

## 연구논문

## 임계간 온도에서 열처리한 구상흑연주철의 미세조직 및 경도 예측

서남혁\*\*\*·전준협\*\*\*·송수영\*\*\*·김종수\*\*\*·김민수\*\*†

\*전북대학교 금속공학과, \*\*한국생산기술연구원 전북본부, \*\*\*(주)진흥주물 기술연구소

## Prediction of Microstructure and Hardness of the Ductile Cast Iron Heat-treated at the Intercritical Temperatures

Nam-Hyuk Seo\*\*\*, Jun-Hyub Jeon\*\*\*, Soo-Yeong Song\*\*\*, Jong-Soo Kim\*\*\* and Min-Su Kim\*\*†

\*Department of Metallurgical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, 54896, Republic of Korea

\*\*Jeonbuk Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology, Gimje, 54325, Republic of Korea

\*\*\*R&amp;D Center, Jinheung Foundry, Gunsan, 54004, Republic of Korea

## 초 록

본 연구에서는 임계간 온도 범위에서 열처리한 구상흑연주철의 열처리 온도에 따른 물성 예측을 위해, 인장강도 450 MPa 급 구상흑연주철을 다양한 온도에서 열처리한 후 공냉하여 물성 예측에 필요한 미세조직을 분석하고 브리넬 경도를 측정하였다. 임계간 온도 구간에서 열처리 온도가 증가할수록 구상흑연주철 내 페라이트 분율은 감소함과 동시에 펄라이트 분율은 증가하였으나, 흑연 구상화율 및 구상흑연입수는 주방상태에서 측정된 값과 유사하였다. 열처리한 구상흑연주철의 브리넬 경도는 열처리 온도가 증가할수록 점점 증가하였다. 측정된 합금 조성 및 각 안정상의 분율, 그리고 문헌에 알려진 구상흑연주철의 브리넬 경도 예측 모델을 활용하여 열처리 온도 별 구상흑연주철의 경도 값을 계산해 본 결과, 측정값과 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다. 또한 열역학 계산을 통해 예측된 상분율을 활용하여 정확한 경도 예측이 가능할지 확인해보기 위해, 열처리 온도 별로 구상흑연주철 내 흑연, 페라이트 및 오스테나이트의 부피를 계산한 후, 이를 면적으로 변환하여 동일한 구상흑연주철의 경도 예측 모델에 적용하였다. 이렇게 열역학 계산과 경도 예측 모델을 동시에 활용하여 계산된 구상흑연주철의 경도 값은 실제 측정된 브리넬 경도 대비 최대 27의 오차 범위 내에서 유사한 값을 나타내었다.

**핵심용어;** 구상흑연주철, 열처리, 임계간 온도, 미세조직, 브리넬 경도.

## Abstract

In order to predict the mechanical properties of ductile cast iron heat treated in an intercritical temperature range, samples machined from cast iron with a tensile strength of 450 MPa were heat-treated at various intercritical temperatures and air-cooled, after which a microstructural analysis and Brinell hardness test were conducted. As the heat treatment temperature was increased in the intercritical temperature range, the ferrite fraction in the ductile cast iron decreased and the pearlite fraction increased, whereas the nodularity and nodule count did not change considerably from the corresponding values in the as-cast condition. The Brinell hardness values of the heat-treated ductile cast iron increased gradually as the heat treatment temperature was increased. Based on the measured alloy composition, the fraction of each stable phase and the hardness model from the literature, the hardness of the ductile cast iron heat treated in the intercritical temperature range was calculated, showing values very similar to the measured hardness data. In order to check whether it is possible to predict the hardness of heat-treated ductile cast iron by using the phase fraction obtained from thermodynamic calculations, the volumes of graphite, ferrite, and austenite in the alloy were calculated for each temperature condition. Those volume fractions were then converted into areas of each phase for hardness prediction of the heat-treated ductile cast iron. The hardness values of the cast iron samples based on thermodynamic calculations and on the hardness prediction model were similar within an error range up to 27 compared to the measured hardness data.

**Key words;** Ductile cast iron, Heat treatment, Intercritical temperature, Microstructure and Brinell hardness.

-서남혁: 학생연구원, 전준협: 학생연구원, 송수영: 전무이사, 김종수: 부장, 김민수: 수석연구원

Received: Sep. 26, 2023 ; Revised: Oct. 20, 2023 ; Accepted: Oct. 30, 2023

†Corresponding author: Min-Su Kim (KITECH)

Tel: +82-63-920-1286, Fax: +82-63-920-8289

E-mail: mskim85@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2023. Vol. 43 No. 6, pp. 279~285

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2023.43.6.279>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© 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.

