

## 내부경화형 구상흑연주철 롤의 미세조직과 경도에 미치는 열처리의 영향

### Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of Internally Hardened Ductile Cast Iron Roll

이상목<sup>1</sup>, 김도훈<sup>2</sup>, 윤서현<sup>3\*</sup>

Sang-Mook Lee<sup>1</sup>, Do-Hoon Kim<sup>2</sup>, Seo-Hyun Yun<sup>3\*</sup>

#### 〈Abstract〉

This study was investigated the effect of heat treatment on the microstructure and hardness of internally hardened ductile cast iron roll. The following conclusions were obtained. Some of the graphite was decreased and a bainite was produced by heat treatment. It decreased due to the decomposition of some of the cementite precipitated in the as-cast by heat treatment, but there was no significant change when it reached a certain depth. Hardness increased due to formation of bainite by heat treatment. On the surface, the hardness decreased due to the decrease in the amount of transformation of cementite into bainite, but there was no change beyond a certain depth.

*Keywords : Bainite, Cementite, Ductile Cast Iron, Graphite, Hardness, Heat Treatment, Volume Fraction*

1 부경대학교 재료공, 대학원생

2 ㈜트레스 기업부설연구소, 연구원

3\* 한국폴리텍대학 창원캠퍼스 금형시스템과, 교수  
E-mail: fudal1115@kopo.ac.kr

1 Graduate Student, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

2 Researcher, Institute of Technology, TRES Co., Ltd.

3\* Professor, Dept. of Die Mold System, Changwon Campus of Korea Polytechnics

## 1. 서론

구상흑연주철은 용탕에 Ce, Mg, Ca 등을 첨가하여 주철 중의 흑연을 구상화시킨 것이다. 이것은 우수한 주조성, 연성 및 인성을 지니고 있다. 주조 상태에서 구조용강과 주강에 가까운 성질을 나타낼 뿐만 아니라 제조원가가 저렴하여 산업기기, 자동차 부품 및 대형 롤 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 특히 내마모성이 요구되는 부품 등에 유효하게 사용되고 있다[1]. 그러나 구상흑연주철은 응고 범위가 넓고, 주조 공정 중 냉각속도가 상대적으로 늦어 미세조직을 제어하기가 어려운 문제점 등이 있다[2-4]. 또한, 구상흑연주철은 강과는 달리 비금속인 흑연이 기지 내에 불규칙한 상태로 존재하기 때문에 마모양상이 복잡하여 내마모성이 기지조직인 흑연조직과 공정조직 등에 따라 크게 달라진다[5-8]. 따라서 내마모성 등이 요구되는 여러 산업 분야 등에 폭넓게 사용하기 위해서는 아직도 이에 관련된 다양한 연구가 필요하다.

현재 철강의 압연 롤 등에 사용하고 있는 구상흑연주철로 제조된 고온 열처리용 DCI 롤(specially heat-treated high strength graphite Iron; 이하 SHGI 롤이라 한다)은 내마모성이 낮고, 압연 시 발생하는 크랙의 전파속도가 빠를 뿐만 아니라 대형 롤은 편마모와 크랙에 의한 절손이 발생하고 있다. 특히 기존의 SHGI 롤은 사용 중 심부 V형 하단부에 높은 압연 부하로 인한 마모가 집중적으로 발생함에 따라 롤 수명이 짧고, heat-crack 및 충격에 대한 저항이 낮아 절손사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이로 인하여 열간 압연재의 표면 및 치수의 균일성이 저하하고, 또한 잦은 롤의 교체로 인한 생산성 저하가 크게 발생한다. 이것은 롤의 재사용을 위한 심부 가공량이 많아지게 되어 가공시간 및 가공비 상승과 더불어 롤 소모량 증가 등으로 인하여 철강 압연업계의 경쟁력이 크게

저하하는 요인이 되고 있다. 따라서 이러한 여러 문제점을 개선할 수 있는 롤 개발이 필요하고, 그 방법의 하나가 내부경화형 DCI롤을 개발하여 사용하는 것이라 판단된다[9].

