

내부 경화형 구상흑연주철 롤 동체와 넥의 미세조직과 경도에 미치는 탄소 영향

Effect of Carbon on the Micro Structure and Hardness of Internally Hardened Ductile Cast Iron Roll

이상목¹, 신기항¹, 최병철², 남기우^{1*}

Sang-Mook Lee¹, Ki-Hang Shin¹, Byung-Chul Choi², Ki-Woo Nam^{1*}

〈Abstract〉

This study was investigated the effect of carbon on the micro-structure and hardness of ductile cast iron roll with internal curing capacity. Spheroidal graphite existed at roll body with rapid cooling, but granular graphite existed at roll neck with slow cooling. The volume fraction of graphite increased at roll body with rapid cooling, That of roll neck with slow cooling decreased, but graphite size increased. The volume fraction of cementite decreased, but volume fraction increased. The cementite size was larger at roll neck than roll body. The hardness was decreased at roll body and roll neck due to volume fraction of cementite. The hardness of roll body was higher than roll neck.

Keywords : Cementite, Ductile Cast Iron Roll, Hardness, Volume Fraction of Graphite

1* 부경대학교 재료공학과 및 마린융합디자인공학과, 교수
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 부경대학교 재료공, 대학원생

2 한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원 석유화학공정과 교수

1* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering & Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

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

2 Dept. of Energy and Chemical Process, Petro Chemical Training Center of Korea Polytechnics

1. 서론

구상흑연주철(Ductile Cast Iron; DCI)은 주조성, 연성 및 인성이 우수하고, 낮은 제조원가로 자동차 부품, 풍력 및 대형 롤 등 내마모성이 요구되는 분야에 많이 사용된다. 그러나 주조 공정 중에 상대적으로 냉각 속도가 늦어 미세조직을 제어하기 어려운 문제점이 있다[1,2]. 또한, 구상흑연주철은 다른 강과는 달리 비금속인 흑연이 기지 내에 불규칙한 상태로 존재하기 때문에, 마모 양상이 복잡하여 내마모성은 기지조직, 흑연조직 및 공정조직에 따라 다르다[3-5]. 따라서 많은 산업 분야에 응용하기 위해서, 우수한 특성을 갖는 구상주철의 개발에 관한 많은 연구가 필요하다.

구상흑연주철로 제조된 고온 열처리용 DCI 롤(specially heat-treated high strength graphite Iron; 이하 SGI 롤이라 한다)은 내마모성 낮고, 압연할 때 발생하는 크랙의 전파 속도가 빠르다[6]. 그래서 대형 롤은 편마모와 크랙에 의한 절손이 발생하고 있다. 특히 기존의 고온 열처리용 SGI 롤은 사용 중 심부 V형 하단부에 높은 압연 부하로 인하여 집중적인 마모가 발생함에 따라 롤 수명이 짧고, 열처리 균열 및 충격에 대한 저항이 낮아 절손사고가 자주 발생한다. 이로 인하여 열간 압연재의 표면 및 치수의 균일성을 저하하고, 또한 잦은 롤의 교체로 인한 생산성의 저하를 크게 유발한다. 그뿐만 아니라 롤의 재사용을 위한 심부 가공량이 많아지게 되어 가공 시간 및 가공비 상승과 더불어 롤 소모량 증가 등으로 인하여 전반적으로 철강 압연업계의 경쟁력을 하락시키는 큰 요인이 된다. 따라서 이러한 문제점 등을 개선할 롤의 개발이 필요하다. 그중 하나가 내부 경화능 경화형 DCI 롤(super specially heat-treated high strength graphite Iron; 이하 S-SHGI 롤이라 한다)을 개발하여 사용하는 것이다. S-SHGI 롤

은 흑연과 탄화물의 체적분율을 조절하고 소지 금속의 조직도 변화시킴으로써 경도, 인성 및 내마모를 높이는 것은 물론 내/외부의 경도가 균일하다.