## 1. 서 론

우수한 강도 및 연신율을 동시에 얻을 수 있는 대표적인 주물 소재인 구상흑연주철은 자동차, 건설기계, 산업기계 등의 부품 소재로서 광범위하게 적용되어 왔다. 오랜 기간 동안 구조재로서 연구되어 온 만큼, 구상흑연주철은 합금 조성 및 미세조직에 따른 기계적 성질 변화 [1-10]에 대해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 합금 조성 및 주조 공정에 따른 미세조직 생성 거동 및 이에 따른 기계적 성질 발현 원리 등이 잘 알려져 있다. 특히 기지상을 구성하는 페라이트와 펄라이트 중 페라이트 분율이 증가할수록 구상흑연주철의 강도는 감소하나 연신율은 증가한다고 알려져 있으며, 이러한 기지상 분율과 기계적 성질 간 상관관계는 실험실에서 주조된 시편 [11]과 주조 현장에서 제작된 시편 [12]에서 모두 검증된 바 있다. 한편, 주물 크기가 커지고 제품 형상이 복잡해질수록 구상흑연주철의 사형주조 과정에서 제품 부위별 응고속도 차이에 따른 기지상 분율 차이가 발생할 수 있어, 주물 부위별 혹은 제품 간 물성 편차가 발생할 가능성이 있다.

최근 부품 경량화 및 일체형 부품 개발 요구에 따라, 정해진 구상흑연주철 합금에서 얻을 수 있는 임계특성 수준의 강도와 연신율을 동시에 요구하는 경우가 종종 발생하고 있다. 이러한 경우 합금의 기계적 성질을 향상시키고 주물 부위별 물성 편차를 줄이기 위해 주조 후 열처리를 추가로 진행하기도 한다. 구상흑연주철의 열처리는 연신을 및 인성을 확보하기 위한 어닐링 (Annealing), 우수한 강도 및 적당한 연신율을 얻고자 하는 노말라이징 (Normalizing), 경도를 높이기 위한 퀴칭-템퍼링 (Quenching & tempering) 열처리를 주로 적용하며, 이때 합금 내 오스테나이트 기지상이 얻어지는 온도인 870°C 이상에서의 등온 열처리를 포함하는 것이 일반적이다 [13].

한편 구상흑연주철 열처리 온도를 오스테나이트 단상 영역이 아닌 오스테나이트와 페라이트가 공존하는 임계간 온도 (Intercritical temperature) 영역으로 설정하게 되면 열처리 과정에서 일정 비율의 페라이트를 기지상으로 확보함으로써 연신율을 향상시킬 수 있다. 또한 열처리 시 구상흑연주철 내 생성된 오스테나이트 상은 이후 공냉 시 펄라이트로 변태 [13]되어 합금의 강도 향상에 기여하므로, 조성이 동일한 합금이더라도 열처리 온도 조절을 통해 구상흑연주철의 강도와 연신율을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 임계간 온도 범위에서의 열처리를 통해 구상흑연주철의 기계적 성질을 최적화하기 위해서는 열처리 온도에 따라 얻을 수 있는 기지상 분율 및 물성에 대한 실험적인 확인 및 검증이 충분히 수행되어야 한다. 또한 열처리 실험을 통해 확인한 온도에 따른 구상흑연주철 내 안정상 분율은 합금 조성에 따라 달라지므로 구상흑연주철 소재가 변경되게 되면 열처리 온도에 따른 상변화 거동을 실험적으로 다시 측정해야만 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 임계간 온도 범위에서 열처리한 구상흑연주철의 열처리 온도에 따른 경도 예측을 위해, 인장강도 450 MPa 급 구상흑연주철을 다양한 온도에서 열처리한 후 공냉하여 물성 예측에 필요한 미세조직 및 경도 데이터를 확보하였다. 미세조직 예측의 경우 열역학 계산으로부터 온도 별 안정상 및 각 상의 부피를 계산하였으며, 계산된 부피를 면적으로 변환하여 경도 계산에 필요한 안정상 면적 분율을 도출하였다. 이렇게 계산한 열처리 온도 별 미세조직 정보와 문헌에 알려진 경도 예측 식을 활용하여 임계간 온도에서 열처리한 구상흑연주철의 경도 예측을 시도하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 열처리 실험

본 연구에서는 주철 사형주조 현장에서 제작된 인장강도 450 MPa 급 구상흑연주철을 봉형 (약 12×12×120 mm)로 가공하여 열처리를 진행하였다. 실험에 사용된 구상흑연주철 합금의 조성은 Table 1과 같다. 가공된 구상흑연주철 시편을 임계간 온도 범위에서 열처리하여 합금 내 기지상 분율을 제어하기 위해, 열역학 계산 소프트웨어 (FactSage®)를 활용한 상태도 계산 (Fig. 1)을 먼저 수행하였다. 열역학 계산 결과, 본 연구에서 다룬 구상흑연주철 합금 조성 (wt%C=3.54)에서는 834°C 이하에서 페라이트 (Fig. 1에서 BCC)가 생성되기 시작함을 알 수 있었다. 또한 온도가 778°C 이하일 경우, 합금 내에 페라이트 단독 기지상이 생성된다고 예측되었다. 이

Table 1. Chemical composition (wt%) of the ductile cast iron in the present study.

