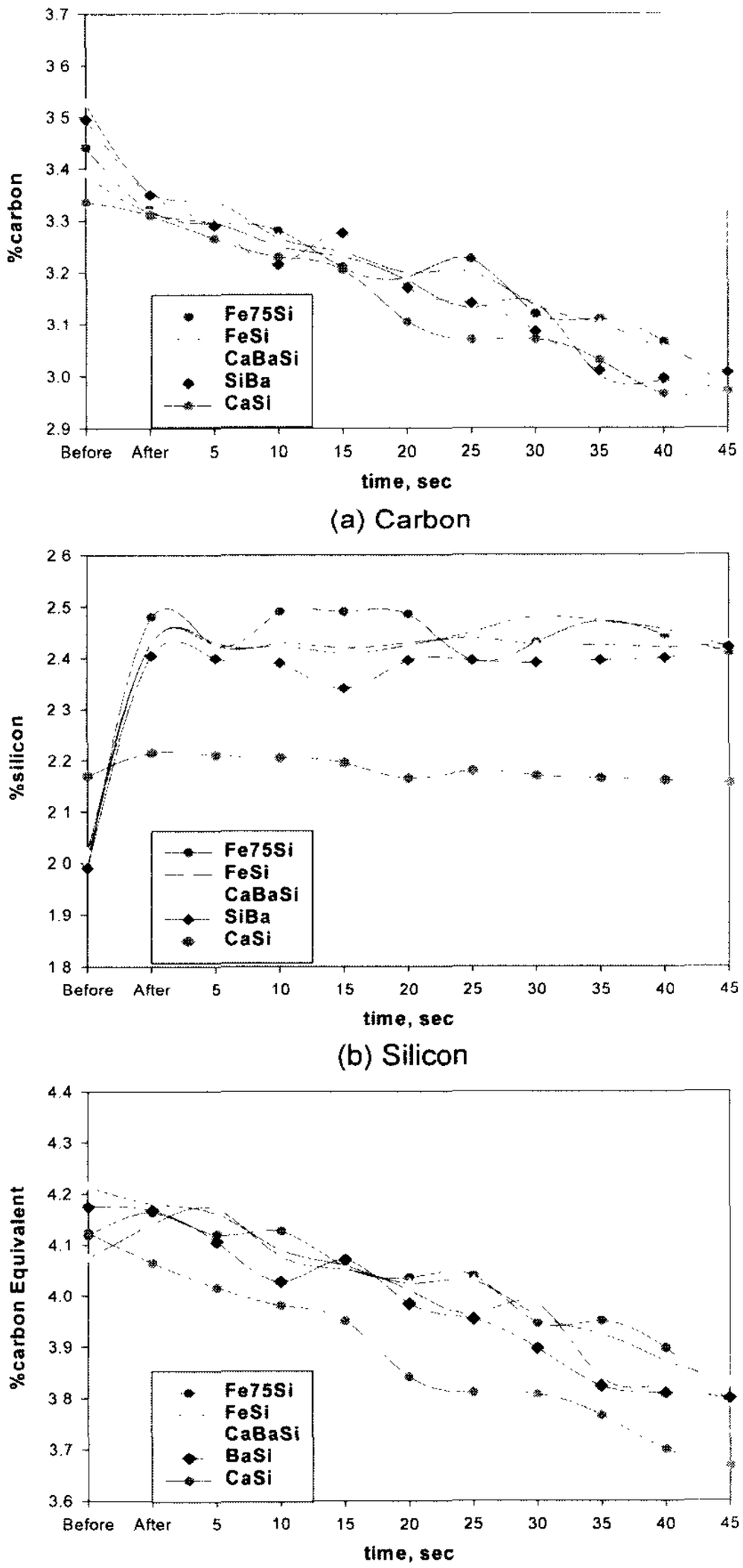


Fig. 3. Variations of the contents of carbon and silicon and resultant carbon equivalent with time during holding at 1,450~1,500°C.