본 연구는 내/외부 경도의 균일성을 갖는 S-SHGI 롤을 제작하기 위하여, 탄소량이 다른 두 종류 구상흑연주철에서 롤 동체와 롤 넥의 깊이에 따르는 흑연과 탄화물 등의 체적 분율, 크기 및 공정조직 등의 변화를 연구하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1 시료 및 실험방법

본 연구에 사용된 탄소량이 다른 두 종류 구상흑연주철은 유도로서 용해한 다음, 1,450°C에서 구상화제 Ni-Mg가 0.8 wt.% 들어있는 레이드에 출탕하였다. 그 후 접종제 Fe-Si 0.3 wt.%를 투입하여, 용탕 교반에 의한 접종 반응을 위하여 레이드 하부로 아르곤을 정압 3kg/mm²로 약 1분간 공급하여 교반하였다. 그리고 패딩 현상을 방지하기 위하여, 9분 이내에 용탕 온도를 1,375°C로 하여

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

Comp. Spec.	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Mg
1	3.35	2.01	0.40	2.22	0.37	0.21	0.09
2	2.98	1.85	0.40	1.90	0.40	0.20	0.054

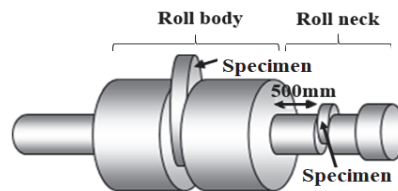


Fig. 1 Shape of roll

구상흑연주철을 제작하였다.

주형은 지름 350mm, 길이 600mm 크기의 넥과 두께 180mm, 내경 700mm 및 길이 700mm 크기의 사형으로 만든 다음, 롤 동체에 해당하는 부분은 넥과 냉각 속도 차이를 얻기 위해 금형으로 제작하였다. 본 연구에 사용된 구상흑연주철의 화학성분을 Table 1에 나타낸다. Fig. 1은 제조된 롤의 형상을 나타낸다.

2.2 미세조직 및 경도관찰

탄소량이 다른 두 종류 롤의 미세조직은 롤 동체 및 롤 넥에서 관찰하였다. 롤 동체는 Fig. 1의 중앙부에서 채취하고, 롤 넥은 롤 동체에서 500mm 떨어진 곳에서 채취하였다. 냉각 속도 차이에 따른 미세조직은 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 또한, 흑연과 시멘타이트의 체적 분율 및 흑연 크기는 화상 분석 시험기로 5회 측정하여 평균하였다. 구상화율은 구상화율 측정기로 5회 측정하여 구하였다.

두 종류 롤의 경도는 쇼어 경도기를 사용하여, 롤 동체 및 롤 넥의 표면에서 깊이로 20mm 간격으로 측정하였다. 경도는 5회 측정하여, 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 2는 탄소의 영향을 조사하기 위하여, 구상흑연주철로 제작된 롤 동체를 광학현미경으로 관찰한 것이다. 두 종류의 롤 동체는 흑연이 구상화되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 탄소량 3.35% (b)는 흑연 양이 약간 많은 것을 확인할 수 있다. 이것은 탄소가 많아 과냉도가 크기 때문

이다[6]. 그러나 흑연의 크기는 거의 비슷한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 구상흑연주철로 제작된 롤 넥을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 이것은 주형의 냉각 속도가 느린 롤 넥의 미세조직에 미치는 탄소의 영향을 조사하기 위한 것이다. 두 종류의 롤 넥은 흑연화가 되었지만, 롤 동체와 다르게 흑연 형상이 구상화되지 않았다. 이유는 롤 넥의 주형은 사형으로 제작되어 있어, 냉각 속도가 느려 공정 응고시간이 길어진다. 따라서 냉각되는 동안에 구상화되어 있던 흑연이 풀어지는 패딩 현상에 의한 집중 효과가 감소하기 때문이다[5,6]. 그리고 롤 동체와 같이 탄소량 3.35% (b)는 흡연량이 조금 많으며, 큰 것을 확인할 수 있다.

주입 전 흑연을 구상화 처리하여 주입하였지만, Fig. 2의 롤 동체는 흑연이 구상화되어 있지만, Fig. 3의 롤 넥은 구상화되지 않았다. 롤 동체는 금형에 의해 빠르게 냉각되어 흑연의 패딩 현상이 발생하지 않았지만, 롤 넥은 서냉으로 냉각되는

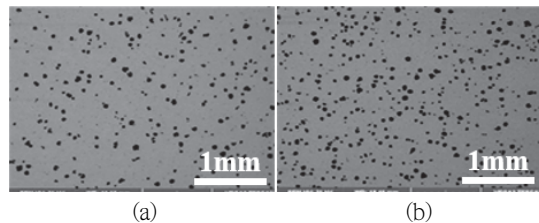


Fig. 2 Effect of carbon on the graphite at roll body. (a) 3.0%, (b) 3.35%

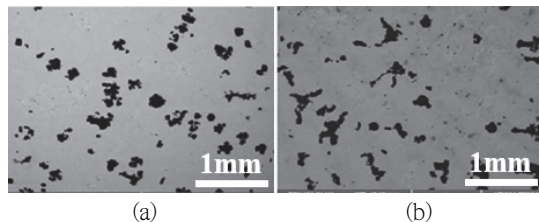


Fig. 3 Effect of carbon on the graphite at roll neck (a) 3.0%, (b) 3.35%

동안 구상화된 흑연의 패딩 현상이 발생하였기 때문이다[7,8].

