

# GCD700 구상흑연주철의 주조조직 생성에 미치는 냉각속도와 Sn 첨가의 영향

## Influence of Cooling Rate and Sn Addition on Microstructure Formation of As-cast GCD700 Spheroidal Graphite Cast Irons

하성호<sup>1,#</sup>, 최재구<sup>2</sup>, 김동혁<sup>2</sup>, 신상윤<sup>3</sup>  
Seong-Ho Ha<sup>1,#</sup>, Jaegu Choi<sup>2</sup>, Dong-Hyuk Kim<sup>2</sup>, and Sang-Yun Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 소재-공급망연구부 (Materials Supply Chain R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)  
<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹 (Advanced Mobility Components Group, Korea Institute of Industrial Technology)  
<sup>3</sup> SBB테크 선형기술팀 (Technical Center, SBB TECH Co., Ltd.)  
# Corresponding Author / E-mail: seonghoha1999@gmail.com, TEL: +82-32-850-0379  
ORCID: 0000-0002-4718-8421

KEYWORDS: Spheroidal graphite cast iron (구상흑연주철), Microstructure (미세조직), Solidification (응고), Pearlite (펄라이트), Cooling rate (냉각속도), Electron backscatter diffraction (후방산란전자회절패턴분석)

*This study investigated the influence of cooling rate and Sn addition on the microstructure formation of as-cast GCD700 spheroidal graphite cast irons. Changes in cooling rate manifested as step cast thickness differences. Optical microstructures of as-cast GCD700 alloys revealed  $\alpha$ -ferrite and pearlite and dispersed graphite nodules. In all examined thicknesses without Sn, the  $\alpha$ -ferrite, rather than the pearlite, surrounding graphite nodules appeared to dominate microstructures, and the graphite looked well rounded, whereas microstructure containing 0.09% Sn had a significantly expanded pearlite area. Image analysis showed numbers of graphite nodules increased only on decreasing cast thickness. However, the phase fractions of ferrite and pearlite were not dependent on thickness. For samples containing Sn, pearlite fractions significantly increased with Sn content. Thermodynamic calculations and scanning electron microscopy-based microstructural analysis confirmed that the Sn contents examined had no significant effect on phase formation, Sn segregation, or the relationships between ferrite and  $Fe_3C$  orientations in pearlite.*

Manuscript received: October 2, 2023 / Revised: January 23, 2024 / Accepted: January 24, 2024  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

### NOMENCLATURE

SEM = Scanning Electron Microscopy  
EDS = Energy Dispersive X-ray Spectroscopy  
BSE = Back Scattered Electron  
EBSD = Electron Backscatter Diffraction  
IQ = Image Quality  
IPF = Inverse Pole Figure  
 $\alpha$  = Ferrite  
 $\gamma$  = Austenite  
 $\theta$  =  $Fe_3C$

### 1. 서론

구상흑연 주철은 타주철소재에 비해 강도와 연신율 등의 기계적 특성이 우수하고 합금설계에 따라 다양한 특성들의 향상을 기대할 수 있어 자동차, 선박 및 산업기계 부품 등의 주요 핵심소재로 활용되어 왔다. 따라서 여전히 주요 합금원소 첨가량의 최적화를 기반으로 한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-8]. 구상흑연주철의 기계적 특성의 개선을 위해서는 기지조직의 제어 가 요구된다. 특히 강도 향상에 필수적인 펄라이트 분율 증가를 위해 펄라이트 촉진 원소인 Mn, Cu, Sn 등을 적정량 첨가하면

우수한 기계적 특성을 갖는 구상흑연주철을 제조할 수 있다고 보고되고 있다[1-8].

한편, 본 연구에서는 상기의 원소들중에서 미량을 첨가해도 펄라이트 생성에 뚜렷한 효과가 있는 Sn에 주목하였고, 관련 최신문헌들을 조사하였다[3-8]. Razaq 등은 회주철의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 Sn과 Ti의 영향을 조사하였다[3]. 그 결과, 회주철의 기계적 특성이 위의 원소들의 첨가로 크게 개선되었으며 이는 편상흑연의 존재와 펄라이트의 증가에 기인한 것이라고 설명하였다. Lacaze와 Sertucha는 주철의 상변태에 미치는 Sn의 영향을 조사하였고 Sn 첨가에 의한 펄라이트 분율의 증가 기구를 다루었다[4]. 해당 논문에서는 펄라이트의 증가는 흑연/오스테나이트 계면에서의 Sn의 편석과 관련이 있다고 기술하였고 Sn은 응고 후 냉각과정에서  $Fe_3SnC$ 를 형성한다고 보고하였다. 또한, Lacaze와 Sertucha는 다른 논문을 통해서 주철의 펄라이트 조대화 속도에 미치는 Cu, Mn 그리고 Sn의 영향에 대해 보고하였고, 펄라이트 촉진제로서 Sn의 주요 역할은 펄라이트 핵 생성을 위한 최소 과냉각을 크게 줄이는 것이라고 제안하였다[5]. Lacaze 등은 구상흑연주철의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 Cu, Mn 그리고 Sn의 첨가효과에 대해 다루었고, Sn은 펄라이트 증가에 긍정적인 효과를 나타내었지만 고함량으로 첨가된 경우에는 기계적 특성에 악영향을 줄 수 있다고 보고하였다[6]. Lyu 등은 조밀흑연주철의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 Sn의 영향을 연구하였다[7]. 그들의 연구에서도 일정함량의 범위내에서의 Sn 첨가는 미세조직과 기계적 특성에 긍정적인 영향을 미쳤지만 0.121 mass% 이상의 Sn이 첨가되면 편석에 의해 부정적인 영향을 준다고 기술하였다. Lyu는 다른 문헌을 통해 Sn을 첨가한 조밀흑연주철의 마찰마모를 다루었고, 주석의 첨가는 마찰마모특성에 있어서도 크게 개선효과를 나타낸다고 보고하였다[8].