C	Si	Mn	Cu	P	S	Mg
3.58	2.45	0.3	0.14	0.021	0.011	0.39

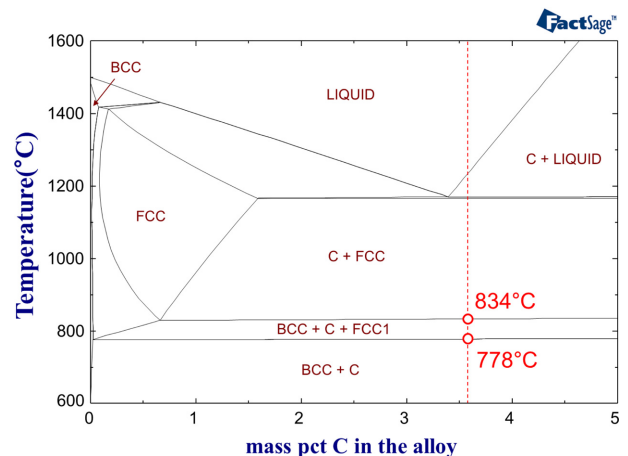


Fig. 1. Calculated phase diagram of the Fe-C-2.45Si-0.3Mn-0.14Cu system from FactSage® thermodynamic software. The dashed line indicates the carbon concentration in the present ductile cast iron.

Table 2. Experimental condition and measured data during heat treatment.

Condition	Target temperature (°C)	Measured Temperature (°C)	Measured Holding time (sec)	Cooling rate (°C/sec)
HT1	800	802	3,196	0.78
HT2	820	821	3,167	1.08
HT3	830	832	2,905	0.84
HT4	860	863	3,360	1.72

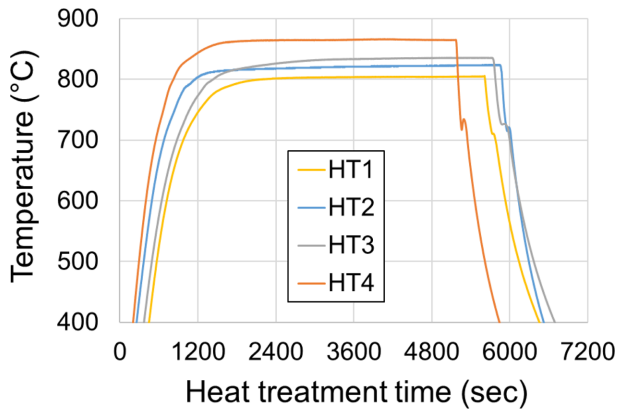


Fig. 2. Measured temperature profiles during heat treatment of the ductile cast iron specimens.

렇게 확인된 임계 온도를 고려하여, 임계간 온도인 800, 820, 830, 그리고 임계 온도 이상인 860°C를 열처리 조건으로 설정하였다. 열처리 과정에서 실제 시편이 겪은 온도 변화를 확인하기 위해 시편 사이에 K-type 열전대를 삽입하고 이를 데이터 로거와 연결하여 열처리 과정 중 시편의 온도 변화를 측정하였다. Fig. 2와 같이 얻어진 열처리 시편의 온도 데이터를 기준으로 실험 조건 별 실제 열처리 온도 및 시간을 확인할 수 있었으며 이를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 시편 열처리는 목표 온도와 4도 이상 차이가 나지 않도록 열처리 온도를 제어하여 최소 2,905초 (약 48분)에서 최대 3,360초 (약 56분) 동안 진행하였다. Fig. 2를 보면 열처리 후 공냉 시 710~720°C 구간에서 상변태에 의한 잠열 때문에 온도가 잠깐 상승하다가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 공냉이 시작된 후 실험 별 목표 온도에서부터 위 상변태 온도에 도달하는 시점까지의 냉각속도를 계산해 본 결과, 모든 열처리 조건에서 1°C/sec 내외의 빠른 속도로 냉각되었음을 확인할 수 있었다.

