

오스템퍼드 구상흑연주철의 Processing Window에 미치는 오스테나이징 조건 및 주석의 영향

권민영¹ · 백승훈¹ · 윤동근¹ · 김민준¹ · 김동주² · 권해욱³ · 고영건^{3,#}

Effects of Austenitization and Sn Addition on Processing Window of Austempered Cast-iron

M. Y. Kwon, S. H. Baek, D. K. Yoon, M. J. Kim, D. J. Kim, H. W. Kwon, Y. G. Ko
(Received January 20, 2021 / Revised January 27, 2021 / Accepted January 28, 2021)

Abstract

The present study demonstrated the effects of processing variable and alloying elements on the processing window of austempered cast iron, one of the heat-treatable cast irons, in order to elucidate the relation between heat treatment and microstructure in terms of time and temperature. Such microstructure is strongly affected by austenitizing conditions and alloying elements. The size of processing window tends to increase initially with increasing austenitizing temperature from 1123 to 1173 K, followed by a decline in the reverse direction between 1173 and 1223 K. Thus, the optimized processing window with large frame was found at an austenitizing temperature of 1173 K. To determine the effect of Sn addition, the processing window in the sample was created by the addition of 0.08 wt.% Sn, which appeared larger than that without Sn and with 0.06 wt.% Sn.

Keywords: Cast-iron, Processing Window, Austenitization, Sn

1. 서 론

오스템퍼드 구상흑연주철(austempered cast-iron)은 고온 용해 시 용해성 합금원소 첨가 후 조직 열처리를 수행한 주철이다. 오스템퍼드 구상흑연주철을 얻기 위해서는, 이전 열처리 시 오스테나이트가 페라이트로 분해되는 것을 지연시키기 위해 용탕 내 니켈, 몰리브덴 혹은 구리 등과 같은 용해 촉진형 합금원소를 첨가한다[1]. 그리고 오스템퍼링이라고 하는 후-열처리를 수행함으로써 페라이트와 잔류 오스테나이트로 구성된 오스테라이트 혼합조직을 제어한다. 이와 같은 미세조직 구성으로 인해 오스템퍼드 구상흑연주철은 우수한 기계적 성질을 가지며 여러

부품소재산업 분야에 중요한 구조용 소재로 사용된다[2]. 통상적인 오스템퍼링 열처리 스케줄은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 이때 오스템퍼드 구상흑연주철을 제어하는데 필요한 최적 열처리 구간을 프로세싱 윈도우(processing window)라고 한다. 프로세싱 윈도우 구간은, 오스테나이트가 안정 및 불안정 상으로 분리되는 1단계 반응이 시작하는 점과 탄화물이 석출되는 2단계 반응 사이의 구간이며 이 영역에서는 우수한 기계적 성질 갖는 오스템퍼드 구상흑연주철을 제어할 수 있다[3].

오스템퍼링 시 오스테나이트화 처리 온도 및 시간이 달라짐에 따라 프로세싱 윈도우가 상이해지는데 이는 오스테나이트화 온도와 시간에 따라 기지 내에 고용된 탄소 혹은 미량 합금원소 함량이 달라지기 때문이다. 가령, 구상흑연주철에 구리 혹은 니켈 등 합금원소를 첨가하면 프로세싱 윈도우는 넓어진다.

1. 영남대학교 신소재공학과, 석사과정

2. ㈜세아메카닉스 기업부설연구소, 연구소장

3. 영남대학교 신소재공학과, 교수

Corresponding Author : School of MSE, Yeungnam University,
E-mail: younggun@ynu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-0172-4700

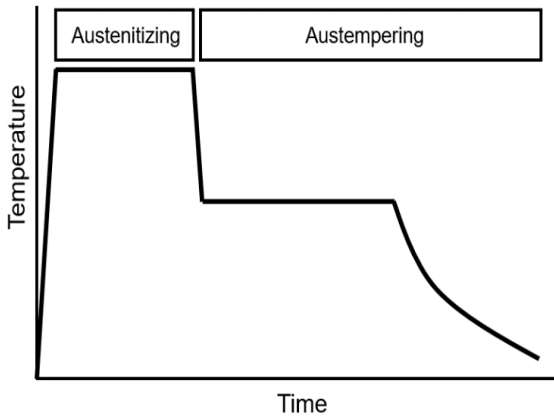


Fig. 1 Two-step process comprising austenitizing and austempering steps in a sequential manner