Fig. 4는 롤 동체 및 롤 넥의 표면으로부터 깊이에 따른 미세조직을 나타낸 것이다. (a)(b)는 각각 롤 동체 및 롤 넥의 미세조직이다. 이것은 미

세조직에 미치는 탄소의 영향을 조사하기 위한 것이다. 두 종류의 롤 동체 및 롤 넥은 오스테나이트 입계 또는 입계에서 입내로 시멘타이트가 석출된 것을 확인할 수 있다. 또한, 탄소량 3.35%는 시멘타이트량이 적고, 크기도 작은 것을 알 수 있

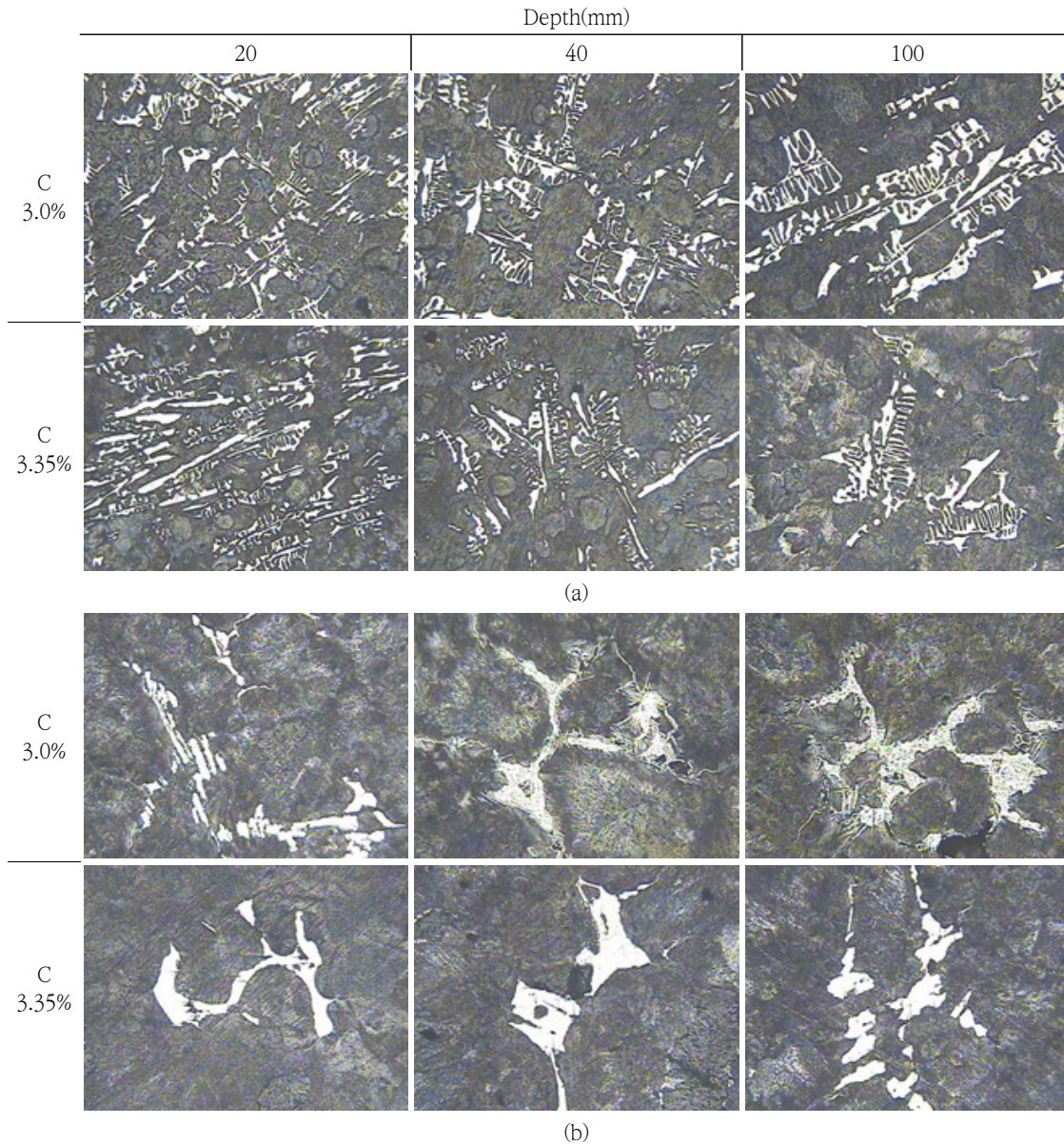


Fig. 4 Effect of carbon on the cementite according to depth of (a) roll body and (b) roll neck

다. 이와 같은 이유는 탄소량이 많아지면 응고 구동력이 향상돼 냉각 속도가 빨라져서, 시멘타이트의 석출과 성장 시간이 작아지기 때문이다[7-9].

Fig. 4에서 미세조직은 냉각 속도가 느린 롤 넥의 시멘타이트량이 약간 적고 크기도 약간 적은 것을 확인할 수 있었다. 이것은 롤 동체는 금형 냉각이 빨라서 시멘타이트의 석출 및 성장이 적게 일어났기 때문이라 판단된다.

3.2 흑연 및 시멘타이트