### 2.2 브리넬 경도 측정

열처리 시편의 경도는 외경 10 mm의 초경 압입자가 장착된 브리넬 경도기 (SB-700, Samil Precision)를 활용, 3000 kgf 시험 하중으로 약 10초 간 시편을 누른 후 생긴 압흔의 크기를 측정하여 브리넬 경도 값을 도출하였다. 측정값의 신뢰성 확보를 위해서, 8회 이상 경도 측정을 실시하였으며, 측정된

값에서 최대값 및 최소값을 제외한 평균값을 사용하였다.

### 2.3 미세조직 분석

열처리 조건 별 미세조직을 확인하기 위해 시편 일부를 절단하여 마운팅한 후, 사포를 이용한 그라인딩 및 1 μm 다이아몬드 연마재를 활용한 미세 연마를 실시하였다. 이후 광학현미경을 통해 전반적인 미세조직을 확인하였으며, 펠라이트 상 관찰을 위해 연마된 시편을 4%Nital 용액으로 10초 정도 에칭한 후 기지상 조직을 다시 관찰하였다. 그리고 안정상의 정량분석을 위해 100배율로 촬영된 광학현미경 사진을 기준으로 이미지 분석 프로그램 (ImageJ 1.52a, National Institutes of Health, USA)을 활용한 흑연 구상화율, 구상흑연입수, 안정상 면적 분율 측정을 수행하였다. 흑연의 면적 분율은 에칭 전 광학현미경 사진에서 검게 표시되는 부분의 총 면적, 펠라이트의 면적 분율은 에칭 후 광학현미경 사진에서 밝게 표시되는 부분의 총 면적으로부터 계산하였으며, 측정된 흑연 및 펠라이트의 면적을 전체 면적에서 뺀 값으로부터 펠라이트 면적 분율을 산출하였다. 이미지 분석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서, 실험 조건 별 최소 3개 이상의 광학현미경 사진을 분석하였다.

## 3. 열처리한 구상흑연주철의 미세조직 및 경도 예측

### 3.1 구상흑연주철의 경도 예측

그동안 구상흑연주철의 물성 예측을 위한 많은 연구가 이미 수행된 바 있으며, 합금 조성, 상분율, 냉각속도 등 몇 가지 입력 값을 통해 경도, 강도, 연신율 등 다양한 물성을 비교적 정확하게 계산할 수 있는 예측 모델들 [14-17]이 제안된 바 있다. 특히 브리넬 경도 예측의 경우, Guo et al. [14]이 제안한 경도 예측 모델이 타 모델 대비 높은 예측 정확도를 나타낸다고 보고 [18] 되어 있으므로, 본 연구에서는 Guo et al. [14]의 경도 계산식을 활용하여 열처리한 구상흑연주철의 브리넬 경도를 예측하였다. 구상흑연주철의 브리넬 경도는 흑연상, 펠라이트, 그리고 펠라이트에 의한 경도 기여분을 고려하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$HB = 100f_{Gr} + HB_a f_a + HB_{Pe} f_{Pe} \quad (1)$$

여기서  $f_{Gr}$ ,  $f_a$ ,  $f_{Pe}$ ,  $HB_a$ ,  $HB_{Pe}$  는 각각 흑연 면적 분율,

페라이트 면적 분율, 펄라이트 면적 분율, 페라이트의 브리넬 경도 및 펄라이트의 브리넬 경도를 의미한다.  $HB_{\alpha}$  및  $HB_{pe}$  는 아래와 같이 합금 조성 (wt% 단위) 및 냉각속도 (dT/dt) 의 함수로 정의된다.

$$HB_{\alpha} = 54 + 37Si \quad (2)$$

$$HB_{pe} = 223 + 50(Mn + Cu + Cr + Mo) + 10Ni + 20(dT/dt - 0.5) \quad (3)$$

위 식에서 dT/dt는 응고 후 냉각 중인 주물의 온도가 850°C 일때 냉각속도로 정의되어 있어 주조 현장에서 실측을 통해 얻기 까다로운 값이다. 따라서 본 연구에서는 합금 내 기지 상이 펄라이트 단상에 가깝게 만들어진 열처리 시편의 브리넬 경도 값을 잘 재현하는 dT/dt 값을 도출하여 사용하였다. 결론적으로, 성분 분석을 통해 얻을 수 있는 합금 조성, 미세조직 분석을 통해 얻을 수 있는 안정상 별 면적 분율을 활용하여 위 경도 예측 식에 의거한 구상흑연주철 합금의 경도를 계산할 수 있었다.