이들 합금원소가 구상흑연주철의 기지 중 펄라이트 분율을 상대적으로 증가시켜 오스테나이트 기지 내로 고용되는 탄소 확산거리가 짧아지고 고용량을 증가시키므로써 오스테나이트를 안정화시키기 때문이다[4,5]. 하지만 현재까지 주석 첨가 영향을 연구한 결과가 보고된 바 없기 때문에 본 연구에서는 균질화 변수 및 주석 영향에 관해 살펴보고 산업적으로 의미 있는 오스템퍼드 구상흑연주철을 제조하기 위한 최적조건을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 자체 제작한 75 kW 용량의 고주파 유도로를 사용하여 용해하였다. 용탕 조성은 다음과 같은 목표로 하여 용해공정을 수행하였다. 목표 탄소 함량을 3.75 wt.%로 고정하고 주물선과 강 고철을 투입하여 용해하였으며, 최종 주조품 내 규소의 목표 함량을 2.65 wt.% 하여 기본 용탕에서 2.15 wt.% 목표로 용해 후 구상화 처리 시 0.5 wt.% 접종 처리를 수행하였다. 용탕 온도가 1803 K 에 도달했을 때, 0.04 wt.% 정도의 마그네슘 함량을 얻기 위해 용탕에 5.0 wt.% Mg-Fe-Si 합금을 플런징 구상화처리 하였다. 접종제는 직경이 약 1.0~3.0 mm 크기를 갖는 입자형 Ba-Fe-Si 합금을 사용하였다.

접종 처리 후 용탕 온도를 측정하였으며 주입온도는 1683~1703 K 범위에서 일정하였다. 또한 구리 판 위에 놓여있는 시편 금형에 용탕을 주입하여 화학

조성 분석용 시편을 얻었다. 주형에 주입된 용탕이 완전히 응고하고 상온으로 생각한 후 탈사하여 최종 실험용 시편을 얻었다.

3.3 kW 용량의 박스로를 이용하여 오스테나이트화 처리하고 7.80 kW 용량의 염욕로를 통해 오스템퍼링 처리를 수행하였다. 염욕은 NaNO₃와 KNO₃를 45 대 55의 중량비로 혼합하였고 오스테나이트화 처리 후 시편을 염욕로에서 냉각하여 오스템퍼링 처리를 수행하였다. 이때 오스템퍼링 온도는 548~705 K 로 진행하였다. 한 차례 열처리 시 6개 시편을 동시에 오스테나이트화 및 냉각 후 안정화 되기까지 등은 유지하고 각 시편을 염욕로에서 방출시켜 자연 냉각하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 프로세싱 윈도우에 미치는 오스테나이트화 처리 온도 영향

프로세싱 윈도우 구역 넓이에 미치는 오스테나이트화 처리 온도 영향은 아래 Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 오스테나이트화 처리온도가 증감함에 따라 증가 후 감소하였다. 우선적으로 오스테나이트화 처리온도가 1123 에서 1173 K 로 증가함에 따라 프로세싱 윈도우 구간이 대폭적으로 증가한 반면 오스테나이트화 처리 온도가 이 후 1223 K 까지 증가할 때 오히려 급격하게 감소하는 경향이 관찰되었다.

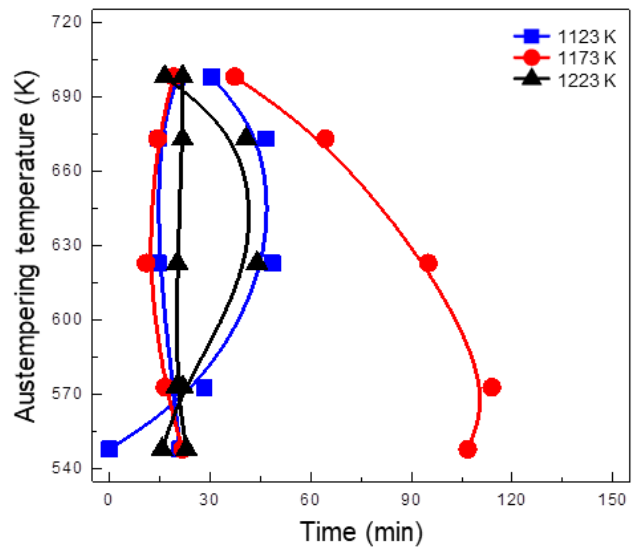


Fig. 2 Effect of austenitizing temperature on processing window of austempered cast-iron