Fig. 5는 탄소량이 다른 두 종류 롤 동체의 흑연량을 표면으로부터 깊이에 따라 나타낸 것이다. 이것은 롤의 냉각 속도가 빠른 동체에서 흑연량에 미치는 탄소의 영향을 조사하기 위한 것이다. 탄소량이 다른 두 종류 롤 동체는 표면에서 깊어질수록 흑연량이 증가하는 경향을 나타내고 있지만, 그 차이는 크지 않다. 그러나 탄소량이 많을수록 흑연량이 많은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 탄소량이 다른 두 종류 롤 넥의 표면으로부터 깊이에 따른 흑연량을 나타낸 것이다. 이것은 냉각 속도가 느린 롤 넥의 흑연량에 미치는 탄소의 영향을 조사한 것이다. 냉각 속도가 빠른 롤 동체와 달리 탄소량이 다른 두 종류 롤 넥

은 표면에서 깊어질수록 흑연량이 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있지만, 그 차이는 크지 않다. 또한, 롤 동체와 같이 탄소량이 많은 경우가 적은 경우보다 전 영역에서 흑연 양이 많은 것을 확인할 수 있다. 이것은 탄소량이 많을수록 흑연화되는 양이 많기 때문이다.

Fig. 5와 6에서 롤 동체의 흑연량은 롤 넥보다 약간 적은 것을 알 수 있다. 롤 동체는 금형에 의해 빠르게 냉각되어 흑연화 및 성장이 롤 넥에 비해 적게 일어났기 때문이라 판단된다. 일반적으로 냉각 속도는 구상입자수 및 구상화율 등에 영향을 크게 영향을 미치지 않지만[10,11], 흑연의 체적분율에는 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