### 3.2 열처리한 구상흑연주철의 미세조직 예측

앞서 설명한 경도 예측 모델을 활용함에 있어, 임의의 조성을 가지는 구상흑연주철 합금의 주조 혹은 열처리 후 안정상 (흑연, 페라이트, 펄라이트) 면적 분율을 예측할 수 있다면, 이를 상기 경도 예측 모델에 적용하여 오로지 계산만으로 주조 혹은 열처리 후 구상흑연주철 합금의 경도를 예측할 수 있다. 특히 구상흑연주철을 임계간 온도 구간에서 충분히

열처리하는 경우, Fig. 1과 같이 흑연 (C), 페라이트 (BCC), 그리고 오스테나이트 (FCC) 상이 안정상으로 존재하며, 각 상의 분율도 열역학 계산을 통해 높은 정확도로 예측할 수 있다. 또한 본 연구에서와 같이 열처리 후 공냉을 통해 합금을 냉각시키는 경우, 열처리 중 생성된 오스테나이트 상이 공냉 후 펄라이트 상으로 온전히 상변태하므로 [13], 임계간 온도 구간 내 특정 온도에서 열역학 계산을 통해 얻은 흑연, 페라이트, 그리고 오스테나이트 상의 분율은 실제 열처리 후 공냉된 구상흑연주철 내 흑연 상, 페라이트 상, 그리고 펄라이트 상의 분율과 유사하다고 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 Table 1의 조성을 가지는 구상흑연주철의 임계간 온도 및 온도 별 안정상 부피 분율을 열역학 계산을 통해 예측하여 열처리한 구상흑연주철 합금의 브리넬 경도 계산에 활용하였다. 열역학 계산에서는 각 상의 면적 분율 계산이 불가능하기 때문에 우선 온도 별 각 평형 상의 부피를 계산한 후, 아래와 같은 간단한 면적-부피 간 상관관계를 가정하여 각 상의 부피를 면적으로 변환하여 경도 예측 모델에 적용하였다.

$$A = V^{2/3} \quad (4)$$

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 열처리 온도에 따른 구상흑연주철의 미세조직 예측

Fig. 3은 임계 열처리 온도에 따른 구상흑연주철의 예칭 후 광학현미경 사진이다. 사진 상으로도 임계 열처리 온도가 증가함에 따라 페라이트 분율은 감소하며 펄라이트 분율은

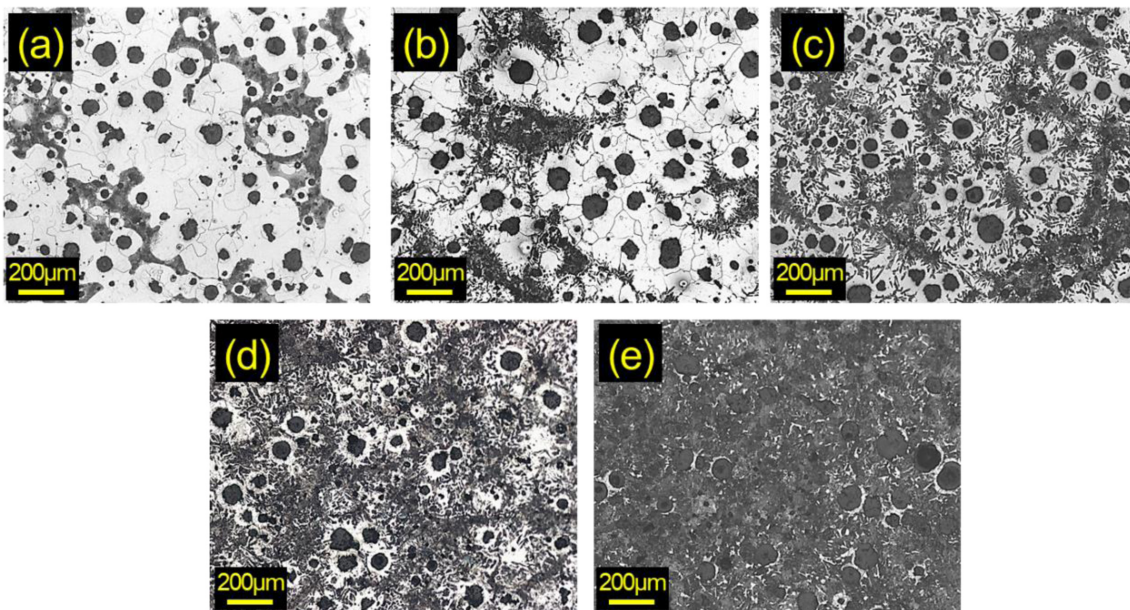


Fig. 3. Optical microscope images of the ductile cast iron at different heat treatment conditions: (a) as-cast, (b) HT1, (c) HT2, (d) HT3, (e) HT4.

Table 3. Microstructure data of the as-cast and heat-treated ductile cast iron.