상기의 문헌들로부터 보고된 주철에서의 공통적인 Sn 첨가 효과는 펄라이트 촉진과 기계적 특성 향상이지만 일정량 이상이 첨가되면 편석에 의해 특성을 떨어뜨리는 점이다. 이와 같은 첨가원소들의 영향 외에도 주철의 미세조직은 냉각속도로부터도 크게 영향을 받는다고 알려져 있다[9,10]. 이에 본 연구에서는 로봇감속기의 서클러 스플라인(Circular Spline) 개발을 위한 GCD700 구상흑연주철의 미세조직 최적화를 위해 주철의 미세조직에 영향을 미치는 두 가지 변수인 Sn 첨가와 냉각속도를 다루고자 하였고 각각의 변수에 따른 GCD700의 응고조직의 변화를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 합금제조

본 연구에서는 용탕의 응고 시 냉각속도에 변화를 주기 위해 계단형 주형을 채택하였다. 계단형 주형은 용탕 주입 시 두께에 따라 냉각속도의 차이가 발생하므로 두께별로 시료를 채취하여

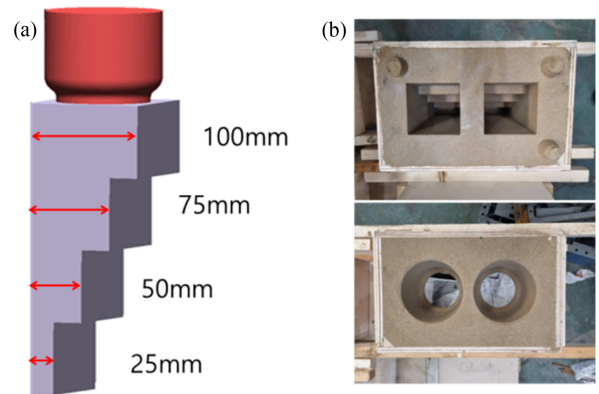


Fig. 1 (a) Geometry and (b) Actual images with pouring cup and riser (lower image) of step casting mold used in this study

미세조직 분석을 통해 냉각속도의 영향을 관찰할 수 있다. 따라서 본 실험을 위해 두께 25, 50, 75, 100 mm의 계단형 주형을 폭 80 mm, 길이 100 mm의 블록 형태로 제작하였다. Fig. 1은 사용된 계단형 주형의 형상과 실물을 보여준다.

주철 스크랩과 철 스크랩을 SiC 도가니에 장입, 125 kW 고주파 유도 용해로를 이용하여 용해하였다. 용탕이 형성된 후 Fe-Si, Fe-Mn 그리고 Fe-S 모합금을 첨가하여 목표 조성인 3.3 mass%C-2.1 mass%Si-0.7 mass%Mn-0.1 mass%S에 맞추어 성분을 조절하였다. 응고조직에 대한 Sn 함량의 영향을 조사하기 위해 Sn 목표조성을 0.00, 0.03, 0.06 그리고 0.09 mass%로 설정하여 Fe-Sn 모합금을 첨가하였다. R형의 열전대가 부착된 침지온도계를 이용하여 용탕온도를 1,480-1,530℃의 범위로 일정하게 유지하였고, 출탕 직전의 온도가 1,530℃까지 상승하였음을 확인하였다. 5.6 mass%Mg-Fe-Si 합금을 첨가하여 구상화 처리를 하였으며, 접중제로는 크기가 약 1.0-3.0 mm 정도의 입자형 1.0 mass%Ba-Fe-Si 합금을 사용하였다. 최종성분을 분석하기 위해 주형에 주입하기 직전에 소량의 용탕을 채취하여 냉각시킨 후 발광분광분석을 수행하였다. 목표 조성과의 오차가 무시할 만한 수준임을 확인한 후 쉘(Shell) 주형에 용탕을 주입하였다. 용탕이 완전히 응고, 냉각된 후 형을 해체하여 최종 주물을 얻었다.

### 2.2 미세조직 관찰 및 분석

미세조직을 관찰하기 위해 각 계단별 중심부로부터 시료를 채취하여 폭 45 mm, 길이 30 mm, 그리고 높이 5 mm의 블록 형태로 가공하였다. 시편을 SiC 계 연마지를 사용하여 100→300→600→1,000→2,000 Grit 순으로 연마한 후, 다이아몬드 및 알루미늄계 연마재를 사용하여 6→3→1 μm 순으로 경면 연마를 실시하였다. 연마된 시료에 대해 3%Nital(97% $C_2H_5OH$ -3% $HNO_3$ ) 용액으로 화학적 에칭을 수행한 후 얻어진 미세조직에 대해 이미지 분석을 수행하여 흑연 구상화, 흑연 입자 수 그리고 기지 분율을 조사하였다. 흑연 분포와 기지는 광학현미경(Carl Zeiss Corporation model Axio Observer. D1m)을 이용하여