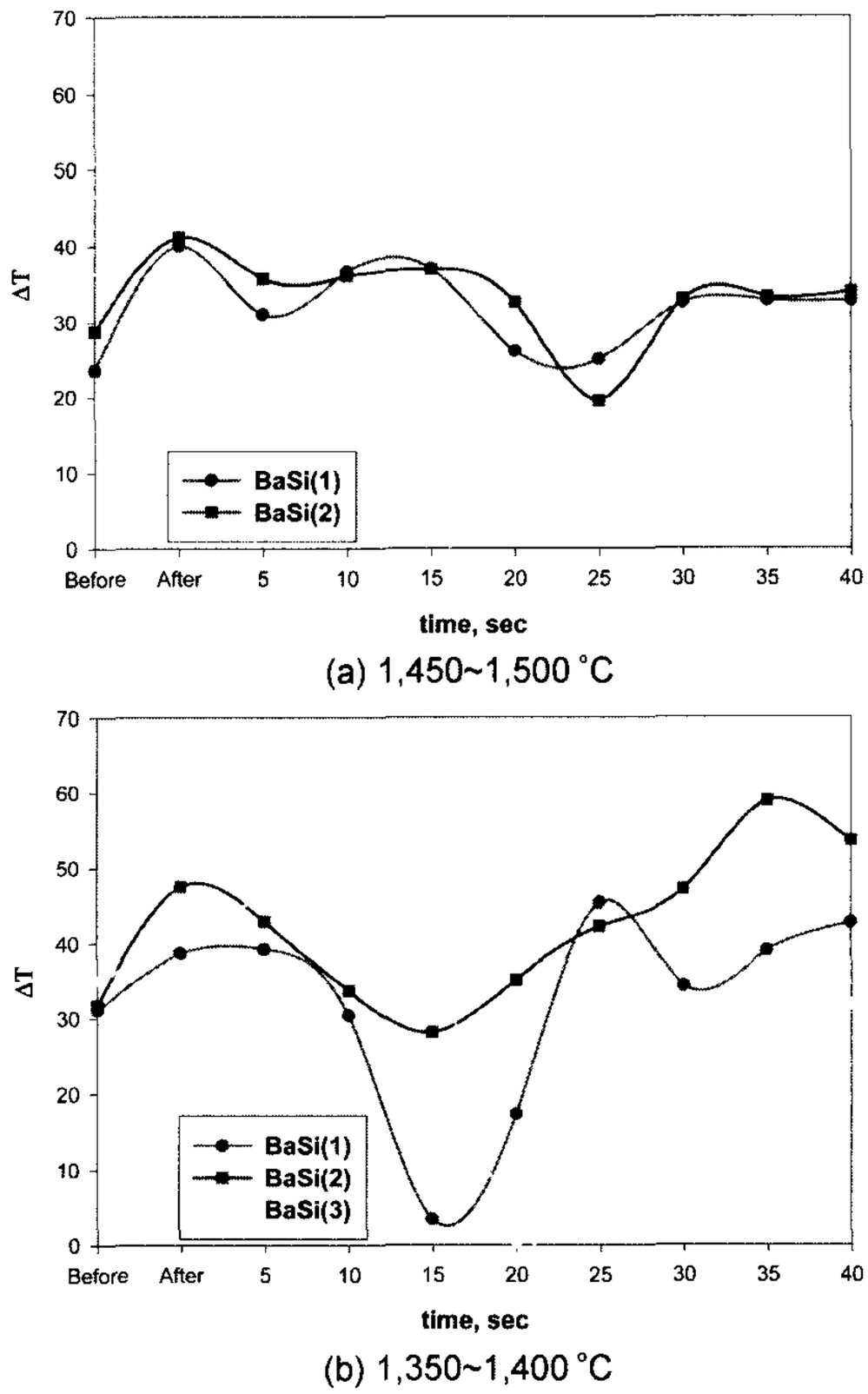