Condition	$f_G$	$f_a$	$f_p$	Nodularity* (%)	Nodule count* (N/mm <sup>2</sup> )
AC	0.131	0.701	0.168	82.6	55.7
HT1	0.123	0.627	0.248	82.5	78.0
HT2	0.123	0.461	0.416	85.2	58.7
HT3	0.123	0.380	0.494	85.1	45.3
HT4	0.125	0.045	0.830	82.7	53.3

\* Nodularity and nodule count were evaluated by ASTM E 2567

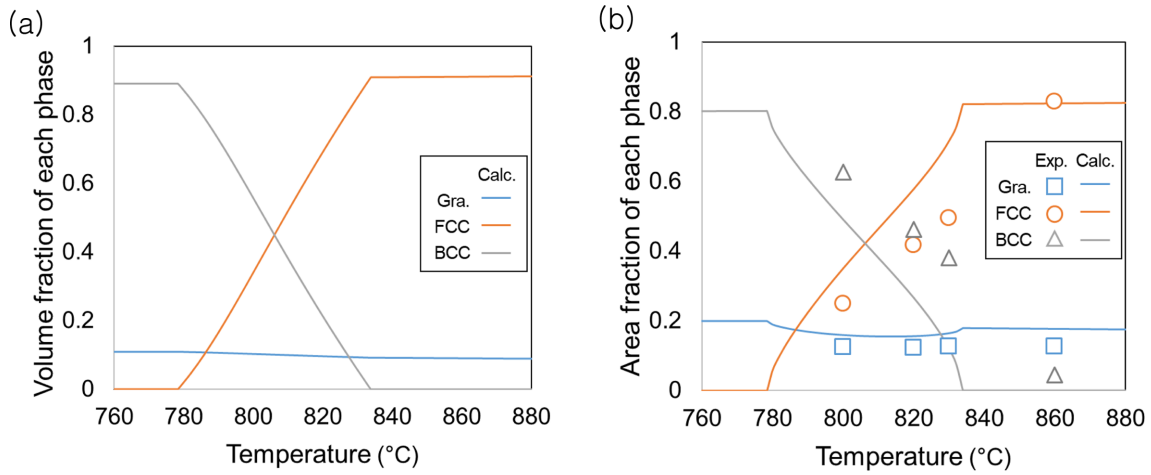


Fig. 4. Calculation result of (a) volume fraction and (b) area fraction of graphite (Gra.), austenite (FCC), and ferrite (BCC) in the ductile cast iron at different temperatures obtained from thermodynamic software. Circle symbols represent area fraction of pearlite in the heat-treated samples.

증가하는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 열처리 온도 별 상분율 변화를 포함하여 흑연 구상화율 및 구상흑연입수 변화를 이미지 분석을 통해 측정된 후 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 이미지 분석 결과, 열처리 조건에 상관없이 흑연 상분율 및 흑연 구상화율은 주방상태에서 거의 변하지 않았음을 확인할 수 있었다. 구상흑연입수는 실험 조건마다 편차가 있었으나, 열처리 조건에 상관없이 거의 변하지 않았다고 판단하였다.

Fig. 4는 열역학 계산을 통해 예측한 온도 별 구상흑연주철의 안정상 부피분율 및 면적 분율을 나타낸다. 실험적으로 확인했던 열처리 온도 별 안정상의 면적 분율 변화와 유사하게, 열역학 계산에서도 열처리 온도가 감소함에 따라 오스테나이트 면적 분율은 감소하고 페라이트 면적 분율은 증가하며, 흑연 면적 분율은 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 계산된 각 상의 면적 분율은 측정값 대비 최소 20% 이상 높거나 낮은 값을 나타내었다. 이러한 측정 값과 계산 값 간의 차이는 열역학 계산에서 얻은 각 상의 부피 값이 가질 수 있는 오차, 그리고 계산된 부피 값을 면적으로 변환하는 과정에서 발생하는 오차에서 발생하는 것으로 추측된다.

#### 4.2 열처리 온도에 따른 구상흑연주철의 경도 예측

열처리 조건 별로 측정된 구상흑연주철의 경도를 Table 4에 나타내었다. 주방상태에서 합금의 경도 값이 가장 낮았으며, 열처리 온도가 증가할수록 브리넬 경도 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열처리 온도 증가에 따라 페라이트 상 대비 경도가 높은 펄라이트의 분율이 점점 증가하기 때문이다. 한편, 합금 조성과 실험적으로 측정된 안정상 면적 분율을 경도 모델 [14]에 적용하여 열처리 조건 별 경도를 계산해 보았으며, 그 결과를 측정된 경도 값과 함께 Fig. 5와 같이 나타내었다. 모델 계산으로 얻어진 경도 예측 값과 실제 측정된 경도 값 간 차이는 최소 3.5에서 최대 11.8 정도로, 경도 예측 모델의 계산 정확도가 상당히 높은 것을 확인할 수 있었다. 이 때 펄라이트 경도 모델 파라미터인  $dT/dt$  값은 3.7 C°/sec였다.