100x 배율로 관찰하였다. 그리고 주사전자현미경(Carl Zeiss Corporation model Gemini 300)과 에너지분산형 X선 형광분석기를 이용하여 미세조직 관찰 및 성분 분석을 실시하였다. 또한, 후방산란전자회절패턴분석기를 통해서 펄라이트 조직에 대한 결정성 분석을 수행하였다. 열역학 계산 소프트웨어인 FactSage 8.2 [11]를 이용하여 Sn 첨가에 따른 상생성의 변화와 응고 시 Sn의 분포를 조사 및 검토하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 광학현미경 미세조직 및 이미지 분석 결과

Fig. 2는 합금의 응고 시 주형을 통해 삽입된 열전대에 의해 측정된 두께별 냉각곡선을 보여준다. 측정된 모든 곡선들이 약 1,000℃ 정도에서 냉각이 시작되었음을 보여준다. 두께가 얇아질수록 온도감소의 시작은 더욱 빨라지고, 시간이 지날수록 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 가장 냉각속도가 빠른 25 mm의 경우 다른 부위에 비해 온도저하 폭이 컸으나, 약 40분 후에는 경사도가 평탄해지는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 결과를 토대로 냉각속도가 가장 빠른 25 mm의 경우 공식반응 온도에 더 빨리 도달한다고 말할 수 있으나 50 mm와 75 mm 사이에 시간에 따른 온도변화는 두드러질만한 수준은 아닌 것으로 생각된다.

또한, 100 mm의 경우에는 압탕부 바로 아래에 위치하여 가장 두꺼운 부위임에도 불구하고 Fig. 1(b)의 아래의 사진과 같이 상부의 압탕부로부터 상당한 열손실이 발생하여 실제로 얇은 두께들보다 냉각속도가 빠른 것으로 측정되었기에 냉각속도가 가장 느린 조건으로 다루기에는 부적합하다고 판단하였다. 따라서 본 논문 전체에 걸쳐 100 mm 두께에 대한 결과는 다루지 않는다.

주조된 GCD700 합금의 두께별 광학현미경 조직을 Fig. 3에 나타내었다. 전반적인 미세조직은 가장 밝은 영역에 해당하는 α-페라이트 그리고 어두운 영역의 펄라이트로 구성된 기지에 구형의 흑연입자들이 분포하고 있는 것으로 설명할 수 있다. 두 조건 모두 펄라이트보다는 흑연 입자를 둘러싸고 있는 α-페라이트가 지배적인 것으로 판단되며, 흑연 입자들은 잘 구상화된 형태로 보인다.

냉각속도가 빠른 25 mm에서는 흑연입자가 상대적으로 더 많이 분포되어 있는 것으로 보이며, Fig. 4의 이미지 분석 결과에도 나타난 바와 같이 두께가 증가함에 따라 흑연 입자의 수가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 두께에 따른 페라이트와 펄라이트의 상분율의 변화에는 큰 차이가 없었다. 따라서, 본 연구에서 설계된 계단형 금형을 통해 구현한 두께별 냉각속도의 차이는 흑연 입자수에는 영향을 주었으나, 펄라이트의 분율에 변화를 주기에는 충분하지 않았던 것으로 판단된다. GCD700 합금의 동일한 75 mm 두께 조건하에서 Sn 첨가에 따른 미세조직 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Sn이 첨가되지 않은 경우에는 전술한 바와 같이 가장 밝은 영역에 해당하는 α-페라이트가 지배적이고

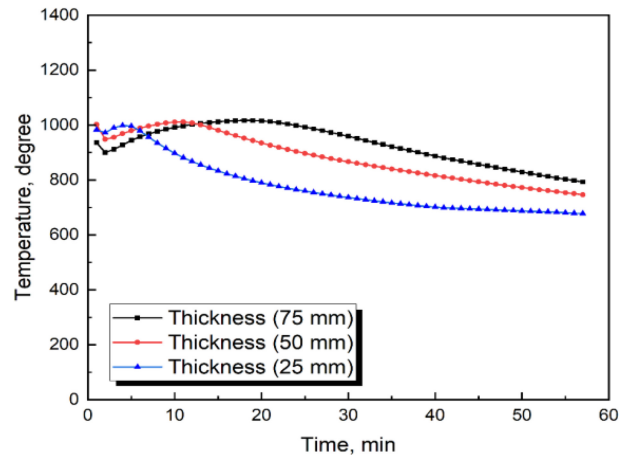


Fig. 2 Measured cooling curves depending on the thickness of step casting mold. The cooling rates of 75, 50, and 25 mm are -6.82, -7.13, and -16.75 degree/min., respectively.

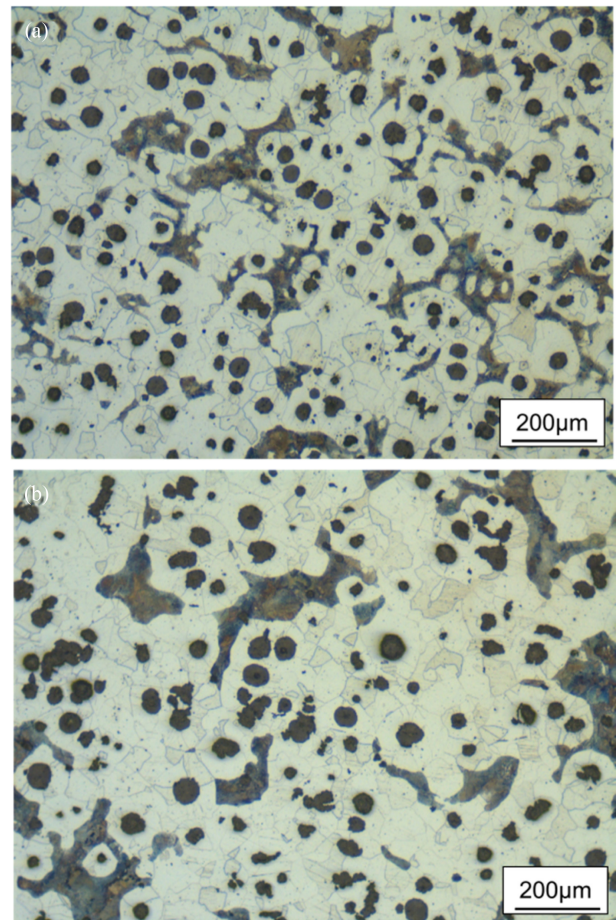


Fig. 3 Optical microstructures of as-cast GCD700 alloy with (a) 25 mm and (b) 75 mm in thickness

