 논문

박육주철의 공정 셀 수와 칠 깊이에 미치는 두께, 기본 원소 및 집중제 첨가 원소의 영향

김태형 · 이우중* · 권해욱**†

한국생산기술연구원 주조공정연구그룹, *영남대학교 대학원 신소재공학과, **영남대학교 신소재공학부

Effects of Thickness, Base Element and Additive to Inoculant on the Number of Eutectic Cells and Chill Depth of Thin-Section Gray Cast Iron

Tae-Hyeong Kim, Woo-Jong Lee* and Hae-Wook Kwon**†

Liquid Processing & Casting Technology R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

*Dept. of Mat. Sci. & Eng., Graduate School, Yeungnam Univ., Gyeongbuk 712-749, Korea

**School of Mat. Sci & Eng., Yeungnam univ., Gyeongbuk 712-749, Korea

Abstract

The effects of thickness, base element and additive to inoculant on the number of eutectic cells and chill depth of thin-section gray cast iron were investigated. Meanwhile the number of eutectic cells increased by inoculation, chill depth decreased. The former decreased and the latter increased by holding the melt at the temperature range between 1,450 and 1,500°C. The former was more for the thinner casting with the thickness of 5 mm than the other. The result of thermal analysis coincided well with the change of macrostructure. The former increased and the latter decreased with the increased contents of carbon, silicon and the silicon content by inoculation. The former decreased and the latter increased with increased manganese content. The number of eutectic cells decreased as the amounts of rare earth and the bismuth added to this inoculant increased. With the addition of sulfur of 0.10 wt% of the weight of this inoculant, the maximum number of eutectic cells was obtained.

Key words : Cast iron, Gray cast iron, Inoculation, Melt treatment, Eutectic solidification.

1. 서 론

세계적으로 강화되고 있는 환경 규제에 대응하여 국제 수송 기계류 시장에서는 친환경 경량 고연비화가 중요한 화두이다. 이를 위해서는 고강도·박육화 기술을 통하여 각종 산업기계부품들은 경량화 및 연비 향상 극대화가 이루어져야 하며 특히 고강도·박육 엔진 부품 제조를 위한 주조 기술 확보가 매우 중요하다.

판재 주조품을 박육화하는 경우 높은 강도, 건전성, 양호한 가공성, 치수 안정성 및 균일한 성질이 요구되며, 이러한 특성을 얻기 위해서는 주조품의 모든 부분에서 적절하고 균일한

조직이 형성되어야 한다. 이러한 건전한 조직을 얻어내기 위한 방법으로 합금원소를 첨가하는 방법이 있다. 합금원소를 첨가하여 오스테나이트 분해를 조절하여 미세한 펄라이트를 얻을 수 있다. 그러나 어떤 원소들은 이러한 기능을 강력하게 나타내는 한편 응고과정에 나쁜 영향을 미쳐 칠 또는 탄화물을 생성시키기도 한다[1]. 탄화물이 형성될 경우 취성이 증가하고 기계가 공성이 떨어지는 등 여러 가지 문제가 발생한다. 이러한 칠 또는 탄화물의 생성을 방지하려면 오스테나이트-흑연 공정 반응이 일어나야 한다. 즉, 흑연 핵생성을 용이하게 하여 흑연 공정 반응이 확실하게 일어나게 하여야 한다. 주철 용탕을 주형에 주입하기 전에 흑연 또는 페로실리콘을 첨가하면 주철의 응고

Received: October 22, 2012 ; Accepted: November 5, 2012

†Corresponding author: Hae-Wook Kwon

Tel: +82-53-810-2477, Fax: +82-53-810-4628

E-mail: hwwkwon@ynu.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society

2012. Vol. 32 No. 6, pp. 261~268

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2012.32.6.261>

ISSN 1598-706X

© The Korea Foundry Society. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

조직에 나쁜 영향을 미치는 여러 가지 인자를 완화시켜 조직의 일관성과 품질의 신뢰성이 높은 주철 재료를 제조할 수 있는데 이러한 흑연 공정을 위한 핵생성 자리의 수를 증가시키기 위하여 용탕을 처리하는 과정을 집중 또는 후집중이라 한다. 주철 용탕을 집중 처리하면 ASTM A 형태의 흑연 조직이 형성하여 공정 셀 수가 증가하고 칠 깊이가 감소하여 건전한 조직이 형성한다[2-7].