Fig. 6은 열역학 계산으로부터 얻어진 합금 내 안정상의 면적 분율과 브리넬 경도 예측 모델 [14]을 활용하여 계산한 구상흑연주철 합금의 열처리 온도에 따른 브리넬 경도 변화이다. 계산된 브리넬 경도 값은 임계간 온도 구간에서 열처리 온도 증가에 따른 경도 증가 경향을 실험 결과와 유사하게 예측하였으나, 측정된 브리넬 경도 대비 최소 2.5, 최대 27의

Table 4. Brinell hardness (HB) of the as-cast and heat-treated ductile cast iron

AC	HT1	HT2	HT3	HT4
156.8±5.2	174.4±2.4	207.2±4.0	211.7±8.4	257.1±8.8

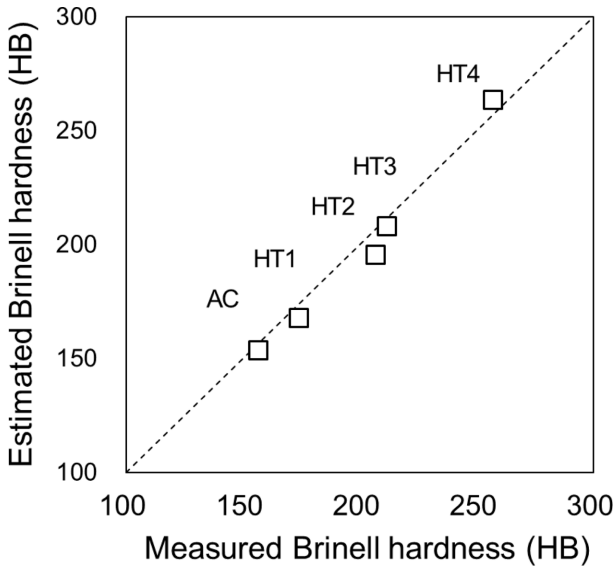


Fig. 5. Calculated Brinell hardness of the ductile cast iron based on the hardness model suggested by Guo et al. [14] compared with experimental data.

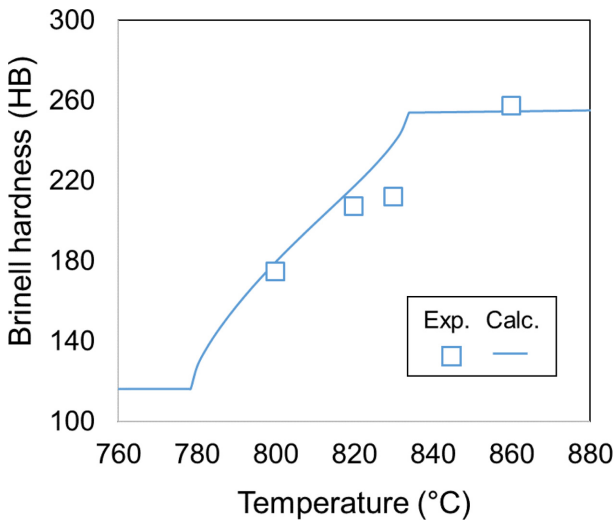


Fig. 6. Calculation results of Brinell hardness based on estimated phase fractions of the ductile cast iron from thermodynamic calculations.

차이를 나타내었다. 측정된 안정상 분율 대비 열역학 계산으로 예측한 상분율이 최소 20%의 오차를 보인 것을 고려했을 때, 열역학 계산으로 얻어진 상분율을 토대로 예측된 경도 값은 상대적으로 준수한 예측 정확도를 보여준다. 만약 특정 조성

및 열처리 조건에서 구상흑연주철의 각 안정상 분율을 더욱 정확하게 예측할 수 있다면 Fig. 5에서 확인한 바와 같이, 높은 정확도로 합금의 경도 예측이 가능할 것으로 보인다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 임계간 온도 범위에서 열처리한 구상흑연주철의 열처리 온도에 따른 물성 예측을 위해, 먼저 인장강도 450 MPa 급 구상흑연주철을 다양한 온도에서 열처리한 후 공냉하여 물성 예측에 필요한 미세조직 및 경도 데이터를 확보하였다. 이후 열역학 계산으로부터 유추한 각 상의 면적 분율과 문헌 [14]에 알려진 경도 예측 식을 활용하여 열처리 온도 별 구상흑연주철의 경도 예측을 시도하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 임계간 온도 구간에서 열처리 온도가 증가할수록 구상흑연주철 내 페라이트 분율은 감소하며, 펄라이트 분율은 증가하였다. 한편 흑연 구상화율 및 구상흑연입수는 열처리 온도에 상관없이, 주방상태에서 측정된 값과 유사하였다. 열역학 계산에서 얻은 부피 분율을 변환하여 예측된 흑연, 페라이트 및 오스테나이트의 면적 분율의 경우, 열처리 온도 별로 측정된 각 안정상의 면적 분율과 그 경향성은 유사하였으나, 측정값 대비 최소 20% 이상 높거나 낮은 값을 나타내었다.