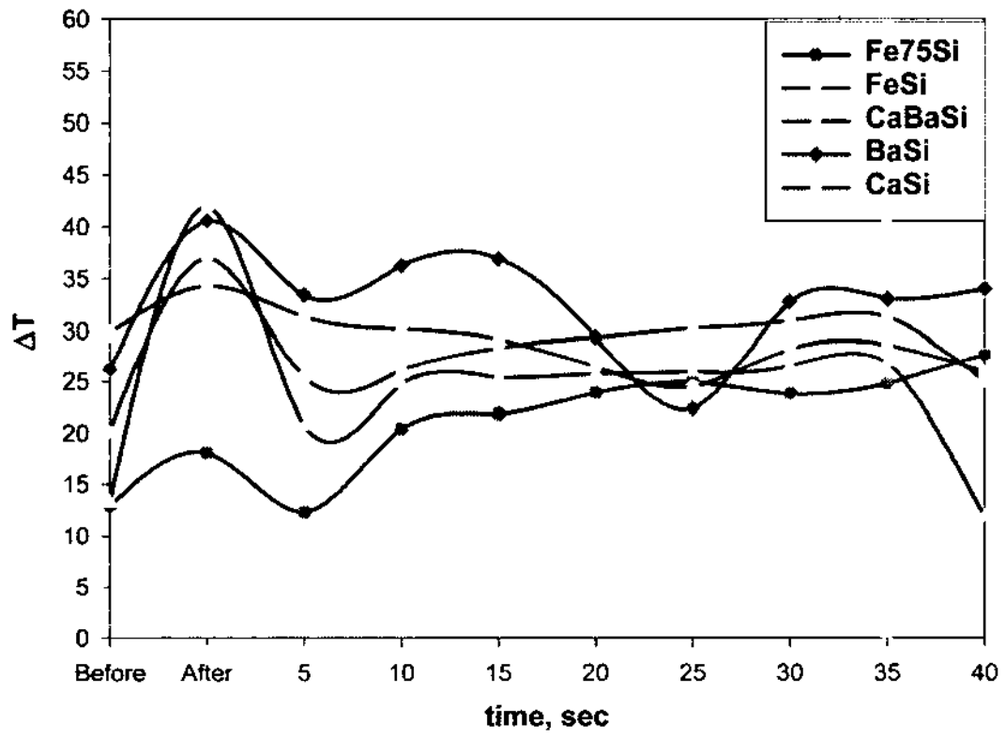