집중 처리를 한 주철 용탕을 주입하면 칠 발생이 방지되고 공정 셀 수가 증가하고 공정 셀 크기는 감소하지만 그 효과는 집중 직후에 가장 크고 시간이 경과됨에 따라 그 효과가 소실되는 현상이 일어나는데 이러한 현상을 페이딩(fading)이라 한다. 집중 효과가 떨어지게 되면 흑연이 핵 생성하여 성장하는데에는 좀 더 많은 과냉이 필요하게 된다[8]. 페이딩은 집중 현상이 끝난 후 시작하는 연속적인 과정이다. 이와 같은 페이딩 현상을 잘 제어하는 것이 현장 생산시 주입 시간에 따른 응고 조직의 변화를 감소시켜 비교적 균일하고 건전한 조직을 얻는데 중요하다[9].

주철의 응고 과정에서 냉각속도가 느릴 경우에는 안정한 상태의 오스테나이트-흑연 공정 반응에 의하여 흑연이 형성되나 판형 주조품의 경우와 같이 부피에 대한 표면적 비가 커서 냉각 속도가 비교적 빠를 경우에는 오스테나이트-Fe₃C 공정 반응에 의하여 준안정 평형상인 탄화물이 형성될 가능성이 높다[9,10]. 주철의 두께가 얇아질수록 냉각 속도는 빨라져서 흑연은 미세화되며 나아가 흑연은 정출되지 않게 되고 칠이 발생할 가능성이 크며 기지는 일반적으로는 펄라이트화되지만 흑연이 미세화되면 오히려 페라이트화되는 경향이 있다[1]. 가능한 높은 온도에서 공정 반응이 일어나게 하여 A 형태의 흑연 형성을 촉진하고 탄화물 형성을 최소화하여야 한다[11].

본 연구에서는 박육주철을 주조하기 위한 기초적인 데이터를 얻기 위해 3, 5 및 10 mm 두께의 판형 회주철 시편을 주조할 때 공정 셀 수와 칠 깊이에 미치는 탄소, 규소 및 망간 등 기본 원소의 영향을 연구하고 집중제와 함께 회토류 원소, 비스무스 및 황을 첨가하여 미량 합금 원소의 영향을 연구하였으며 3-겹 열분석 및 칠 시험을 통하여 이들 결과의 원인을 분석하였다. 그리고 주입 후 시험 용탕을 5분간 유지하여 페이딩 거동을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 판재 시험 주조품 및 칠 시험용 사형 조형

가로(또는 폭) 및 세로(또는 높이)가 각각 120 및 90 mm이며 두께가 3, 5 및 10 mm인 판재 주조 시편을 얻기 위한 목형과 주형 상자를 설계하여 주문·제작하였으며 목형의 모양과 크기는 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 박판형의 주형 공간을 용탕으로 확실하게 충전시켜 시편을 얻기 위하여 수직으로 주조할 수 있게 하였다. 주형의 위쪽에 가로 및 세로가 각각 120 및 80 mm이며 높이가 45 mm인 압탕 겸 주입구를 단면

Fig. 1. Step test casting.

Fig. 2. Chill test specimen.

의 가로 및 세로가 각각 20 mm인 목부분을 통하여 판재 시험 주조품 주형 공간과 연결시켰다. 그리고 수직 주형의 위로부터 3, 5 및 10 mm 두께의 판재 시편을 얻을 수 있도록 배열하였다.

목형과 주형 상자를 조립한 후 사형은 펌프형으로 조형하였다. 20 kg의 규사를 화학 점결 주물사 혼련기에 장입한 후 주물사 중량의 각각 1%의 점결제를 첨가하고 20초 동안 혼련하였다. 경화제와 경화 촉진제를 첨가하고 다시 20초 동안 혼련한 후 배출시켰다. 목형과 주형 상자의 조립체에 주물사를 충전시켜 조형하였다. 좌형과 우형을 각각 조형하였으며 주형이 경화된 후 방출시켜 합형하였다. 용탕을 주입하였을 때 압력에 의한 주형 분리력에 기인하여 나타나는 두께 변화를 최소화하기 위하여 볼트, 너트와 클램프를 이용하여 고정하였다.