2) 열처리한 구상흑연주철의 브리넬 경도를 측정해본 결과, 임계간 온도 구간에서 열처리 온도가 증가할수록 구상흑연주철의 브리넬 경도는 점점 증가하였다. 한편 측정된 합금 조성 및 각 안정상의 분율, 그리고 합금의 브리넬 경도 예측식 [14]을 활용하여 실험 조건 별 구상흑연주철의 경도 값을 계산해 본 결과, 측정값 대비 최소 3.5에서 최대 11.8 정도 차이가 나는, 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다.

3) 열역학 계산을 통해 얻은 흑연상, 페라이트 상 및 오스테나이트 상 별 부피를 면적으로 간단히 변환하여 구상흑연주철의 경도 예측 모델에 적용해 본 결과, 실제 측정된 경도 대비 최소 2.5, 최대 27의 오차범위에서 경도 값을 예측할 수 있었으며, 열처리 온도 증가에 따른 구상흑연주철의 경도 증가 경향은 경도 예측 결과에서도 유사하게 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가관리원 (KEIT)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다 (20014761, “고형상능 구현을 위한 용탕 급속충진 및 회전속도 가변형 특수주조 시스템 개발”).

### References

[1] E.P. Yoon and Y.H. Lee, J. Korea Foundry Society, 2(1) (1982) 2.

- 
- [2] H.S. Choi and S.W. Kim, *J. Korea Foundry Society*, **9**(6) (1989) 463.
- [3] Y.B. Kim, .C.G. Kim and C.O. Choi, *J. Korea Foundry Society*, **10**(3) (1990) 235.
- [4] J.Y. Kim and H.Y. Ra, *J. Korea Foundry Society*, **10**(3) (1990) 225.
- [5] Y.J. Choi, B.Y. Lee, H.M. Kwon, S.H. Baek and Y.J. Park, *J. Korea Foundry Society* **14**(1) (1994) 75.
- [6] Y.J. Park, Y.J. Choi, I.S. Park, Y.H. Kim and H.S. Lee, *J. Korea Foundry Society*, **15**(6) (1995) 558.
- [7] K.H. Choel, G.S. Cho, K.W. Lee and K.Y. Kim, *J. Korea Foundry Society*, **24**(1) (2004) 52.
- [8] J.J. Park, G.S. Seo and H.W. Kwon, *J. Korea Foundry Society*, **28**(6) (2008) 273.
- [9] H.M. Kim, M.Y. Kwon, B.C. Chun, D.Y. Kwon, G.Y. Kim and H.W. Kwon, *J. Korea Foundry Society*, **40**(2) (2020) 25.
- [10] H.S. Bang, S.J. Kim, S.Y. Song and M.S. Kim, *J. Korea Foundry Society*, **41**(5) (2021) 411
- [11] Dix, L.P., Ruxanda, R., Torrance, J., Fukumoto, M. and Stefanescu, D. M., *AFS Trans.*, **111** (2003) 1149
- [12] Tartaglia, J. M., Gundlach, B. R. and Goodrich, G. M., *Int. J. Metalcast.*, **8** (2014) 7
- [13] Stefanescu, D.M., “*ASM Handbook: vol. 1A Cast Iron Science and Technology*”, ASM International, OH (2017) 256-261.
- [14] Guo, X., Stefanescu, D. M., Chuzhoy, L., Pershing, M. and Biltgen, G.L., *AFS Trans.*, **105** (1997) 47.
- [15] Venugopalan, D. and Alagarsamy, A., *AFS Trans.*, **98** (1990) 395.
- [16] Yu, S. K. and Loper Jr., C. R., *AFS Trans.*, **96** (1988) 811.
- [17] Svensson, I. L., Wessen, M. and Gonzalez, A., *Proceedings of Modeling of Casting; Welding and Advanced Solidification Process VI*, TMS, (1993) 29-36.
- [18] Biswas, S., Monroe, C. and Prucha, T., *Int. J. Metalcast.*, **11**(4) (2017) 656.