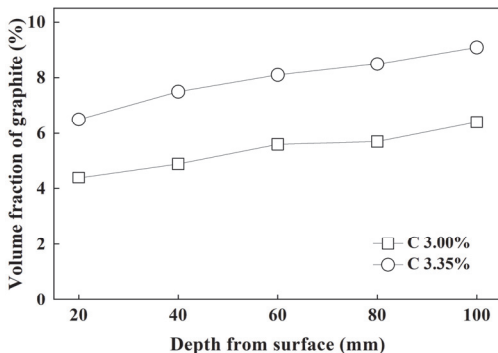


Fig. 5 Volume fraction of graphite according to body depth of two roll

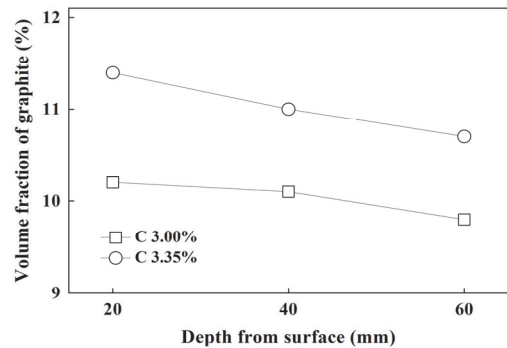


Fig. 6 Volume fraction of graphite according to neck depth of two roll

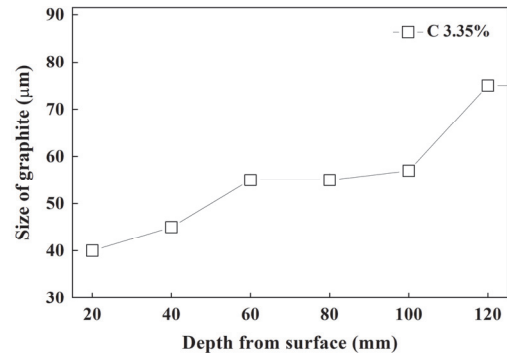


Fig. 7 Graphite size according to roll body depth having 3.35% carbon

Fig. 7은 탄소량 3.35%를 갖는 롤 동체의 표면으로부터 깊이에 따르는 흑연 크기를 조사하여 나타낸 것이다. 흑연 크기는 표면에서 깊이 약 100mm까지 직선적으로 증가하고, 120mm에서 급증하였다. 이것은 표면에서 깊어질수록 냉각되는 속도가 느려서 시간이 오래 걸리기 때문이다. 즉, 상대적으로 흑연 성장 시간이 길어지기 때문이라 판단된다[10].

Fig. 8은 탄소량이 다른 두 종류 롤 동체 깊이에 따르는 구상화율을 나타낸 것이다. 이것은 흑연의 구상화율에 미치는 탄소의 영향을 조사하기 위한 것이다. 두 종류 롤 동체의 구상화율은 중심부로 갈수록 약간 감소하였다. 이것은 다른 연구

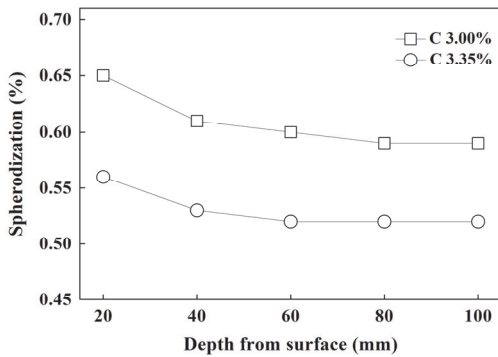


Fig. 8 Spheroidization according to roll body depth

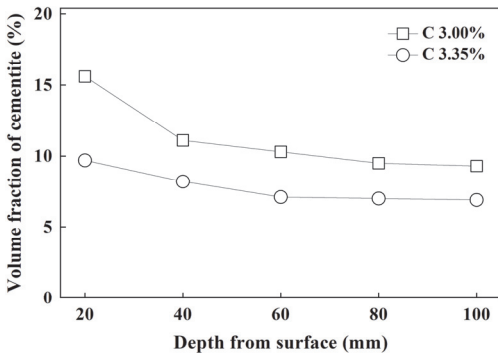


Fig. 9 Volume fraction of cementite according to roll body depth

결과와도 잘 일치한다 [10,11]. 구상화율은 탄소량이 적은 롤 동체에서 약간 높게 나타나고 있지만, 차이는 크지 않다. 한편, 롤 neck의 구상화율은 Fig. 2에서 패딩 현상에 의해 흑연화되지 않아 측정하지 않았다.

Fig. 9는 탄소량이 다른 두 종류 롤 동체의 시멘타이트량을 표면으로부터 깊이에 따라 나타낸 것이다. 이것은 탄소량이 다른 구상흑연주철로 제작된 롤 동체에서 시멘타이트량에 미치는 탄소의 영향을 조사한 것이다.

탄소량이 다른 두 종류 롤 동체는 표면에서 깊어질수록 시멘타이트량이 서서히 감소하고 있다. 이와 같은 이유는 중심부로 갈수록 느린 냉각 속도로, 탄소가 흑연으로 확산하는 양이 많아지기 때문이다. 즉, 시멘타이트 석출량은 적어진다. 또한, 탄소량 3.35%의 롤 동체는 시멘타이트량이 작은 것을 알 수 있다. 많은 탄소량은 냉각에 필요한 구동력이 향상되기 때문에 빨리 냉각되어 상대적으로 시멘타이트의 석출 시간이 적어지기 때문이라 판단된다[11].