용탕의 칠 시험을 위하여 ASTM A367 규격의 칠 시편을 주조하기 위한 사형 조형용 금형을 주문·제작하였으며 칠 시편의 모양과 크기는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 펌프형으로 조형하였으며 조형된 사형을 20 mm 두께의 동판 위에 놓아 용탕 주입시 급랭되도록 하였다.

2.2 열분석 시험

탄소 당량 측정 장치의 탄소 당량 측정용 셀 컵 받침대 3개를 K-형태의 열전대를 사용하여 온도를 기록하기 위한 소프트웨어가 내장된 컴퓨터에 연결하여 구상한 열분석 장치를 이용하여 열분석하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 오스테나이트-탄화물 공정 반응이 일어날 때의 냉각 곡선으로부터 탄화물 공정 온도를 측정하기 위하여 Te를 넣은 셀 컵, 실제 시험하고자 하는 용탕의 과냉 온도와 공정 온도를 측정하기 위하여 아무것도 넣지 않은 셀 컵 그리고 충분히 집중된 상태에서 오스테나이트-흑연 공정 온도를 측정하기 위하여 미세한 1.00 wt%Ba-Fe-Si 분말을 넣은 셀 컵의 세 종류의 셀 컵을

Fig. 3. Thermal analysis apparatus.

사용하였다. 오스테나이트-흑연 공정 온도, 오스테나이트-탄화물 공정 온도, 시험 용탕의 과냉 및 재취 온도(recalescence temperature)를 측정하였으며 시험 용탕의 과냉 온도(T_U)와 오스테나이트-탄화물 공정 온도(T_{CE})의 차이($\Delta T = T_U - T_{CE}$)를 계산하였다. 모든 경우에 3회 시험하여 재현성을 확인하고 평균값을 얻었다.

2.3 용해, 접종 처리 및 용탕 유지 실험

75 kW 용량의 고주파 유도 용해로를 이용하여 용해하였다. 용해, 접종 처리 및 용탕 유지의 전 과정은 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. 탄소 함량의 영향 시험을 제외한 모든 경우에 탄소의 목표 함량을 3.40 wt%로 하여 22.2 kg의 주물용 선철과 2.8 kg의 강 고철을 장입하여 25 kg의 용탕을 얻었다. 탄소 함량의 영향 시험을 하는 경우에도 비율에 맞추어 25 kg의 용탕을 얻었다. 2.30 wt%의 최종 시험 주조품의 규소 함량을 얻

Fig. 4. Experimental procedure.

기 위하여 기본 용탕의 목표 규소 함량을 1.80 wt%로 하여 규소 함량이 약 75%인 페로실리콘을 노중 용탕에 첨가하였다. 규소 함량과 접종에 의한 규소 첨가량의 변화의 영향을 시험한 경우에는 각각 노중 첨가량을 변화시켰다. R-형태의 열전대를 부착시킨 침적식 온도계를 이용하여 용탕 온도를 측정하였다. 용탕 중 규소와 탄소의 평형 반응은 다음과 같으며 이 반응의 역전 온도 범위는 1,390~1,440°C로 알려져 있다[12].

따라서, 접종 처리, 주입 및 용탕의 유지 온도를 1,450~1,500°C 범위로 일정하게 하였다. 용탕의 온도가 이 범위에서 도달하였을 때 소형 레이저를 이용하여 열분석용 셀 컵, 칠 시험용 주형 및 화학 분석용 시편 금형에 용탕을 주입하고 주입용 레이저에 출탕하여 계단형 시험 주조품 주형에 주입하였다. 그리고 접종에 의한 규소 첨가량의 영향 시험을 제외한 모든 경우에 직경이 약 1.0~3.0 mm 크기의 입자형 1.00 wt%Ba-Fe-Si 접종제를 사용하였다. 접종제가 모두 용해한 후 열분석용 셀 컵, 칠 시험용 주형, 화학 분석용 시편 금형 및 계단형 시험 주조품 주형에 각각 주입하였다. 그리고 1,450~1,500°C의 온도 범위에 용탕을 5분 동안 유지한 후 다시 셀 컵, 각종 주형 및 금형에 용탕을 주입하여 페이딩 거동을 평가하기 위한 시험을 하였다. 사용한 장입 재료, 접종제 및 기본 원소 첨가제의 화학 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다.