따라서 본 연구에서는 압연 시 대형 롤의 크랙 전파속도를 억제하고, 단점인 편마모와 크랙에 의한 절손을 방지하기 위한 내부 경화능 강화형 DCI 롤을 개발하는데 필요한 자료를 얻기 위해 수행하였다. 기존의 고온 열처리용 DCI 롤 (SHGI 롤)에 비하여 소지금속의 경도를 높이고 내부의 결정립 크기를 줄여서 내마모성을 높이는 동시에 흑연과 탄화물의 체적분율을 조절하고 기지조직도 변화시켰다. 경화능 강화형 구상흑연 주철은 열처리하여 흑연과 탄화물 등의 체적분율, 크기 및 공정 조직 그리고 경도 등을 변화시킨 다음 이들에 미치는 열처리의 영향을 조사하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1 시료 구조

본 연구에서는 Table 1에 나타난 화학조성의 구상흑연주철은 유도로에서 용해하여 을 주조하였다. 이것을 1450°C 온도에서 구상화제인 Ni-Mg가 0.8 wt.%가 들어있는 레이들에 출탕하여 폭발시킨 후, Bi 집중제 0.3 wt.%를 투입하였다. 또한, 이때 용탕 교반에 의한 집중반응을 위하여 레이들 하부로부터 아르곤을 3kg/mm<sup>2</sup>로 약 1분간 공급하면서 충분히 교반하여, 폐딩현상을 막기 위하여 9분 이내에 용탕온도를 1375°C로 하여 주입하여 제작하였다. 한편,

Table 1. Chemical composition of specimen (wt.%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Mg
3.35	2.01	0.40	2.22	0.37	0.21	0.09

이때 주형은 롤의 형상과 같이 직경 350mm, 길이 600mm 크기의 네크와 두께 180mm, 내경 700mm 및 길이 700mm 크기의 동체를 갖는 사형으로 만들었고, 롤 동체에 해당되는 부분은 금형으로 주조하였다. 이것을 이후 주조시료라 부르기로 한다.

## 2.2 열처리

열처리는 주조시험편을 전기 대차로에서 980°C까지 가열하여, 0.8h/inch 유지한 다음 mist와 공기로 혼합된 매체를 사용하여 480~500°C로 쿨링 후, 530°C에서 0.5h/inch 유지하는 템퍼링처리를 하였다. 이것을 이후 열처리시료라 부르기로 한다. 이때 사용한 열처리의 선도를 Fig. 1에 나타내었다.

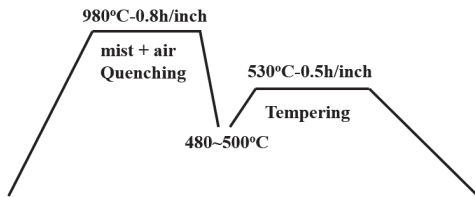


Fig. 1 Cycle of heat treatment

## 2.3 미세조직 관찰

미세조직 관찰은 주조 및 열처리시료에서 동체 중앙에 해당되는 부분의 시료를 채취하여 통상의 연마와 정마과정을 거친 다음 부식하여 광학현미경을 사용하여 관찰하였다. 흑연 및 시멘타이트 등의 체적분율 및 구상화율은 화상분석시험기 및 구상화율측정기로 각각 5회 측정하여 평균값을 사용하였다.

## 2.4 경도 측정

경도 측정은 쇼어 경도기를 사용하여, 시료의

표면에서 중심부로 20mm 간격으로 측정하였다. 경도는 5회 이상 측정하여 평균하여 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

Fig. 2는 금형에 의해 빠른 속도로 응고된 주조시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 흑연이 90% 이상 구상화되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 기지조직은 퍼얼라이트와 페라이트 조직에 소량의 시멘타이트 조직이 존재하고 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 내부경화형 구상흑연주철의 미세조직에