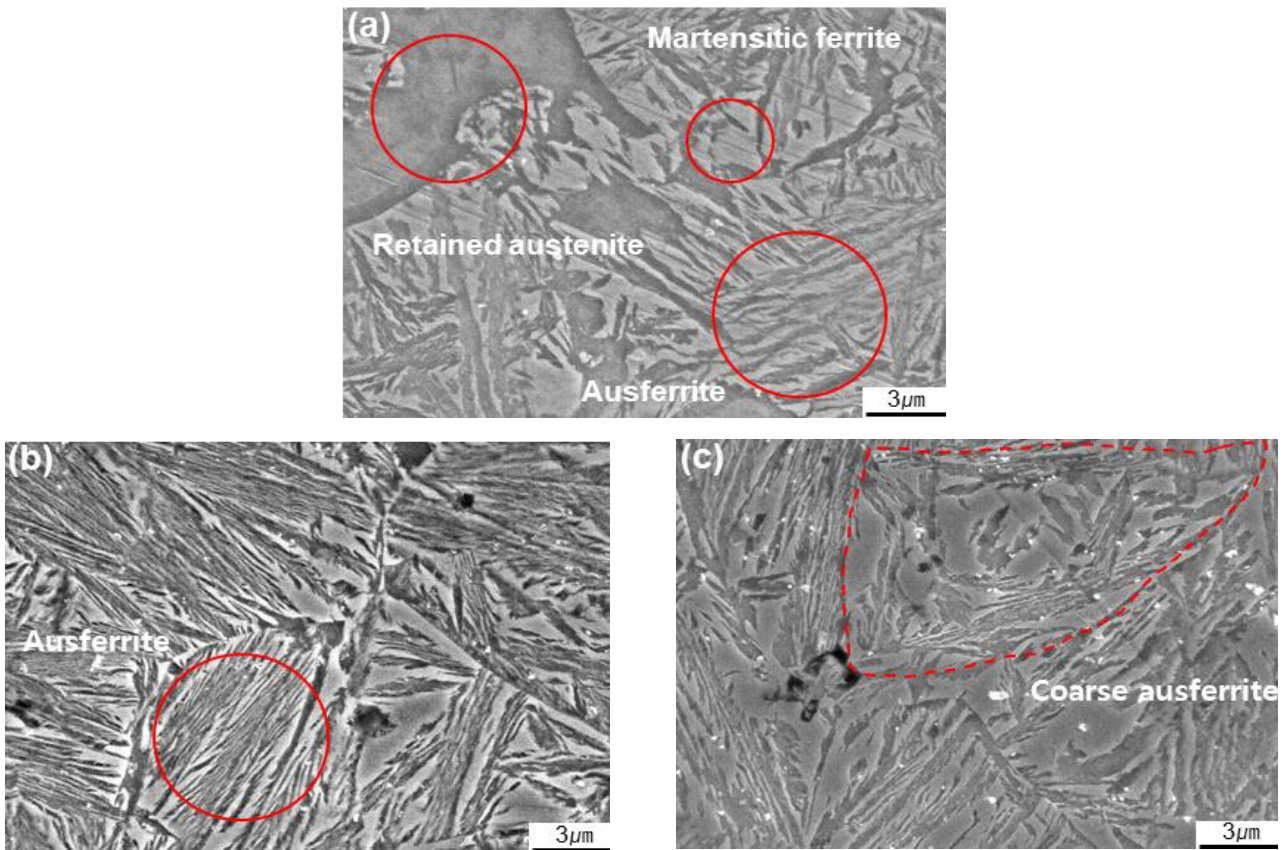


Fig. 3 SEM microstructures showing the morphologies of austempered cast-iron with respect to austenitizing temperatures of (a) 1123, (b) 1173, and (c) 1223 K for 1 h