2.4 시험 변수

먼저 탄소, 규소, 접종에 의한 규소, 그리고 망간 등 기본 원소의 영향을 시험하였다. 탄소 함량의 영향을 시험하는 경우에는 탄소 함량을 3.20~3.60 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 규소 및 망간의 함량을 2.30 wt% 및 0.70

Table 1. Chemical compositions of materials for charging and addition (wt%).

material	elements														remark
	C	Si	Mn	P	S	Ba	Ca	La	Ce	Pr	Nd	Bi	Sr	Zr	
pig iron	3.83	1.65	0.54	0.11	0.029		0.01								
steel scrap	0.03	0.016	0.22	0.009	0.08										
Fe-Si	0.033	75.31													
1.00 wt%Ba-Fe-Si		72.44				1.32	1.40								
Fe-Mn	6.72	0.50	75.55												
Rare Earth								35.3	64.7	< 0.1	< 0.1				
Bismuth														99.99	
Sulfur	0.16	1.52			49.32										

wt%로 일정하게 하였다. 규소 함량의 영향을 시험하는 경우에는 규소 함량을 1.90~2.70 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 탄소 및 망간 함량을 각각 3.40 및 0.70 wt%로 일정하게 하였다. 이 경우 접중에 의하여 증가시키는 규소의 함량은 0.50 wt%로 일정하게 하였다. 접중에 의한 규소 첨가량의 영향을 시험하는 경우에는 접중으로 첨가하는 규소의 첨가량을 0.30~0.70 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 탄소 및 망간의 함량을 각각 3.40 및 0.70 wt%로 일정하게 하였다. 또한 기본 용탕의 규소 함량을 2.00~1.60 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 감소시켜 최종 규소 함량은 모든 경우에 2.30 wt%로 일정하게 하였다. 망간 함량의 영향을 시험하는 경우에는 망간 함량을 0.50~0.90 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 탄소 및 규소 함량은 각각 3.40 및 2.30 wt%로 일정하게 하였다. 그리고 미량 합금 원소인 희토류 원소, 비스무스 및 황의 영향을 시험하는 경우에는 각각 접중제 중량의 0.50~2.00 wt% 범위에서 0.50 wt% 간격으로 변화시켰으며 탄소, 규소 및 망간의 함량을 3.40, 2.30 및 0.70 wt%로 일정하게 하였다.

2.5 화학 조성 분석 및 거시 조직 관찰

기본 용탕, 접중 처리 후 그리고 접중의 페이딩 거동을 평가하기 위하여 용탕을 유지한 후 각각 화학 분석용 시편을 얻

었으며 이 시편의 표면을 조연마한 후 에미션 스펙트로미터를 이용하여 화학 조성을 분석하였다. 계단형 시험 주조품의 3, 5 및 10 mm 두께 판재 부분을 절단하여 가운데로부터 가로 및 세로가 각각 15 mm 크기인 시편을 얻었다. 이 시편을 절단 및 마운팅 한 후 가운데 단면을 일반적인 방법으로 조연마하고 1 μ m 등급까지의 다이아몬드 슬러리로 세연마하였다. Stead의 부식액으로 부식시켜 거시 조직을 관찰하고 공정 셀 크기와 단위면적당 공정 셀 수를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화학 조성 분석 결과

공정 셀 수 및 칠 깊이에 미치는 기본 원소의 영향과 접중제의 성능을 시험한 모든 경우에 얻은 화학 조성 분석 시편을 분석하였다. 그 결과 모든 기본 원소의 함량은 실험 오차 범위 내에 있으며 각 원소의 영향에 대한 실험 결과를 분석하는데에는 별 문제가 없는 것으로 판단되었다.

3.2 접중 처리, 용탕 유지 및 두께의 영향

대표적인 조성인 탄소, 규소 및 망간의 함량이 각각 3.40, 2.30 및 0.70 wt%인 용탕의 접중 처리와 용탕 유지 그리고 두께의 변화에 따른 단위 면적당 공정 셀 수와 공정 셀 크기

Fig. 5. Variations of eutectic cell count, (a), size, (b), and chill depth, (c), with melt condition and thickness of plate specimen with the composition of 3.40 wt%C-2.30 wt%Si-0.70 wt%Mn.

