
 논문

고규소 구상흑연주철의 기계적 성질 및 미세조직에 미치는 단면 크기 및 용탕 유지의 영향

이숙주 · 박기호 · 이상희* · 권해욱**†

남양금속주식회사, *한국폴리텍 VI대학 신소재응용과, **영남대학교 공과대학 신소재공학부

Effects of Section Size and Melt Holding on the Mechanical Properties and Microstructure of High Silicon Ductile Cast Iron

Suk-Ju Lee, Ki-Ho Park, Sang-Hee Lee*, and Hae-Wook Kwon**†

Namyang Metals Co., Ltd., Daegu 711-855, Korea

*Dept. of Applied Advanced Mat., Korea Polytech VI CVI, 703-721, Korea

**School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam Univ., 712-749, Korea

Abstract

The effects of section size and melt holding time on the mechanical properties and microstructure of high silicon ductile cast iron were investigated. The strength, elongation and hardness of the test specimen with smaller cross-section were higher than those with larger one. The nodule count and volume fraction of pearlite of the former were higher than those of the latter. The mechanical properties decreased with increased melt holding time before pouring. Nodularity and nodule count decreased and the volume fraction of pearlite rather slightly increased with it.

Key words : Cast iron, Ductile cast iron, High silicon ductile cast iron, Mechanical properties, Microstructure.

(Received December 27, 2011 ; Accepted March 29, 2012)

1. 서 론

자동차의 내열 부품용 재료로는 고규소계 구상흑연주철, 고니켈계 구상흑연주철 및 고니켈-고크롬계 주강이 있다. 근래에는 전략 금속인 니켈의 가격 급등으로 인하여 니켈계 또는 니켈이 합금 원소로 첨가되는 재료의 경우 경제성이 나쁘다. 따라서 구상흑연주철에 많은 량의 규소를 첨가하여 고온 내산화성을 개선한 고규소 구상흑연주철을 배기용 부품의 재료로 G. M., Renault 및 현대자동차 등 대부분의 자동차 업체에서 사용하고 있다[1-3]. 또한, 고규소 구상흑연주철에 합금 원소를 첨가하거나 흑연 형상을 변화시켜 열적 특성 특히 열전도도를 개선하여 통상의 고규소 구상흑연주철이 적용되는 온도 범위보다 높은 온도에서 견딜 수 있는 내열 부품의 재료로 사용하고 있다[4].

고규소 구상흑연주철은 4.0~6.0wt.% 범위의 규소를 함유하고, 페라이트 기지 조직을 가지며 내열성이 뛰어나다[5]. 내산

화성을 향상시키기 위하여 규소 함량을 최대 6.0wt.%까지 첨가하기도 한다[6]. 일반적으로 사용하고 있는 고규소 구상흑연주철은 3.8~4.7wt.% 범위의 규소와 0.4~1.0wt.% 범위의 몰리브덴을 함유하고 있다[1-3]. 규소는 구상흑연주철 용탕의 특성, 응고 거동 및 기계적 성질에 크게 영향을 미친다. 규소 함량이 증가하면 응고하는 동안 정출하는 흑연의 부피 분률과 공정 셀의 수가 증가한다[6]. 이와 같은 현상은 단면이 얇은 주조품의 경우에는 바람직하나 두꺼운 주조품의 경우에는 흑연 부상과 같은 결함을 발생시킬 수 있다. 또한 규소는 기지 중 페라이트 부피 분률을 증가시키고 고체 상태에서 흑연 형성을 조장한다. 따라서 구상흑연주철 중 규소 함량이 3.8wt.%까지 증가함에 따라 강도는 감소하고 연신률은 증가하나 4.25wt.% 이상에서는 규소에 의한 페라이트 기지의 고용 강화에 의하여 강도는 증가하고 연신률은 감소한다[6,7].

몰리브덴은 탄화물 형성 원소이며 약 0.50wt.% 함량 수준에서 공정 셀 경계에서 탄화물을 형성한다. 단면이 두꺼운 주조

†Corresponding author: Hae-Wook Kwon

[Tel: +82-53-810-2477, E-mail: hwkwon@ynu.ac.kr]

폼이 응고할 때 서냉으로 인하여 편석이 일어나 크롬, 망간 및 바나듐과 같은 다른 탄화물 형성 원소와 함께 공정 셀 경계에 탄화물을 형성한다. 몰리브덴 함량이 증가함에 따라 고용 강화로 인하여 경도와 강도는 증가한다. 페라이트 기지 구상흑연주철에 0.50wt.%의 몰리브덴을 첨가하면 크리프[7] 및 열피로 특성이 향상된다[6].