세가지 오스테나이징 온도 조건에서 실험한 세가지 시편을 623 K 에서 1 시간 동안 오스템퍼링 처리를 수행하였으며 이에 대한 주사전자현미경 미세조직 결과를 Fig. 3 에 제시하였다. 본 실험에서 비교적 안정적인 processing window 구간이 형성되는 623 K 조건에서 오스테나이트화 온도가 낮을 경우 상대적으로 잔류 오스테나이트가 확연히 관찰되었으며 분율을 역시 다른 조건에 비해서 높았다. 반면 오스테나이징 온도가 상승할 경우 오스템퍼링 조건에서 조대한 ausferrite 조직이 관찰되었다. 이는 오스테나이징 온도가 높을수록 이전 오스테나이트(prior-austenite) 크기가 커진다고 알려져 있기 때문이다.

오스테나이트화 처리 온도가 1123 K 일 때, 오스템퍼링 온도가 548 K 로 낮을 경우 잔류 오스테나이트 형성이 힘들기 때문에 Fig. 2 의 왼쪽 하단처럼 구간 내 역전(cross-over) 현상이 발생하여 안정적인 프로세싱 윈도우를 얻을 수 없었다[6]. 오스테나이트화 처리온도가 1173 K 까지 증가함에 따라 잔류 오스테

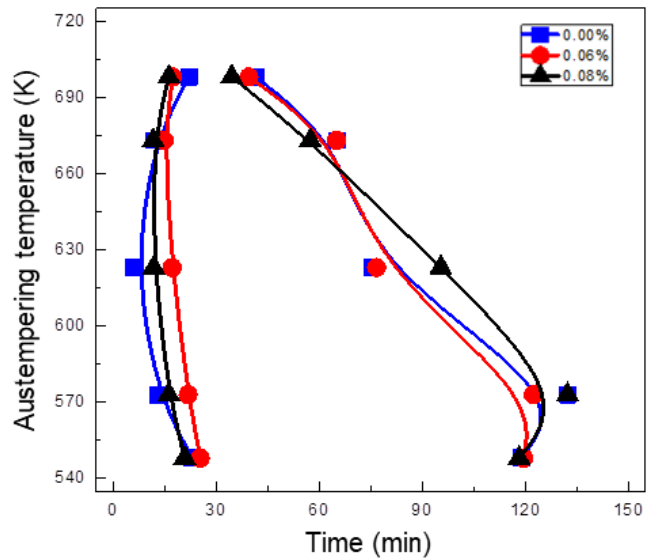


Fig. 4 Effect of Sn addition on processing window of austempered cast-iron. Its change in region was smaller than austenitizing temperature