Fig. 4. Variation of difference between undercooling temperature of eutectic and γ-carbide eutectic temperature with holding temperature ranges inoculation with 1%Ba-Fe-Si.

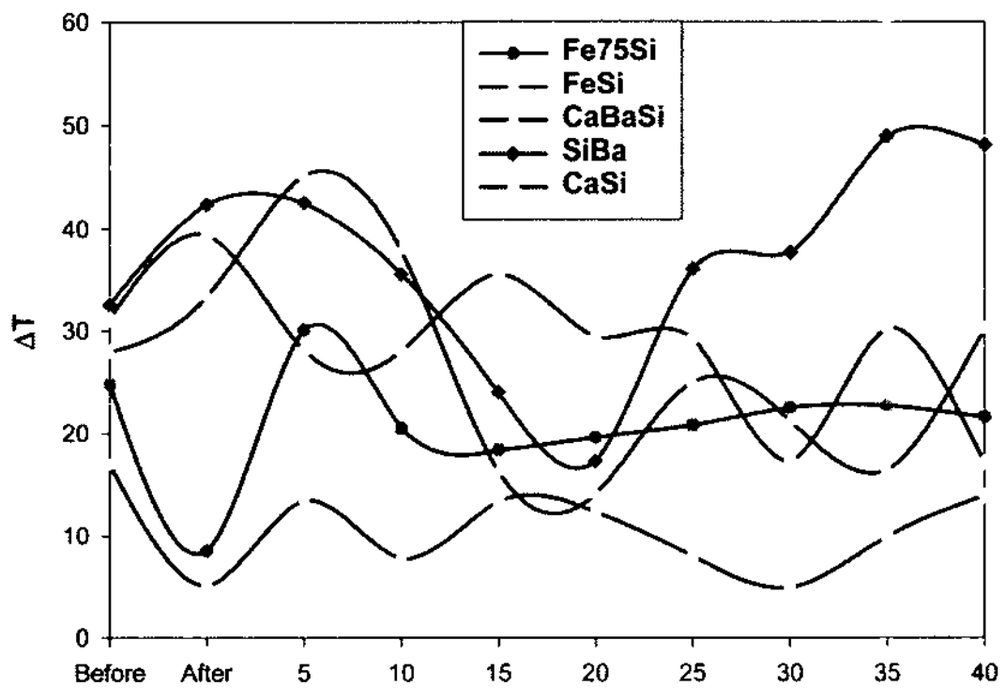
타났으나 1,350~1,400°C의 낮은 온도 범위에서는 자료가 넓게 분산이 되어있으며 재현성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 낮은 온도 범위에서는 규소를 포함하는 다른 불순물 원소가 산화하여 접종처리도 일관성이 없고 떨어지는 것으로 생각한다. 그리고 다섯 가지의 접종제를 첨가한 후 서로 다른 온도 범위에서 유지 시간에 따른 공정 과냉 온도와 탄화물 공정온도의 차이의 평균 값의 변화는 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 1,450~1,500°C의 높은 온도 범위에서 유지한 경우에는 이 값이 접종 후 크게 증가하였다가 약간 감소하거나 감소하여 오히려 증가하는 경향을 보였다. 그러나 1,350~1,400°C의 낮은 온도 범위에서 유지한 경우에는 이 값이 일관성이 없으며 넓은 범위에서 크게 변화하는 것으로 나타났다. 이 자료로부터 뚜렷한 결론을 얻기 어려우나 초기 접종능도 우수하고 다른 접종제에 비하여 감쇄도 크게 일어나지 않는 16%Ca-1%Ba-Si 접종제의 경우가 가장 우수한 것으로 생각되었다. 접종능과 감쇄 거동의 차이를 비교하기 위하여 모든 자료 점의 평균값을 접종제별로 표시하고 직선으로 나타내었다. 그 결과는 Fig. 6에서 보이는 바와 같다. 접종능이 좋고 높은 온도 범위에서는 약간 감쇠하나 낮은 온도에서는 오히려 접종 효과가 감쇠하지 않는 16%Ca-1%Ba-Si 접종제의 경우가 가장 좋은 것으로 나타났다. 그리고 접종시 일관성이 있고 좋은 접종 효과를 얻으려면 규소가 보호되는 고온에서 접종을 하여야 할 것으로 생각한다.