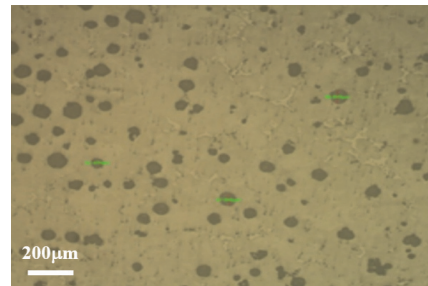


Fig. 2 Optical microstructure of ductile cast iron

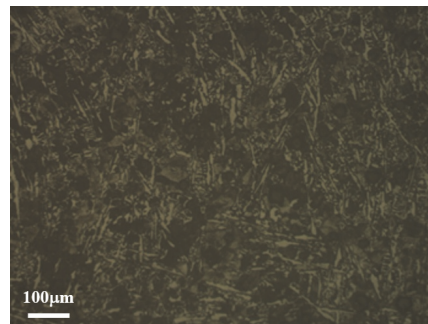


Fig. 3 Optical microstructure of heat treated ductile cast iron

미치는 열처리의 영향을 조사하기 위하여 주조시료를 Fig. 1과 같이 열처리한 열처리시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 열처리로 기지 조직인 펄라이트와 페라이트의 일부가 베이나이트 조직으로 변태하여, 베이나이트 조직이 존재하고 있는 것을 확인할 수 있다[10].

### 3.2 체적분율 변화에 미치는 열처리의 영향

Fig. 4는 롤 형상으로 주조된 주조시료의 표면에서 깊이에 따른 흑연 크기를 조사하여 나타낸 것이다. 흑연의 크기는 표면에서 내부로 들어가면서 직선적인 비례관계로 비교적 빠른 속도로 증가

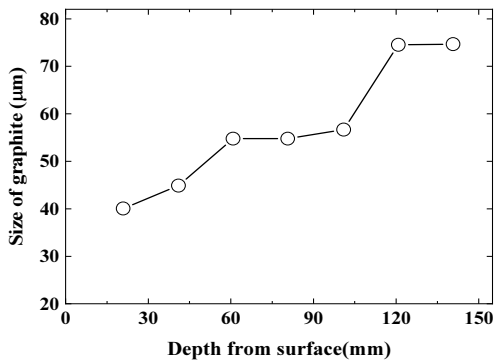


Fig. 4 Size of graphite for depth of ductile cast iron

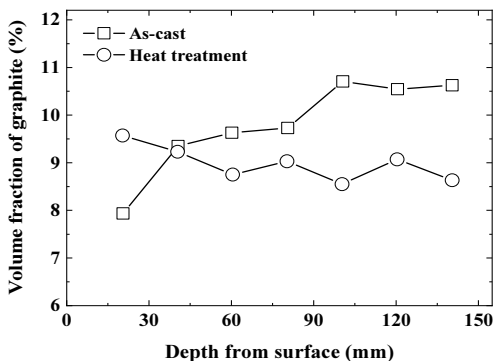


Fig. 5 Effect of heat treatment on the volume of graphite for depth

하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 이유는 표면에서 중심부로 갈수록 냉각속도가 느리기 때문이다. 따라서 상대적으로 흑연의 성장이 일어나는 시간이 길어지기 때문이라 판단된다[11].

Fig. 5는 시료의 표면에서 내부로 140mm 깊이까지 흑연의 체적분율 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 주조시료는 표면에서 내부로 갈수록 흑연의 체적분율이 서서히 증가하는 경향을 나타내고, 열처리시료는 반대로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 주조시료는 열처리시료보다 흑연량이 약간 많은 것을 알 수 있다. 이와 같이 주조시료는 내부로 갈수록 흑연량이 증가하는 이유는 중심부로 갈수록 냉각속도가 느려져 상대적으로 시멘타이트의 석출보다 흑연화가 많이 일어날 뿐만 아니라, 성장도 크게 일어나기 때문이라 판단된다. 이에 반하여 열처리시료는 내부로 갈수록 흑연량이 적어지기 때문이다. 흑연량이 적어지는 이유는 흑연에 존재하던 탄소가 열처리하는 동안 기지로 확산되기 때문에 상대적으로 체적분율이 낮아졌다고 판단된다[11].

Fig. 6은 열처리시료의 시멘타이트양을 표면에서 내부로 140mm 깊이까지 조사하여 나타낸 것이다. 주조시료는 표면에서 내부로 갈수록 시멘타이트의 체적분율이 빠르게 감소하다 특정 깊이 이상이 되면 큰 변화 없는 것을 알 수 있다. 이에