Fig. 10은 탄소량이 다른 두 종류 롤 neck의 시멘타이트량을 표면에서 깊이에 따라 나타낸 것이다. 이것은 탄소량이 다른 구상흑연주철로 제작된 롤 neck의 시멘타이트량에 미치는 탄소 영향을 조사

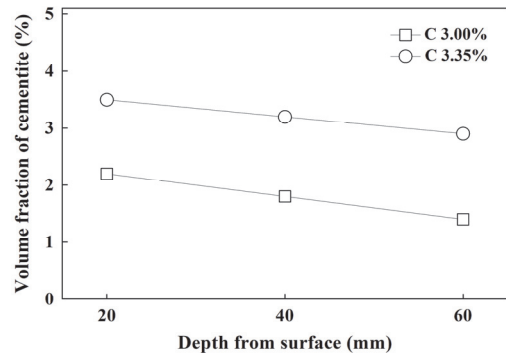


Fig. 10 Volume fraction of cementite according to roll neck depth

하기 위한 것이다.

탄소량이 다른 두 종류 롤 동체는 표면에서 깊어질수록 시멘타이트량은 서서히 감소하고 있는 경향을 나타내지만, 차이는 크지 않다. 또한, 탄소량에 따른 시멘타이트량은 롤 동체와 달리 탄소량 3.0%가 적은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 롤 넥은 사형에 의해 냉각되기 때문에 냉각 속도가 롤 동체에 비해 늦어 탄소가 흑연 성장에 많이 확산하였기 때문이라 판단된다.

Fig. 9와 10에서 롤 동체의 시멘타이트량이 많은 것을 알 수 있다. 이것은 롤 동체 냉각 속도가 빨라서 시멘타이트의 석출 시간이 적어지기 때문이라 판단된다[10].

3.3 경도 분포(Hs)

Fig. 11은 롤 탄소량이 다른 두 종류 롤 동체의 표면에서 깊이에 따른 경도를 나타낸다. 이것은 탄소량이 다른 구상흑연주철로 제작된 롤 동체의 경도에 미치는 탄소의 영향을 조사하기 위한 것이다.

탄소량이 다른 두 종류 롤 동체는 표면에서 깊어질수록 경도는 서서히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 중심부로 갈수록 냉각 속도가 느려 흑연 양이 많아지고, 상대적으로 석출

되는 시멘타이트량이 적어지기 때문이라 판단된다 [10]. 또한, 탄소량 3.35%의 롤 동체는 경도가 낮게 나타났다. 많은 탄소량은 냉각에 필요한 구동력이 향상돼 빨리 냉각되기 때문에, 상대적으로 시멘타이트의 석출 시간이 적어 경도가 높은 시멘타이트의 석출량이 적어지기 때문이라 판단된다[10].

Fig. 12는 탄소량이 다른 두 종류 롤 넥의 경도를 표면에서 깊이에 따라 조사하여 나타낸 것이다. 이것은 탄소량이 다른 구상흑연주철로 제작된 롤 넥의 경도에 미치는 탄소의 영향을 조사하기 위한 것이다.

탄소량이 다른 두 종류 롤 넥은 표면에서 깊어질수록 경도는 서서히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 깊어질수록 냉각 속도가 느려 흑연 양이 많아지고, 경도가 높은 시멘타이트량이 적어지기 때문이라 판단된다. 또한, 탄소량이 많은 롤 넥의 경도가 낮게 나타났다. 이것은 탄소량이 많아지면 냉각에 필요한 구동력이 향상돼 흑연 수가 많아지고 크기가 감소하고, 상대적으로 시멘타이트의 석출 시간이 적어 경도가 높은 시멘타이트의 석출량이 적어지기 때문이라 판단된다[10].

Fig. 11과 12에서 롤 동체의 경도가 롤 넥보다 높은 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 9와 10에서 알 수 있듯이 롤 동체는 경도가 높은 시멘타이트량이 많기 때문이라 판단된다.