주철의 응고 거동과 기계적 성질에 미치는 주조품 단면 크기의 영향은 매우 크다. 구상흑연주철의 경우 단면의 두께가 얇을수록 구상화율, 흑연립수 그리고 기지 중 페라이트 부피 분율은 일반적으로 증가하며 이와 같은 영향은 화학 조성에 따라서 달라진다[8]. 그리고 구상화율이 증가할수록 일반적으로 강도, 경도 및 연신률이 동시에 증가한다.

고규소 구상흑연주철의 일반적인 특성은 비교적 잘 알려져 있으나 기계적 성질에 미치는 단면 크기 및 흑연 조직의 영향 관련 자료는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 3.2wt.% C-4.0wt.%Si-0.4wt.%Mo 조성의 봉형 구상흑연주철 주조품을 주조 공장 생산 조건에서 주조하여 이 주조 시편의 기계적 성질과 미세조직에 미치는 단면 직경 및 용탕 유지의 영향을 연구하고 기초 자료를 얻었다.

2. 실험 방법

2.1 조형

직경 12.7 및 25.4 mm의 봉형 주조 시편을 얻기 위하여 금형을 준비하였다. 봉형 시편의 길이는 각각 200 및 215 mm였으며 금형은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 회주철 재질로 제작하였다. 주물사는 회수사에 0.5%의 벤토나이트와 0.2%의 씨콜(seacoal)을 첨가하고 30초동안 혼련한 후 물을 보충한 후 60초동안 재혼련하였으며 2.5~3.7%의 수분 함량과 1.1 kg/cm²의 압축 강도를 각각 유지할 수 있도록 하였다. 수평형 줄트-스퀴즈 조형기를 이용하여 조형하였다. 주형 상자 내부 공간의 가로, 세로 및 높이는 각각 730, 600 및 250 mm였다.



Fig. 1. Metal pattern for bar test castings.

2.2 용해 및 주조

4,500kW 용량의 아아크로를 이용하여 장입물을 용해하고 1,450kW 용량의 저주파 유도로를 이용하여 화학 조성과 온도를 조정하였다. 아아크로에 7톤의 회수 고철과 3톤의 압축 강고철을 장입하였다. 아아크로를 가동하여 장입물이 용해된 후 가탄제를 첨가하여 탄소 함량을 조정하였다. 5톤의 용탕을 저주파 유도로로 이송하였으며 페로실리콘, 탄화규소, 페로망간 및 페로몰리브덴을 첨가하여 규소, 망간 및 몰리브덴 함량을 조절하였다. 몰리브덴의 목표 함량은 0.40wt.%였다. 그리고 온도를 1,510°C로 유지하였으며 주입용 레이드에 출탕하였다.

1톤 용량의 주입용 레이드에 출탕하는 동안 마그네슘 함량이 약 10wt.%인 마그네슘 페로실리콘을 사용하여 샌드위치법으로 흑연 구상화 처리하였다. 잔류 마그네슘의 목표 함량은 0.025wt.%였다. 규소 함량이 75wt.%인 페로실리콘을 사용하여 규소 함량을 0.25wt.% 증가시키는 방법으로 집중 처리한 후 4개의 주형에 주입하였다. 용탕을 주입하는 동안 규소 함량이 65wt.%인 페로실리콘을 사용하여 규소 함량을 0.10wt.% 증가시키는 방법으로 스트림 집중하였다. 그리고 구상화율을 변화시키기 위하여 용탕을 20분까지 유지하면서 10분 간격으로 각각 4개의 주형에 주입하였으며 모든 경우에 주입할 때 스트림 집중하였다. 규소 함량의 최종 목표는 4.0wt.%였다.

2.3 화학 조성 분석

주조 시편의 화학 조성을 확인하기 위하여 용탕을 주형에 주입한 후 주입 대야로부터 소량의 용탕을 소형 레이드로 채취하여 칠 시편 주조용 금형에 주입하였다. 응고된 화학 조성 분석용 칠 시편을 벨트 그라인더를 이용하여 연마한 후 분광 분석기를 이용하여 분석하였다.

2.4 기계적 성질 시험

봉형 시편을 기계 가공하여 인장 시편을 얻었다. 지름이 25.4 mm 봉형 주조 시편 지름과 표점 거리가 각각 14.0 및 50.0 mm인 KS B 0801 규격의 4호 표준 인장 시편을 그리고 지름이 12.7 mm인 봉형 주조 시편으로부터는 지름과 표점 거리가 각각 6.25 및 25.0 mm인 서브사이즈 인장 시편을 각각 얻었다. 만능재료시험기를 이용하여 분당 1 mm의 크로스헤드 속도 조건에서 인장 시험하였다. 인장 시험하기 전에 단면적 수축부의 직경과 표점 거리를 그리고 인장시험한 후의 표점 거리를 각각 측정하여 항복 강도, 인장 강도 및 연신률을 계산하였으며 각 조건 별로 3회 시험하여 평균값을 얻었다.