어두운 영역의 펄라이트가 부분적으로 존재하는 기지에 구형의 흑연 입자들이 분포하고 있으나, 0.09 mass%의 Sn이 첨가된 경우 펄라이트 영역이 현저하게 확장된 것을 알 수 있다.

Fig. 6의 이미지 분석결과로부터 Sn의 함량이 0.03 mass%

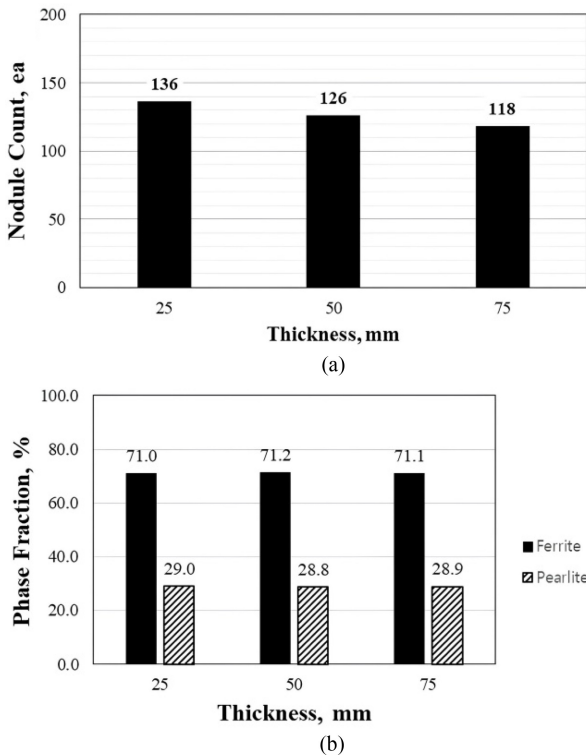


Fig. 4 Image analysis results. (a) Counts of graphite nodules and (b) Phase fractions of ferrite and pearlite depending on thickness

정도의 미량만 첨가되어도 GCD700 합금 내 펄라이트 영역이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 0.06 mass%로 증가하면 펄라이트 분율이 거의 90%에 달하는 것을 확인할 수 있었다. 상기의 결과들로부터 본 연구에서의 Sn 첨가에 따른 펄라이트 생성 촉진 효과는 기존 문헌들과도 일치하는 것을 확인하였다 [3-8].

Fig. 7에 두께가 75 mm인 GCD700 합금의 Sn 함량에 따른브리넬 경도값을 나타내었다. 주조재 상태에서 Sn 함량이 증가할수록 경도는 지속적으로 증가하였으며, Sn 첨가하지 않은 경우에 비해 각각 23 HB(0.03%Sn), 17 HB(0.03%Sn), 3 HB(0.03%Sn) 정도의 증가량을 확인하였다. 이는 0.03-0.09%Sn 첨가는 구상화율 저하가 나타나지 않고, Sn 첨가에 의해 펄라이트 조직이 미세화되는 것에 기인한다고 판단된다. 김효민 등은 Sn은 매우 강력한 펄라이트 형성 촉진 원소로 응고 시 흑연 표면에 편석하여 탄소의 확산을 억제하는 방법으로 펄라이트 형성을 촉진시키므로 펄라이트 부피 분율에 따라 강도 및 경도가 증가하고, 연신율은 감소한다고 보고하였다[12]. 본 연구에서도 기존 문헌 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

3.2 열역학 계산 및 주사전자현미경 분석

Fig. 8에 FactSage 8.2를 이용하여 계산한 상태도들을 나타내었다. Fig. 8(a)는 Sn이 제외된 GCD700의 기본성분에 대한 것으로 온도와 C함량의 관계를 보여준다. 기타 첨가원소들은 실험방법에서 언급한 합금조성대로 입력하여 계산을 하였고, 수직의