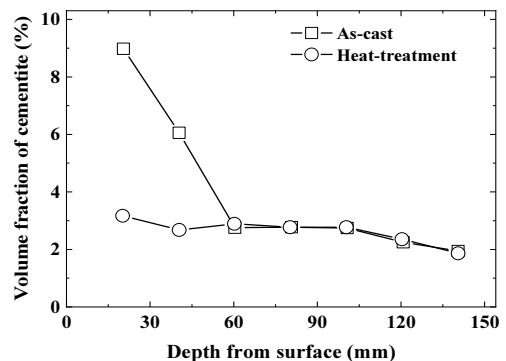


Fig. 6 Effect of heat treatment on the volume of cementite for depth

반하여 열처리시료는 표면에서부터 큰 변화가 없는 비슷한 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 주조시료는 표면에서 냉각속도가 빨라 흑연화가 잘 일어나지 않고 시멘타이트가 석출되고, 내부로 갈수록 냉각속도가 느리므로 석출되는 시멘타이트 양이 적어진다. 그러나 특정 깊이 이상이 되면 냉각속도 크게 느려져 흑연화가 지배적으로 석출되는 시멘타이트양은 적다[11]. 이에 반하여 열처리시료는 표면에서 중심부로 깊어져도 시멘타이트양이 큰 차이가 없다. 이것은 주조시료에서 급랭으로 석출된 시멘타이트가 열처리로 분해되고, 이때 생성되는 베이나이트에 고용되기 때문이라 판단된다. 또한, 특정 깊이 이상이 되면 주조시료나 열처리시료에서 시멘타이트양이 비슷한 것을 알 수 있다. 이것은 깊이에 따른 냉각속도 등의 영향이 같기 때문이다.

Fig. 7은 열처리시료의 표면에서 내부로 140mm까지 베이나이트양을 조사하여 나타낸 것이다. 표면에서 내부로 갈수록 베이나이트 조직의 체적분율이 빠르게 감소하다 특정 깊이 이상에서 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 거동은 Fig. 6에서 나타낸 주조시료에서 존재하는 시멘타이트 양 변화와 같은 것을 알 수 있고, 주조시료에서 존재하던 시멘타이트가 분해되어 열처리로 생성되

는 베이나이트에 고용되기 때문이라 판단된다. 이상의 결과로부터 주조시료에서 존재하던 시멘타이트가 열처리로 일부 분해되어 생성되는 베이나이트에 고용되고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.3 경도에 미치는 열처리의 영향

Fig. 8은 주조시료와 열처리시료의 경도를 표면에서 내부로 140mm까지 조사하여 나타낸 것이다. 두 시료의 경도는 표면에서 중심부로 갈수록 감소하다 특정 깊이 이상이 되면 큰 변화 없는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 Fig. 6과 7의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 표면에서 중심부로 갈수록 주조시료에서 시멘타이트양이 적어지고 있고, 열처리시료에서 베이나이트양이 적어지기 때문이다. 즉, 특정 깊이 이상에서 두 시료는 시멘타이트와 베이나이트양이 크게 변화되지 않기 때문이라 판단된다.

한편 시료의 표면에서 중심부까지 열처리시료가 주조시료보다 경도가 약간 높은 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 주조시료에서 기지조직을 이루고 있는 펄라이트와 페라이트 및 시멘타이트의 일부가 열처리로 경도가 높은 베이나이트 조직으로 변태되었기 때문이라 판단된다[8,12].