Fig. 6. Variations of macrostructure with the melt condition and thickness of gray cast iron with the composition of 3.40 wt%C-2.30 wt%Si-0.70 wt%Mn.

의 변화는 Fig. 5(a) 및 (b)에서 각각 보이는 바와 같다. 기본 용탕을 주입하여 얻은 판재 시편의 공정 셀 수는 작고 공정 셀 크기는 크나 접종 처리 후 전자는 크게 증가하고 후자는 크게 감소하였다. 용탕 유지에 따라 전자는 감소하고 후자는 증가하였다. 이것은 1.00 wt%Ba-Fe-Si를 사용하여 규소 함량을 0.50 wt% 증가시키는 방법으로 접종 처리하였기 때문에 흑연의 핵생성 자리 수가 증가하였다가 용탕 유지로 페이딩 현상이 일어나 흑연의 핵생성 자리수가 감소하였기 때문이다. 접종 처리와 용탕 유지에 따른 칠 깊이의 변화는 Fig. 5(c)에서 보이는 바와 같다. 칠 깊이는 접종 처리로 감소하였다가 용탕 유지에 의한 페이딩 거동으로 약간 증가하였다. 또한 두께가 10에서 3 mm로 얇아질수록 공정 셀 수는 더 많고 크기는 더 작았다. 이것은 두께가 얇은 경우에 냉각 속도의 증가로 과냉이 증가하여 흑연 핵생성의 구동력이 증가하여 핵생성 속도가 증가하였기 때문이다. 접종 처리, 용탕 유지 및 두께 변화에

Fig. 7. Thermal analysis curves from the inoculated melt with the composition of 3.40 wt%C-2.30 wt%Si-0.70 wt%Mn.

따른 거시 조직의 변화는 Fig. 6에서 보이는 바와 같다. 열분석 시험으로 3 가지의 냉각 곡선을 얻었으며 접종제의 접종능과 페이딩 거동은 시험 용탕의 냉각 곡선으로부터 얻은 과냉온도와 오스테나이트-탄화물 공정 온도의 차이(ΔT)를 측정하여 평가할 수 있다. 3.40 wt%C-2.30 wt%Si-0.70 wt%Mn 조성의 시험 용탕으로부터 얻은 열분석 시험 결과와 ΔT 의 측정 결과는 각각 Fig. 7 및 8에서 보이는 바와 같다.

ΔT 는 접종 처리로 증가하였다가 용탕 유지로 약간 감소하였다. 접종 효과가 좋을수록 흑연의 핵생성이 용이하여 과냉이 작아 ΔT 가 클 것이며 용탕 유지에 따라 ΔT 의 변화가 작을수록 페이딩 저항이 큰 것을 의미한다. 열분석 시험 결과도 접종 및 용탕 유지에 따른 거시 조직의 관찰 결과와 잘 일치하였다.

Fig. 8. Variations of ΔT with inoculation and holding of melt with the composition of 3.40 wt%C-2.30 wt%Si-0.70 wt%Mn.

3.3 기본 원소의 영향

3.3.1 탄소 함량의 영향

공정 셀 수와 공정 셀 크기에 미치는 탄소 함량의 영향을 시험하기 위하여, 규소 및 망간 함량을 2.30 및 0.70 wt%로 각각 일정하게 하고, 탄소 함량을 3.00~3.60 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 그 결과는 Fig. 9(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다. 그 원인을 규명하기 위하여 철 및 열분석 시험 하였으며 그 결과는 Fig. 9(c) 및 (d)에서 보이는 바와 같다.

탄소 함량이 증가함에 따라 공정 셀 수는 대체로 증가하고 공정 셀 크기는 감소하였다. 이것은 탄소 함량이 증가함에 따라 철 깊이는 감소하고 ΔT 는 증가하는 것으로 알 수 있는 바와 같이 탄소 함량이 증가함에 따라 탄소 당량이 증가하여 용탕의 응고가 일어나는 동안 흑연화 잠재력(graphitization potential)이 증가하였기 때문으로 생각된다.