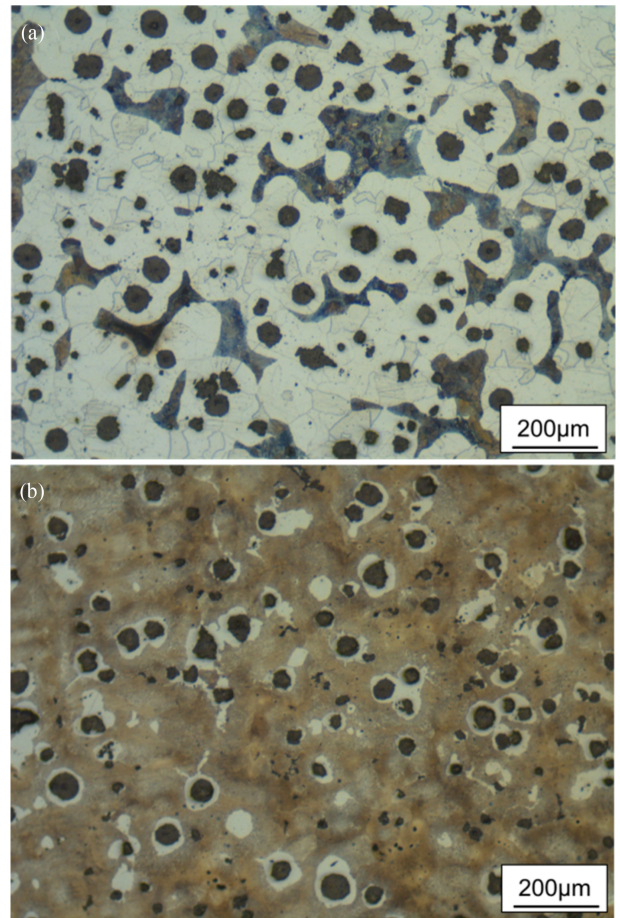


Fig. 5 Optical microstructures of as-cast (a) GCD700 and (b) GCD700-0.09 mass%Sn alloys in 75 mm

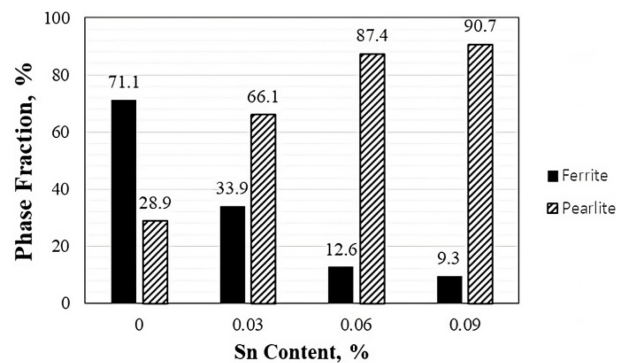


Fig. 6 Phase fractions of ferrite and pearlite in as-cast GCD700 alloys depending on Sn content in 75 mm measured by image analysis

접선으로 본 연구의 탄소 함량을 표시하였다. 위의 상태도를 토대로 본 연구에서 다룬 GCD700 합금의 응고과정을 예측해보면 초정 오스테나이트의 생성으로 응고가 시작되고 2차 오스테나이트와 흑연의 공정반응으로 이어졌을 것으로 생각된다. 철강의 경우에는 주로 흑연은 준안정상인 시멘타이트로 표현되기도 하지만 주철에서는 흑연과 시멘타이트 두 가지 형태가 모두 나타날

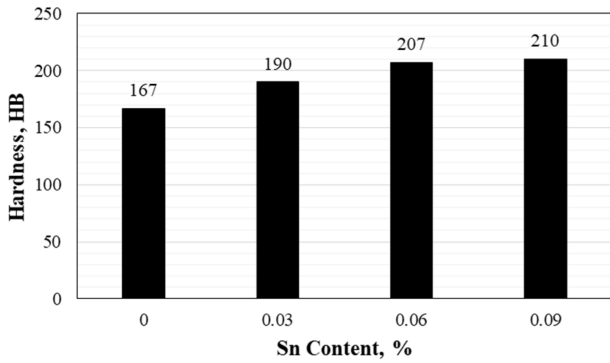
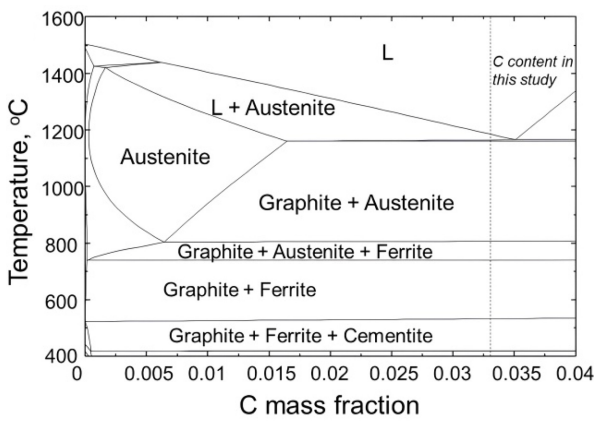
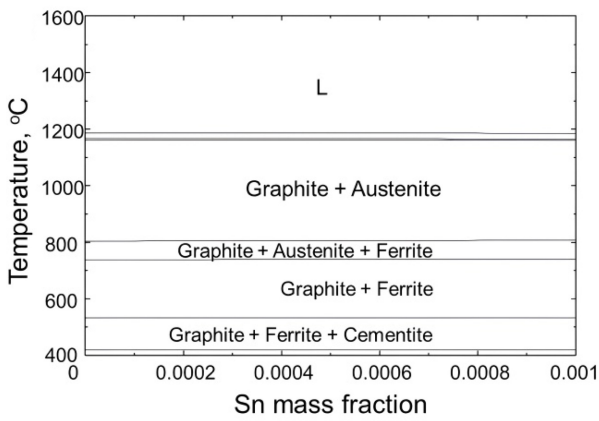


Fig. 7 Result of Brinell Hardness tests for GCD700 alloys depending on Sn content in 75 mm thickness



(a)



(b)

Fig. 8 Phase diagrams plotted for temperature versus (a) carbon mass fraction and (b) Sn mass fraction calculated by FactSage 8.2. The contents of Si and Mn are fixed at 2.1 and 0.7 mass%, respectively, in Fig. 7(a). The contents of C, Si, and Mn are fixed at 3.3, 2.1, and 0.7 mass%, respectively, in Fig. 7(b)