3.4. 칠 및 거시조직 시험

칠 시편을 파괴하여 칠 깊이를 측정하여 열분석 시험 결과와 비교하고자 하였으나 실험자료가 변화가 심

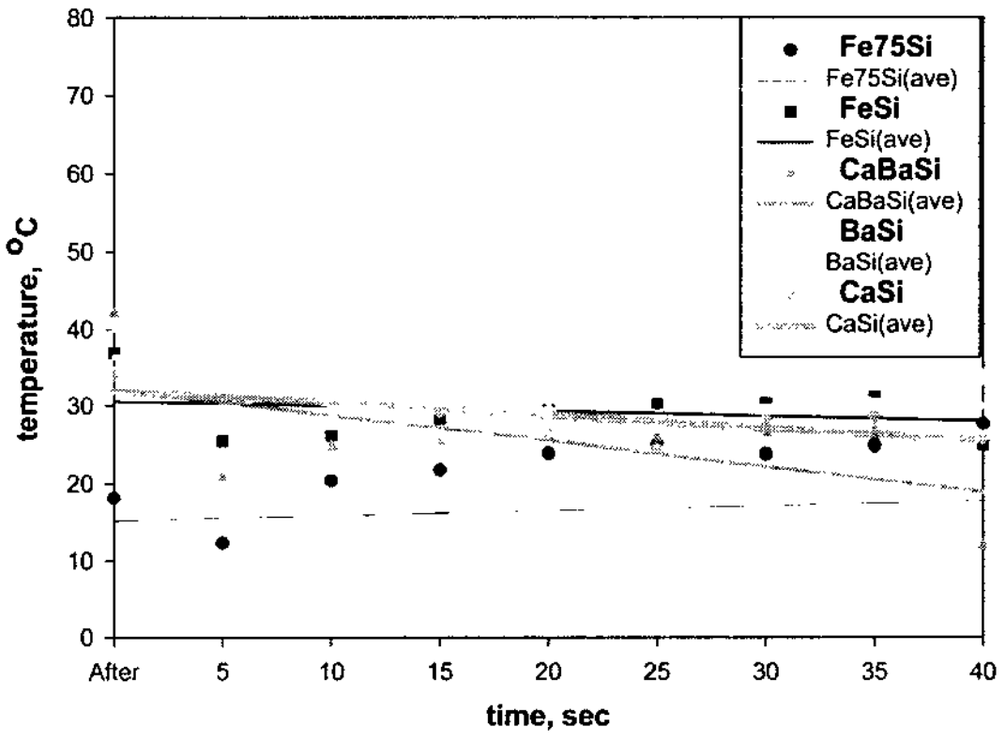


(a) 1,450~1,500 °C

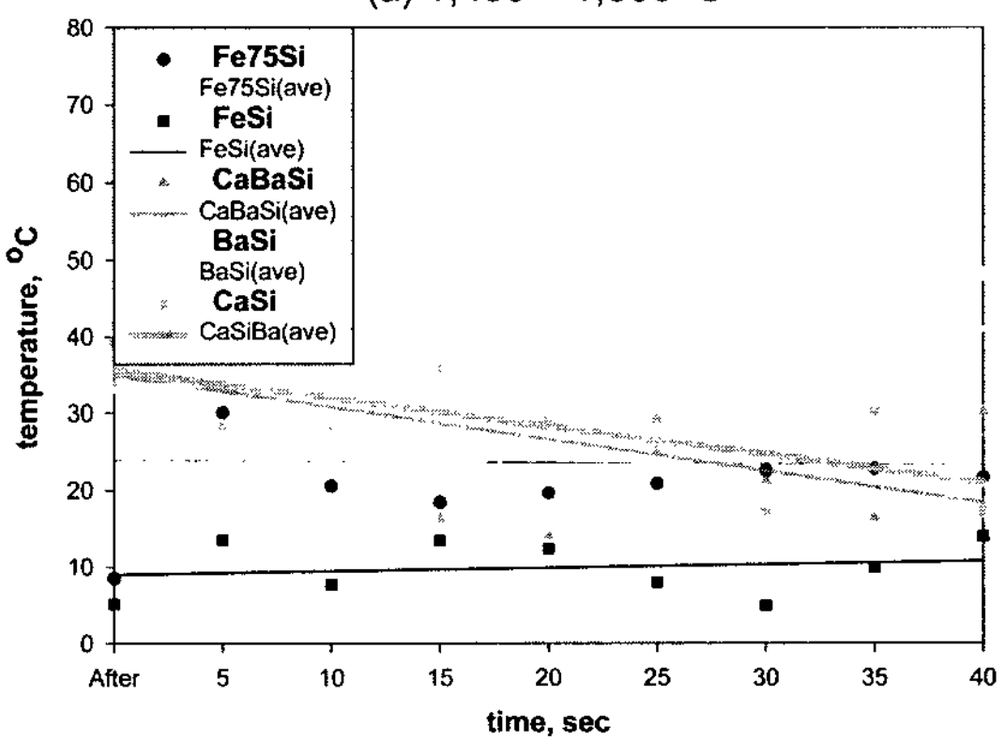


(b) 1,350~1,400 °C

Fig. 5. Variations of average differences between undercooling and carbide eutectic temperatures with holding time at different temp. after inoculation.



(a) 1,450 ~ 1,500 °C



(b) 1,350 ~ 1,400 °C

Fig. 6. Linear fitting of data points of the temperature difference between undercooling and carbide eutectic temperature with holding at different temp. ranges after inoculation.