3.3.2 규소 함량의 영향

규소 함량의 영향을 시험하기 위하여, 탄소 및 망간 함량을 각각 3.40 및 0.70 wt%로 일정하게 하고, 규소 함량을 1.90~2.70 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 그 결과와 철 및 열분석 시험 결과는 Fig. 10에서 보이는 바와 같다. 규소 함량이 증가함에 따라 공정 셀 수는 증가하고 공정 셀 크기는 감소하였다. 이것은 규소 함량이 증가함에 따라 철 깊이는 감소하고 ΔT 는 대체로 증가한 결과로부터 예측할 수 있는 결과이다. 주철 용탕 중 규소는 흑연화 촉진 원소이며 규소의 함량이 증가함에 따라 탄소 당량도 약간 증가하여 흑연화 잠재력이 증가하였기 때문으로 생각된다.

3.3.3 집중에 의한 규소 첨가량의 영향

집중에 의한 규소 첨가량의 영향을 시험하기 위하여, 탄소,

Fig. 9. Effect of carbon content on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

규소 및 망간 함량을 각각 3.40, 2.30 및 0.70 wt%로 일정하게 하고, 집중에 의한 규소 첨가량을 0.30~0.70 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켰으며 그 결과와 철 및 열분석 시험 결과는 Fig. 11에서 보이는 바와 같다. 최종 규소 함량이 2.30 wt%로 일정한 조건에서, 집중에 의한 규소 함량이 증가함에 따라 공정 셀 수는 대체로 증가하고 공정 셀 크기는 감소하였다. 이것은 집중에 의한 규소 첨가량이 증가함에 따라 철

Fig. 10. Effect of silicon content on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

Fig. 11. Effect of silicon content added by inoculation on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

Fig. 12. Effect of manganese content on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

깊이는 감소하고 ΔT 는 증가한 결과로부터 예측할 수 있는 결과이다. 접종에 의한 규소 함량이 증가함에 따라 접종제 중 알칼리 금속과 같은 미량 금속 원소 함량이 증가하여 흑연의 핵생성 서브스트레이트(nucleation substrate)의 수가 증가하였기 때문에 판단된다.

3.3.4 망간의 영향

망간의 영향을 시험하기 위하여, 탄소 및 규소 함량을 각각 3.40 및 2.30 wt%로 일정하게 하고, 망간 함량을 0.50~0.90 wt% 범위에서 0.20 wt% 간격으로 변화시켜 시험하였으며 그 결과는 Fig. 12(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다. 망간 함량이 증가함에 따라 공정 셀 수는 감소하고 공정 셀 크기는 증가하였다. 이것은 Fig. 12(c) 및 (d)에서 보이는 바와 같이 망간 함량이 증가함에 따라 칠 깊이는 증가하고 ΔT 는 감소한 결과로부터도 알 수 있는 결과이다. 주철 중 망간은 탄화물 형성 원소이며 탄소의 확산을 억제하여 흑연의 핵생성과 성장을 방해하였기 때문에 생각된다.

3.4 접종제 첨가 원소의 영향

3.4.1 회토류 원소의 영향

회토류 원소의 영향을 시험하기 위하여, 탄소, 규소 및 망간의 함량을 3.40, 2.30 및 0.70 wt%로 일정하게 하고 회토류 원소의 함량을 접종제 중량의 0.50~2.00 wt% 범위에서 0.50 wt% 간격으로 변화시켰으며 그 결과는 Fig. 13(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다. 이것은 Fig. 13(c) 및 (d)에서 보이는 바와 같이 회토류 원소의 함량이 증가함에 따라 칠 깊이는 증가하고 ΔT 는 감소한 결과로부터도 알 수 있는 결과이다. 주철 중 회토류 원소는 탄화물 형성 원소이며 탄소의 확산을 억제하여 흑연의 핵생성과 성장을 방해하였기 때문에 생각된다.

Fig. 13. Effect of amount of R.E. added to inoculant on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

Fig. 14. Effect of amount of Bi added to inoculant on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

3.4.2 비스무스의 영향

비스무스의 영향을 시험하기 위하여, 탄소, 규소 및 망간의 함량을 3.40, 2.30 및 0.70 wt%로 일정하게 하고 비스무스의 함량을 접종제 중량의 0.50~2.00 wt% 범위에서 0.50 wt% 간격으로 변화시켰으며 그 결과는 Fig. 14(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다. 이것은 Fig. 14(c) 및 (d)에서 보이는 바와 같이 비스무스의 함량이 증가함에 따라 칠 깊이는 증가하고 ΔT 는 감소한 결과로부터도 알 수 있는 결과이다. 주철 중 비스무스

Fig. 15. Effect of amount of S added to inoculant on the eutectic cell count, (a), size, (b), chill depth, (c), and ΔT , (d), after inoculation.