수 있으며 흑연이 안정상으로 간주된다. 온도가 약 750°C 정도가 되면 흑연과 페라이트의 2상 영역이 나타나는데 여기서 공식반응이 일어나는 것으로 생각된다. 기존 문헌의 Fe-C 상태도 상에서는  $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$  공식반응이 727°C에서 일어나는 것으로

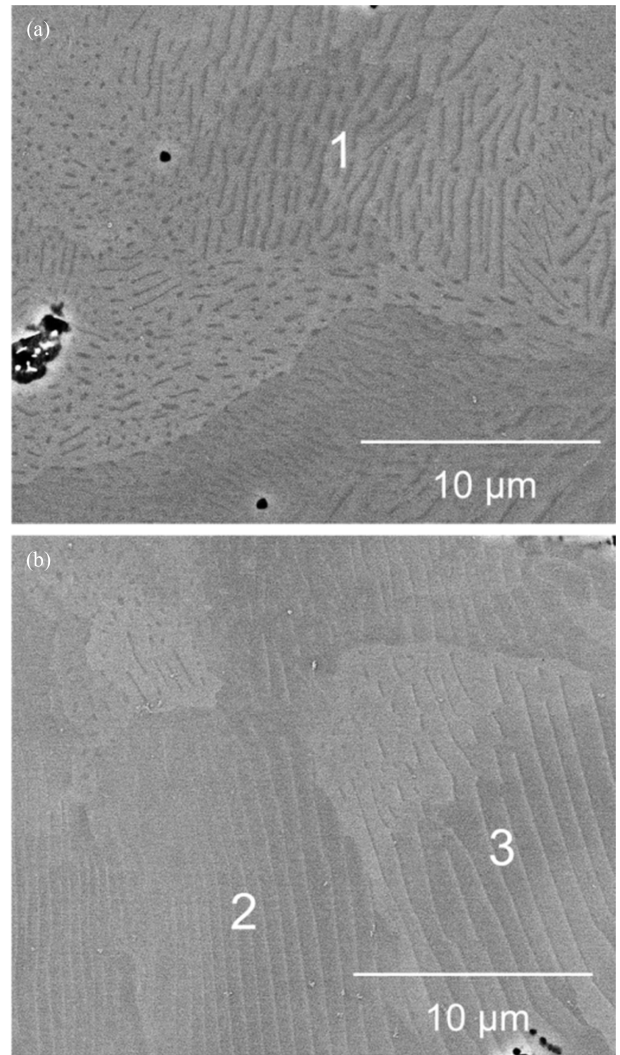


Fig. 9 SEM-BSE images of as-cast (a) GCD700 and (b) GCD700-0.09 mass%Sn alloys in 75 mm

나타나있는데[1] 여러 합금원소들의 존재를 포함하고 있는 것에 따른 차이로 생각된다. 또한, 본 상태도에서 Si 등 다른 주요합금원소들로 구성된 새로운 상은 존재하지 않는다.

Fig. 8(b)는 합금원소들의 함량을 목표조성과 동일하게 하여 온도와 Sn 함량 변화의 관계를 계산한 결과를 보여준다. 제시된 Sn 함량범위내에서는 Sn 첨가에 따른 새로운 상의 생성이나 각 상영역의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않는다. 따라서 0.09 mass% 수준의 Sn 첨가는 펄라이트 촉진제로서의 역할 외에 합금 내 전반적인 구성상의 변화에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 9는 각각 GCD700 합금과 0.09 mass%Sn이 첨가된 GCD700 합금 내 펄라이트 영역들에 대한 주사전자현미경 후방산란전자 이미지들을 보여준다. 전체적으로 전형적인 펄라이트 조직의 형상을 보여주고 있다. 주사전자현미경에 의한 이미지들의 경우 원자번호가 낮은 원소를 포함할수록 상대적으로 어두운 콘트라스트를 나타내는 경향이 있는데 가장 어둡고 얇은