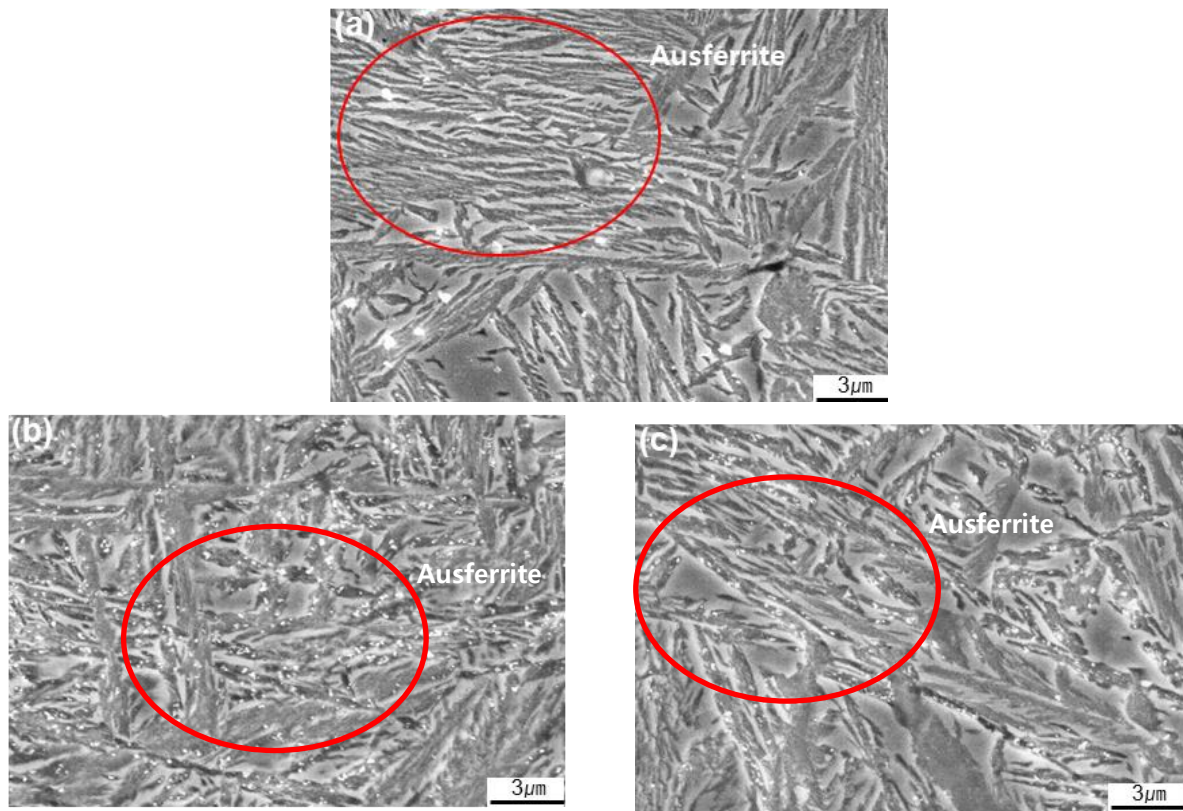


Fig. 5 SEM microstructures showing the morphologies of austempered cast-iron with Sn additions of (a) 0.0, (b) 0.04, and (c) 0.08 wt.% at 1173 K for 1 h

나이트 분율이 증가하였으나 1223 K 로 증가하면서 오히려 감소하였다. 이 역시 오스테나이트화 처리 온도가 1123 에서 1173 K 로 증가함에 따라 오스테나이트 기지 내부에 고용된 탄소 함량이 증가하여 오스테나이트가 안정화되었기 때문으로 판단된다. 오스테나이트화 처리 온도가 1223 K 로 증가하면 오스테나이트 기지 내 고용된 탄소가 대체적으로 구상흑연 쪽으로 업힐 확산(up-hill diffusion)이 발생하여 불안정 오스테나이트 분율이 점차적으로 증가한다. 이 때 오스템퍼링 1 단계 반응이 발생하는 시작점이 지연됨으로써 전반적인 프로세싱 윈도우 구역이 줄어든다. 이는 오스테나이트화 온도가 1173 에서 1223 K 로 높아지면 탄소 농도가 다소 낮은 불안정 오스테나이트의 분율이 증가하고 상대적으로 안정 오스테나이트의 분율이 감소하였기 때문으로 판단된다[7]. 프로세싱 윈도우 형성에 미치는 주석 첨가 영향을 살펴보기 위해 프로세싱 구역이 가장 넓은 조건인 1173 K 및 1 시간 조건에서 유지한 후 실험하였다.

3.2 프로세싱 윈도우에 미치는 주석의 첨가량 영향

프로세싱 윈도우에 미치는 주석 첨가량의 영향은 Fig. 4 에 제시하였다. 1 단계 반응 시작점은 주석 함량이 0.06 wt.%까지 증가함에 따라 단순하게 증가한 반면 0.08 wt.%까지 증가함에 따라 다소 감소하였다. 2 단계 반응 시작점은 주석 첨가량이 0.08 wt.%까지 증가함에 따라 상대적으로 유사하게 관찰되었다.