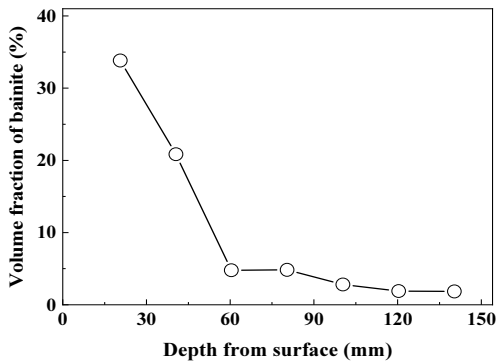


Fig. 7 Volume of bainite for depth of heat treated ductile cast iron

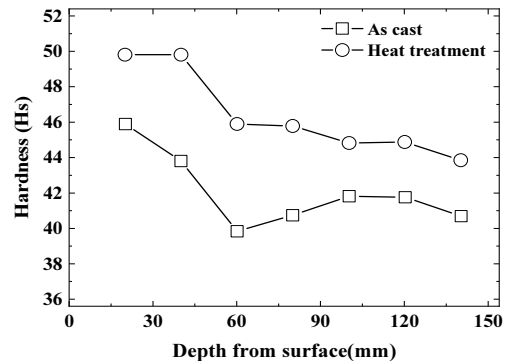


Fig. 8 Effect of heat treatment on hardness by depth

## 4. 결론

본 연구는 내부 경화형 구상흑연주철의 경도 및 미세조직에 미치는 열처리의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주조시료는 흑연이 90% 이상 구상화되어 있으며, 조직은 펄라이트와 페라이트 조직에 소량의 시멘타이트 조직이다.
- (2) 열처리시료는 펄라이트와 페라이트의 일부가 베이나이트 조직으로 변태하였다.
- (3) 주조시료는 내부로 갈수록 흑연의 체적분율이 증가하는 경향이지만, 열처리시료는 약간 감소하였다.
- (4) 시멘타이트량과 베이나이트양은 열처리로 일부가 분해되어, 표면에서는 감소하지만, 특정 깊이 이상이 되면 큰 변화가 없었다.
- (5) 열처리시료의 경도는 베이나이트가 생성되어 주조시료보다 높았다.

## 참고문헌

- [1] W. S. Shin, S. W. Baek, and Y. J. Kim, "Effect of Sn addition on the microstructure and friction-wear properties of a nodular graphite cast iron," *Korean J. Met. Mater.*, vol. 60, no. 6, pp. 471-477, (2022).
- [2] S. M. Lee, H. C. Shin, J. S. Shin, and B. M. Moon, "Control of abnormal graphite structure in heavy section ductile cast iron," *Journal of Korea Foundry Society*, vol. 25, no. 1, pp. 40-49, (2005).
- [3] F. Binczyk, A. Kowalski, and J. Furmanek, "The effect of cooling rate on the microstructure of nodular cast iron," *Archives of Foundry engineering*, vol. 7, no. pp. 115-118, (2007).
- [4] H. M. Muhmond, and H. Fredriksson, "Effect of the cooling rate on the graphite nodule count and size distribution in nodular cast iron," *Materials Science Forum*, vol. 925, pp. 45-53, (2018).
- [5] Y. Bai, Y. Luan, N. Song, X. Kang, D. Li, and Y. Li, "Chemical Compositions, Microstructure and Mechanical Properties of Roll Core used Ductile Iron in Centrifugal Casting Composite Rolls," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 28, no. 9, pp. 853-858, (2012).
- [6] J. Wan, D. C. Van Aken, J. Qing, T. J. Yaniak, T. E. Clements, M. Xu, "Developing a graphitic white iron for abrasive wear application: Thermal and wear properties," *Wear*, vol. 436-437, paper no. 202967, (2019).
- [7] M. Mendas, S. Benayoun, "Comparative study of abrasion via microindentation and microscratch tests of reinforced and unreinforced lamellar cast iron," *Friction*, vol. 7, no. 5, pp. 457-465, (2019).
- [8] S. D. Kim, and S. K. Kim, "Effect of Post Solidification Cooling Condition on the Mechanical Behavior of the 0.36Mn Containing Ductile Iron," *Journal of Korea Foundry Society*, vol. 41, no. 4, pp. 349-356, (2021).
- [9] S. M. Lee, K. H. Shin, B. C. Choi, K. W. Nam, "Effect of Carbon on the Micro Structure and Hardness of Internally Hardened Ductile Cast Iron Roll," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 26, no. 1, pp. 79-86, (2023).
- [10] O. J. Akinribide, O. D. Ogundare, O. M. Oluwafemi, K. Ebisike, A. K. Nageri, S. O. Akinwamide, F. Gamaoun, and P. A. Olubambi, "A review on heat treatment of cast iron: phase evolution and mechanical characterization," *materials*, vol. 15, paper no. 7109, (2022).

- [11] M. Faisal, E. El-Shenawy, M. A. Taha, "Effect of deformation parameters on microstructural evolution of GGG 40 spheroidal graphite cast iron alloy," *Materials Sciences and Applications*, vol. 10 no. 6, pp. 433-450, (2019).
- [12] W. C. Jeong, "Change in hardness and microstructure with quenching and tempering of ductile cast iron," *J. of Korean Society for Heat Treatment*, vol. 21, no. 2, pp. 69-78, (2008).

---

(접수: 2023.11.05. 수정: 2023.11.27. 게재확정: 2023.12.08.)