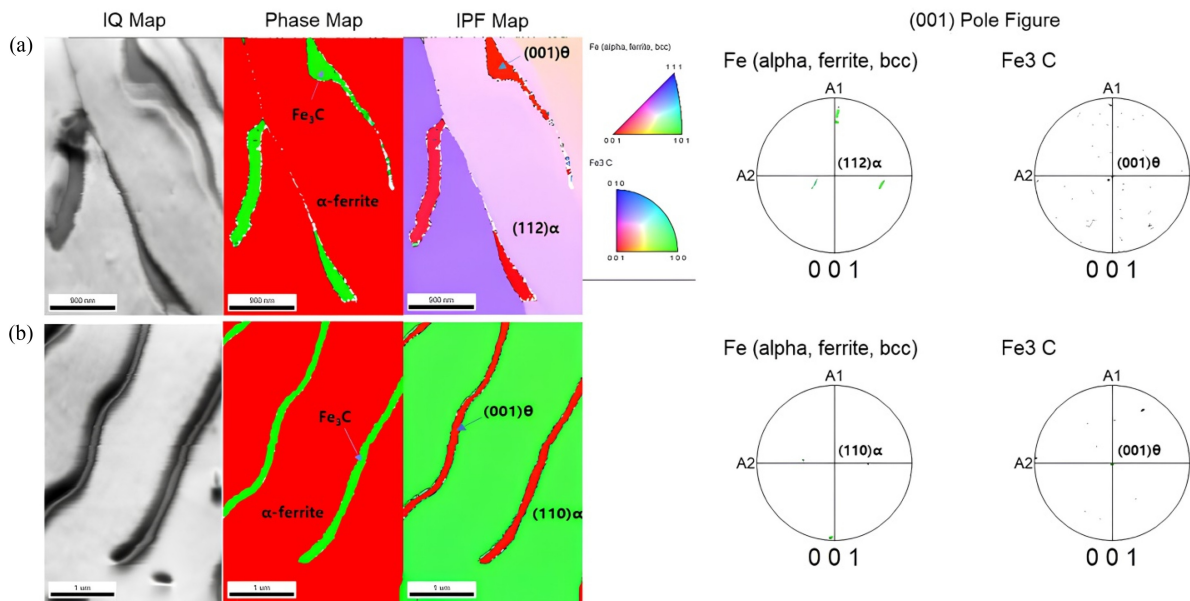


Fig. 10 EBSD images of a pearlite colony and corresponding pole figure of crystallographic orientation of ferrite ( $\alpha$ ) and cementite ( $\theta$ ). (a) GCD700 and (b) GCD700-0.09 mass%Sn alloys

Table 1 Compositions shown in Scheil-Gulliver cooling of GCD700-0.09 mass%Sn alloy calculated by FactSage 8.2 and analyzed by SEM-EDS for areas indicated in Fig. 9

Phase/Area	Composition [mass%]			
	C	Si	Sn	others
Primary austenite*	1.53	2.60	0.038	Bal.
Secondary austenite*	1.65	2.08	0.098	Bal.
1**	-	3.03	-	Bal.
2**	-	3.46	-	Bal.
3**	-	3.17	-	Bal.

\*Calculated, \*\*Analyzed

침상들이  $Fe_3C$ 인 것으로 판단된다. 본 이미지들에 나타난 1부터 3번까지의 영역들에 대한 성분분석결과와 FactSage 8.2에 의한 Scheil-Gulliver 냉각계산결과상의 초정 오스테나이트와 2차 오스테나이트내 각 구성원소들의 함유량을 Table 1에 나타내었다. 먼저, 응고계산상의 오스테나이트들은 일정량의 C와 Si 등을 함유하고 있다. 본 연구에서의 GCD700 합금은 약 2.1 mass%의 Si를 함유하고 있고 2차 오스테나이트상이 미세조직상 대부분의 분율을 차지한다는 점을 감안하면 열역학 계산결과가 꽤 정확하다고 판단할 수 있다. C의 경우, 첨가량의 일부는 흑연상으로 생성되는 점을 감안하면 계산된 C 함유량이 공석반응을 통해 펄라이트로 변태 시  $Fe_3C$ 를 형성할 것으로 생각된다.

Sn 함량의 경우 초정 오스테나이트가 0.038 mass%로 2차 오스테나이트에 비해 낮은 양을 함유하고 있으나 대부분의 분율을 차지하는 2차 오스테나이트가 거의 첨가량 수준에 해당하는

Sn을 함유하고 있는 것으로부터 본 연구에서 조사된 합금들의 응고조직에는 Sn의 편석이 거의 관찰되지 않을 수 있음을 알 수 있다.

기존의 참고문헌에서는 흑연/오스테나이트 계면에 Sn 편석이 관찰되었는데 i) 본 연구에서 주사전자현미경에 의한 조직관찰 결과, 흑연/펄라이트 계면에 관련상들이 전혀 관찰되지 않았던 점, ii) 응고계산결과상의 2차 오스테나이트상이 첨가량 수준의 Sn을 함유하고 있는 점 그리고 iii) Lyu 등[7]의 기존문헌에서 밝힌 Sn 편석이 관찰되는 첨가량 조건이 0.121 mass%라는 점을 들어 본 연구에서 조사된 합금들의 성분조건은 Sn의 편석을 일으키지 않는 것으로 생각된다. 또한, 일정량 이상의 Sn 첨가는 흑연/오스테나이트 계면에 편석을 일으키고 Fe 그리고 C와 혼합하여 Lacaze와 Sertucha가 보고한 바와 같이  $Fe_3SnC$ 를 형성하는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 9의 1부터 3까지의 영역에 대한 성분분석결과, C는 결과에서 배제되었다. 주사전자현미경의 경우 C 피크의 높은 배경계수(Background Counts)때문에 C가 실제 함유량보다 높게 측정될 수 있으며 존재하지 않는 시료들의 경우에도 일정량 이상이 검출될 수 있기 때문이다. Sn은 검출되지 않았는데 주사전자현미경의 분해능, C의 과대평가의 영향 등에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 10은 GCD700과 Sn이 첨가된 GCD700 합금시료 내 펄라이트 조직에 대한 후방산란전자 회절패턴분석의 결과를 나타낸다. 스왓 분석은 IQ Map에 보이는 영역에 대해서 실시하였다. 펄라이트와  $Fe_3C$ 는 각각  $\alpha$ 와  $\theta$ 로 표시하였다. 두 상 간의 결정학적 방위를 분석결과는 (001) 폴 피겨(Pole Figure)로 나타내었다. 한 참고문헌에 따르면 펄라이트 조직에 대한 후방산란 전자 회절 패턴분석 결과의 품질과 정확도는 라멜라  $Fe_3C$  상의 두께와 크기에 의해 좌우된다고 한다[13].