Fig. 5에서는 주석 첨가량에 따른 세 조건의 미세조직 변화이다. 이때 오스템퍼링 조건으로 조직변화가 수반되는 623 K 및 1시간 열처리를 적용하였다. 안정구간이 관찰되는 623 K 조건에서의 오스테나이트링 효과를 볼 때 주석의 함량 증가는 ausferrite 패킷 크기보다는 조대화에 더 영향을 주는 것으로 생각된다. 하지만 그림 3과 비교할 때는 그 차이는 상대적으로 작은 것으로 생각된다. 우선적으로 주석 첨가량에 따른 잔류 오스테나이트 분율 변화는 주석 함량이 0.06 에서 0.08 wt.%까지 증가함에 따라 혹은

오스테퍼링 온도가 증가함에 따라 증가하였다. 이는 주석 첨가량이 증가함에 따라 주석은 오스테나이트 내에 고용된 탄소의 확산을 방해하며 이로써 기저조직 내 국부적인 탄소 함량 증가로 예측되므로 상대적으로 안정 오스테나이트 분율이 증가하였기 때문으로 생각된다[8]. 따라서 광범위한 구역을 갖는 프로세싱 윈도우는 주석 함량이 0.08 wt.% 일 경우 관찰되었다. 하지만 본 연구의 주요한 두 가지 변수 중 오스테나이트 온도 오스테퍼링 구역을 결정하는 데 있어 주석 함량에 효과에 비해 더욱 결정적인 요소임을 확인하였다.

4. 결론

오스테퍼드 구상흑연주철의 프로세싱 윈도우에 미치는 공정 변수 및 주석 첨가량 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

오스테나이트화 처리 온도가 1123 에서 1173 K 로 증가함에 따라 프로세싱 윈도우 구간이 크게 증가하였으나 이상의 조건에서는 오히려 크게 감소하였다. 산업적으로 유의미한 최대 프로세싱 윈도우 구간은 오스테나이트 온도 1173 K 일 경우 도출되었다. 한편, 주석 함량의 효과는 오스테나이트화 처리 효과에 비해서 상대적으로 약하지만 동일 오스테나이트화 조건에서 비교할 때 최대 프로세싱 윈도우 구역은 주석 함량이 0.08 wt.% 일 경우 관찰되었다. 이는 주석 원소가 주철 내 탄소의 확산을 방해함으로써 상대적으로 안정한 오스테나이트 분율 증가에 기인한 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] A. Alagarsamy, 1992, Ductile Iron Handbook, American Foundrymen's Society, pp. 323~378.
- [2] A. Nazarboland, R. Elliott, 1997, Influence of Heat Treatment Parameters on Stepped Austempering of 0.37%Mn-Mo-Cu Ductile Iron, Mater. Sci. Tech. Vol. 13, pp. 223~232.
<https://doi.org/10.1179/026708397790302467>
- [3] D. C. Wen, T. S. Lei, 1999, Influence of Tempering on the Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron, Mater. Trans. Vol. 40, No. 9, pp. 980~988.
<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.980>
- [4] N. Darwish, R. Elliott, 1993, Austempering of Low Manganese Ductile Irons-Processing Window, Mater. Sci. Tech. Vol. 9, pp. 572~602.
<https://doi.org/10.1179/026708393790172286>
- [5] G. Krauss, 1990, Steels: Heat Treatment and Processing Principles, ASM International, pp. 182~210.
- [6] M. Delia, M. H. Alaalam, M. Grech, 1998, Effect of Austenitizing Conditions on the Impact Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Ferritic Matrix Structure, J. Mater. Eng. Perform. Vol. 7, No. 6, pp. 265-272.
<https://doi.org/10.1361/105994998770348007>
- [7] A. S. Hamid Ali, R. Elliott, 1996, Austempering of an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron Part 1-Austempering Kinetics and Processing Window, Mater. Sci. Tech. Vol. 12, No. 8, pp. 679~690.
<https://doi.org/10.1179/mst.1996.12.8.679>
- [8] H. Bayati, R. Elliott, G. W. Lorimer, 1995, Influence of Austempering Temperature on Austempering Kinetics of High Manganese Alloyed Ductile Cast Iron, Mat. Sci. Tech. Vol. 11, No. 8, pp. 776~786.
<https://doi.org/10.1179/mst.1995.11.8.776>