는 탄화물 형성 원소이며 탄소의 확산을 억제하여 흑연의 핵생성과 성장을 방해하였기 때문으로 생각된다.

3.4.3 황의 영향

황의 영향을 시험하기 위하여, 탄소, 규소 및 망간의 함량을 3.40, 2.30 및 0.70 wt%로 일정하게 하고 황의 함량을 점종제 중량의 0.50~2.00 wt% 범위에서 0.50 wt% 간격으로 일정하게 변화시켰으며 그 결과는 Fig. 15(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다. 이것은 Fig. 15(c) 및 (d)에서 보이는 바와 같이 황의 함량이 1.00 wt%일 때 chill 깊이가 가장 낮고 ΔT 는 가장 높은 결과로부터도 알 수 있는 결과이다. 주철 중 황은 점종제에 함유되어 있는 미량 원소들과 반응하여 황화물 또는 개제물을 형성하여 흑연 핵생성 서브스트레이트로 작용하지만 황의 함량이 일정한 양을 초과하게 되면 흑연의 핵생성과 성장을 방해하고 탄화물을 형성을 촉진하였기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

판형 회주철의 공정 셀 수와 chill 깊이에 미치는 두께, 기본 원소 및 점종제 첨가 원소의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 점종 처리에 의하여 공정 셀 수는 증가하고 chill 깊이는 감소하였으며 용탕 유지시 전자는 감소하고 후자는 약간 감소하였다.

2) 두께가 감소할수록 공정 셀 수는 증가하였다.

3) 탄소, 규소 그리고 점종제 의한 규소 함량이 증가할수록 공정 셀 수는 증가하고 chill 깊이는 감소하였다.

4) 망간 함량이 증가함에 따라 공정 셀 수는 감소하고 공정 셀 크기는 증가하였다.

5) 탄소, 규소 및 망간의 함량이 일정한 조건에서 점종제 중량의 회토류 원소와 비스무스의 함량이 증가할수록 공정 셀 수는 감소하고 chill 깊이는 증가하였다.

6) 탄소, 규소 및 망간의 함량이 일정한 조건에서 점종제 중량의 황의 함량이 1.00 wt%일 때 공정 셀 수가 가장 많고 chill 깊이는 가장 작았다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 2010년도 산업원천기술개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Park HI and Kim MH, J. KFS, "A consideration for the alloy design of high strength gray cast irons," **8** (1988) 174-184.
- [2] Loper CR, Jr., Foundry, "Inoculation of cast iron", **9**, (1996) 42-48.
- [3] Loper CR, Jr., J. KFS, "Nucleation of graphite in cast irons", **17** (1997) 327-337.
- [4] Wallace JF, Trans. AFS, "Effects of minor elements on the structure of cast irons", **83** (1975) 363-377.
- [5] Wallace JF and Maier RD, Proc. of AFS-CMI Conf., "How inoculation works", **2**, (1979) 41-75.
- [6] Skaland T et. al., Met. Trans., "A model for the graphite formation in ductile cast iron, part I, inoculation mechanisms", **24** (1993) 2321-2333.
- [7] Mizoguchi T, Perepezko JH and Loper CR, Jr., Trans. AFS, "Nucleation during the solidification of cast irons", **95** (1997).
- [8] Horie H, J. JFS, "Effects of fading on mechanical properties and sulfide shape on rare earth element added flake graphite cast iron", **74** (2002) 584-589.
- [9] Lee HS and Kwon H, J. KFS, "Effect and fading behavior of inoculants in the cast iron melt", **23** (2003) 122-129.
- [10] Kanno T, J. of JFES, "Prediction of chilling tendency in cast iron using three cups thermal analysis system", **70** (1998) 773-778.
- [11] Nam WS and Kwon H, J. KFS, "Effect of S, Ce and Bi on the performance of 1.0 wt%Ba-Fe-Si inoculant in gray cast iron melts", **24** (2004) 295-303.
- [12] Askeland DR, Trojan PK and Flinn RA, Trans. AFS, "Investigation of mechanism of dross formation in ductile iron", **78** (1970) 125-132.