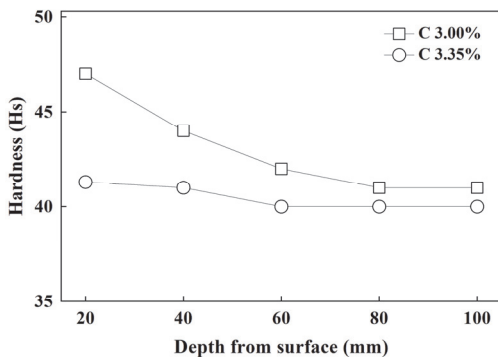


Fig. 11 Hardness according to roll body depth

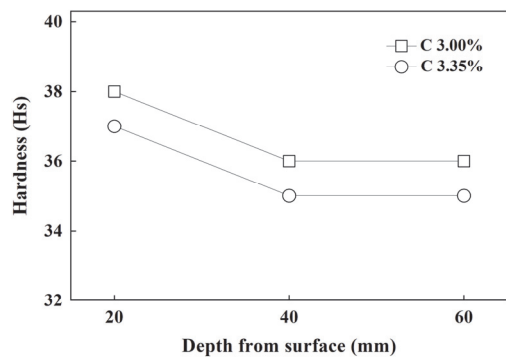


Fig. 12 Hardness according to depth at roll neck

4. 결론

본 연구는 경도, 인성 및 내마모성이 높고, 롤 내/외부 경도의 균일성을 갖는 롤 제작에 필요한 특성을 얻기 위하여, 탄소량이 다른 두 종류 구상 흑연주철에서 흑연과 탄화물의 체적 분율, 크기 및 공정조직 등의 변화를 조사하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 롤 동체는 구상흑연이 존재하고, 롤 벉은 입상의 흑연이 존재하였다.
- (2) 롤 동체는 표면에서 깊어질수록 흑연 양이 많아지고, 벉은 흑연 양이 감소하지만, 크기는 증가하였다.
- (3) 롤 동체는 표면에서 깊어질수록 시멘타이트량은 감소하고, 롤 벉은 시멘타이트량이 많고, 크기도 크다.
- (4) 흑연과 시멘타이트량은 롤 동체보다 롤 벉이 많았다.
- (5) 롤 동체와 롤 벉은 표면에서 깊어질수록 시멘타이트량이 감소하여 경도가 작아졌다. 그러나 롤 동체의 경도가 높았다.

참고문헌

- [1] S. M. Lee, H. C. Shin, J. S. Shin, 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).
- [2] W. Baer, "Chunky graphite in ferritic spheroidal graphite cast iron: formation, prevention, characterization, impact on properties: an overview," *International Journal of Metalcasting* vol. 14, pp. 454-488, (2020).
- [3] V. G. Efremenko, K. Shimizu, A. P. Cheiliakh, T. V. Kozarevs'ka, Yu. G. Chabak, H. Hara, K. Kusumoto, "Abrasive wear resistance of spheroidal vanadium carbide cast irons," *Journal of Friction and Wear*, vol. 34, pp. 466-474, (2013).
- [4] J. R. Dueñas, W. Hormaza, G. M. Castro Güiza, "Abrasion resistance and toughness of a ductile iron produced by two molding processes with a short austempering," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 2605-2612, (2019).
- [5] W. S. Shin, S. W. Baek, Y. J. Kim, "Effect of Sn addition on the microstructure and friction-wear properties of a nodular graphite cast iron," *Korean Journal Metal and Materials*, vol. 60, no. 6, pp. 471-477, (2022).
- [6] G. Marahleh, A. R. I. Khede, S. Al-Goussous, "Fatigue crack propagation in SGI and CGI," *Journal of Applied Sciences*, vol. 5, pp. 1004-1011, (2005).
- [7] N. Tsutsumi, M. Imamura, "The influence of tellurium on the graphite formation of cast iron during solidification," *Report of The Casting Reserch Laboratory, Waseda University*, 28. (1977).
- [8] A. Regordosa, U. de la Torre, A. Loizaga, J. Serucha, "Microstructure Changes During Solidification of Cast Irons: Effect of Chemical Composition and Inoculation on Competitive Spheroidal and Compacted Graphite Growth," *International Journal of Metalcasting*, vol. 14, pp. 681-688, (2020).
- [9] S. I. Kaarsay, "Ductile Iron : Production practices," *American Foundry Society*, pp. 32-34, (1985).
- [10] B. W. Song, Y. J. Choi, Y. H. Kim, Y. J. Park, "Study on the Effect of Mo Addition and Casting Thickness on the Mechanical Properties of Thin Ductile Cast Iron," *Journal of the Korea Foundry Society*, vol. 13, pp.175-185, (1993).
- [11] S. D. Kim, S. G. Kim, "Effect of Post Solidification Cooling on the Mechanical Behavior of the 0.36 Mn Containing Ductile Iron," *Journal of Korea Foundry Society*, vol. 41, pp.349-356, (2021).