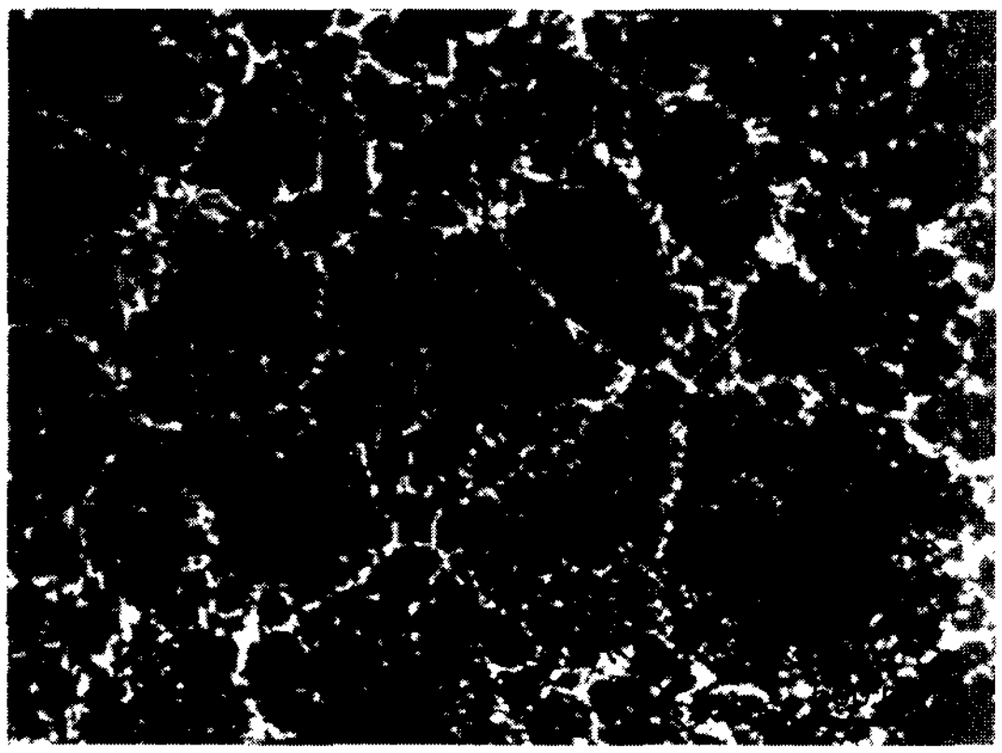


Fig. 7. Eutectic cell structure of the specimen obtained from the melt inoculated with Fe-75%Si and hold for 15 min.

하고 비교하기가 어려웠다. 그리고 실험과정에서 얻은 광학현미경 조직 시편의 공정 셀 조직을 한 예로 Fe-75%Si 접종제로 접종한 후 1,450~1,500°C의 온도 범위에서 15분 유지된 시편의 거시조직은 Fig. 7에서 보이는 바와 같으며 단위 면적당 공정 셀의 수를 측정하여 비교하였다. 정성적으로는 열분석 결과와 일치하는 것으로 나타났으며 열분석 실험이 접종제로 평가하기 위하여 가장 신뢰성이 있는 방법이라고 판단되었다.

4. 결 론

다섯 가지의 접종제의 성능을 평가하기 위하여 용탕을 얻어 접종 처리를 한후 일정한 온도 범위에서 유지하면서 열분석 시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 1,450~1,500°C의 높은 온도 범위에서는 접종 처리 및 유지한 경우 유지 시간에 따라 탄소 함량은 감소하였으나 규소의 함량은 거의 일정하게 유지되었다.

2) 1,450~1,500°C의 높은 온도 범위에서 접종 처리하고 유지한 경우가 1,350~1,400°C의 낮은 온도 범위에서의 경우보다 접종 효과가 더 좋았으며 재현성도 더 좋았다.

3) 1%Ba-Fe-Si 접종제가 다섯 가지 접종제중에서 가장 접종 효과가 우수하고 감쇄 속도가 느린 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2002 학년도 영남대학교 학술 연구 조성비(자유 공모 과제) 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

[1] C. R. Loper, Jr., J. of KFS, "Nucleation of Graphite in Cast Irons"17(4), 1997, 327-337.

[2] C. R. Loper, Jr., Foundry, "Inoculation of Cast Iron", Sept. 1996, 42-48.

[3] J. F. Wallace, Trans. AFS, "Effects of Minor Elements on the Structure of Cast Irons", 83, 1975, 363-377.

[4] J. F. Wallace and R. D. Maier, Proc. of AFS-CMI Conf., "How Inoculation Works", Feb. 1979, 41-75.

[5] T. Skaland et. al., Met. Trans., "A Model for the Graphite Formation in Ductile Cast Iron, Part I, Inoculation Mechanisms", 24, 1993, 2321-2333.

[6] T. Mizoguchi, J. H. Perepezko and C. R. Loper, Jr., Trans. AFS, "Nucleation during the Solidification of cast Irons", 95, 1997.

[7] D. R. Askeland, P. K. Trojan and R. A. Flinn, Trans. AFS, "Investigation of Mechanism of Dross Formation in Ductile Iron", 77, 1969, 125-132.