따라서 본 연구에서는 라멜라 Fe<sub>3</sub>C 상의 패턴이 명확히 관찰되는 영역에 대해 분석을 진행하였다. 그 결과, 관찰된 모든 라멜라 Fe<sub>3</sub>C상들은 페라이트와의 방위관계에 있어서 기존문헌과 유사한 것을 확인할 수 있었다. Durgaprasad 등의 연구에 따르면, 페라이트와 Fe<sub>3</sub>C 사이에는 {110}α//{001}θ의 방위관계를 갖는다[14]. 따라서, 0.09 mass%까지의 Sn 첨가는 GCD700 합금 내 펄라이트 축진을 제외하고 구성상의 변화 및 펄라이트 조직 내 페라이트와 라멜라 Fe<sub>3</sub>C의 방위관계에 뚜렷한 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

4. 결론

냉각속도에 따른 GCD700 합금들의 미세조직 관찰결과, 전반적으로 페라이트와 펄라이트로 구성된 기지에 구형의 흑연입자들이 분포된 조직을 나타내었으며 냉각속도가 감소함에 따라 흑연 입자의 수가 증가하였다. 반면에 냉각속도 변화에 따른 페라이트와 펄라이트의 상분율에는 큰 차이가 없었다. Sn 첨가 후에는 Sn 함량 증가에 따라 펄라이트의 분율이 크게 증가했고 단 0.06 mass% 첨가만으로도 거의 90%에 해당하는 펄라이트 분율이 얻어졌다. 상태도 계산 및 미세조직 분석결과를 토대로 본 연구에서 조사된 Sn의 함량은 합금의 상 형성과 Sn편석에 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. Sn 첨가에 따라 생성이 촉진된 펄라이트내 Fe<sub>3</sub>C와 페라이트 간의 결정방위관계에 있어서도 특별한 변화는 관찰되지 않았다. 따라서 본 연구결과를 토대로 빠른 냉각속도와 약 0.06 mass% 수준의 미량의 Sn첨가를 GCD700 합금에 적용하면 Sn 편석에 따른 기계적 특성의 감소없이 증가된 흑연입자수와 크게 확장된 펄라이트 기지를 얻을 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 소재부품기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20017503).

REFERENCES

1. Committee, A. I. H., (1990), Properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys. ASM International.
2. Agunsoye, J., Bello, S., Hassan, S., Adeyemo, R., Odii, J., (2014), The effect of copper addition on the mechanical and wear properties of grey cast iron, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2(5), 470-483.
3. Razaq, A., Yin, Y., Zhou, J., Shen, X., Ji, X., Ullah, I., (2019), Influence of alloying elements Sn and Ti on the microstructure

and mechanical properties of gray cast iron, *Procedia Manufacturing*, 37, 353-359.

4. Lacaze, J., Sertucha, J., (2017), Effect of tin on the phase transformations of cast irons, *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 38, 743-749.
5. Lacaze, J., Sertucha, J., (2016), Effect of Cu, Mn and Sn on pearlite growth kinetics in as-cast ductile irons, *International Journal of Cast Metals Research*, 29(1-2), 74-78.
6. Lacaze, J., Sertucha, J., Larrañaga, P., Suarez, R., (2017), Combined effects of copper and tin at intermediate level of manganese on the structure and properties of as-cast nodular graphite cast iron, *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(2), 825-831.
7. Lyu, Y., Sun, Y., Liu, S., Zhao, J., (2015), Effect of tin on microstructure and mechanical properties of compacted graphite iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 28(5), 263-268.
8. Lyu, Y., (2019), Abrasive wear of compacted graphite cast iron with added tin, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8, 67-71.
9. Górný, M., Tyrała, E., (2013), Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, 300-305.
10. Sundaram, D., (2018), The effect of cooling rate and solidification time on the ultimate tensile strength of grey cast iron, M.Sc. Thesis, KTH Royal Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1262845/FULLTEXT03.pdf>
11. Bale, C. W., Bélisle, E., Chartrand, P., Decterov, S., Eriksson, G., Gheribi, A. E., Hack, K., Jung, I.-H., Kang, Y.-B., Melançon, J., (2016), Reprint of: FactSage thermochemical software and databases, 2010-2016, *Calphad*, 55, 1-19.
12. Kim, H.-M., Kwon, M.-Y., Chun, B.-C., Kwon, D.-Y., Kim, G.-Y., Kwon, H.-W., (2020), Effects of alloying element and heat treatment on the mechanical properties of ductile cast iron poured into shell stack mold, *Journal of Korea Foundry Society*, 40(3), 76-84.
13. Takahashi, T., Ponge, D., Raabe, D., (2007), Investigation of orientation gradients in pearlite in hypoeutectoid steel by use of orientation imaging microscopy, *Steel Research International*, 78(1), 38-44.
14. Durgaprasad, A., Giri, S., Lenka, S., Kundu, S., Mishra, S., Chandra, S., Doherty, R., Samajdar, I., (2017), Defining a relationship between pearlite morphology and ferrite crystallographic orientation, *Acta Materialia*, 129, 278-289.

**Seong Ho Ha**

Principal researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research is focused on alloy design, microstructure characterization, and thermodynamic calculation.

E-mail: seonghoha1999@gmail.com

**Jaegu Choi**

Senior researcher in the Korea Institute of Industrial Technology. His research interests include the mechanical properties and microstructures of superalloys, as well as lifetime predictions and reliability assessments of structural components.

E-mail: jgchoi@kitech.re.kr

**Dong Hyuk Kim**

Ph.D. Senior researcher, in Mobility Parts Group, Korea Institute of Industrial Technology. His research interests include the cast iron/cast steel and non-ferrous alloy casting, heat-resistant alloy, heat treatment.

E-mail: dhkim76@kitech.re.kr

**Sang Yun Shin**

Researcher in Technical Center, SBB tech. He received his Ph.D. in Department of Materials Science and Metallurgical Engineering from Kyungpook National University. His research interest is harmonic reducer.

E-mail: syshin@sbb.co.kr