봉형 주조 시편의 가운데를 절단하여 높이 30 mm 정도 시험용 시편을 각각 얻었다. 3,000 kg의 하중 조건에서 브리넬 경도 시험기를 이용하여 경도 시험을 하였다. 5회 시험하여 최소 및 최대값을 제외한 나머지 3값의 평균값을 얻었다.

2.5 미세 조직 검사

봉형 주조 시편의 가운데를 절단하여 높이가 30 mm인 미세

Table 1. Chemical compositions of the materials for charging, melt-treatment and addition. (wt.%)

material	element								remark
	C	Si	Mo	Mn	P	S	Mg	Al	
steel scrap	0.10	0.10		0.10	0.03	0.01			
return scrap	3.60	2.20	0.28	0.20	0.03	0.01			
carburizer	88.5					0.02			
Fe-Si		72.6						0.44	
SiC	28.0	61.4						0.72	
Fe-Mo		0.72	62.7		0.03	0.01			

조직 관찰용 시편을 얻었다. 절단한 가운데 면을 1,000번까지의 연마지를 사용하여 보통의 방법으로 조연마하고 1 μm 등급까지의 다이아몬드 슬러리를 사용하여 세연마하였다. 화상 분석 장치를 이용하여 부식시키지 않은 상태에서 흑연 조직을 관찰하였고 구상화율과 흑연립수를 측정 한 후 3% 나이탈 용액으로 부식시킨 후 기지 조직을 관찰하였고 펄라이트 부피 분율을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화학 조성 분석 결과

각 조건별로 얻은 화학 조성 분석용 시편을 분석한 결과는 Table 2에서 보이는 바와 같다. 목표 함량을 3.20wt.%로 한 탄소와 4.00wt.%로 한 규소는 각각 3.10~3.15 및 3.83~3.86

Table 2. Chemical composition of specimen.

holding time(min.)	elements(wt.%)							remark
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Mo	
0	3.15	3.86	0.22	0.023	0.015	0.025	0.40	
10	3.10	3.84	0.22	0.023	0.014	0.019	0.40	
20	3.10	3.83	0.22	0.023	0.014	0.018	0.40	
aim comp.	3.20	4.00	0.26	0.021	0.014		0.40	

Table 3. Results of mechanical testing and microstructural observation.

holding time(min.)	bar dia. (mm)	mechanical properties			microstructure				remark
		Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	%Elong.	hard-ness (BHN)	nodu-larity (%)	nodule count (#/mm ²)	vol.% pearlite	
0	12.7	473.8	586.9	20.5	181	90.6	455	8	
	25.4	442.5	560.3	18.9	182	91.0	359	10	
10	12.7	458.9	567.6	17.5	180	74.3	353	12	
	25.4	433.3	541.9	17.2	172	70.6	328	15	
20	12.7	391.0	497.6	12.9	171	49.7	316	15	
	25.4	390.8	490.7	9.9	166	50.0	154	15	

wt.% 범위로 다소 낮았다. 0.26wt.%로 한 망간의 경우 0.22 wt.%로 다소 낮았으며 몰리브덴 함량은 목표 함량과 같은 0.40wt.%인 것으로 나타났다. 잔류 마그네슘 함량은 0.025wt.%에서 용탕이 20분까지 유지됨에 따라 0.018wt.%까지 낮아졌다. 인과 황의 함량은 실험 오차 범위 내에 있으며 거의 일정하여 실험 결과를 분석하는 데에는 별 문제가 없는 것으로 판단되었다.

3.2 단면 직경의 영향

1,510°C의 온도에서 보온로로부터 1톤 용량의 레이들에 출탕 하면서 샌드위치법으로 구상화 처리한 후 용탕을 바로 주입하고 10 및 20분까지 용탕을 유지한 후 주입하여 얻은 직경 12.5 및 25.4 mm의 봉형 시험 구조품을 얻었다. 이 시험 구조품으로부터 시편을 얻어 인장 시험한 결과는 Table 3 및 Fig. 2에서 보이는 바와 같다.

봉형 시험 구조품의 단면 직경이 12.5 mm로 작은 경우가 25.4 mm로 큰 경우에 비하여 모든 경우에 강도는 더 크고 경도도 약간 더 높았으며 연신률도 더 컸다. 이와 같은 결과의 원인을 규명하기 위하여 미세 조직을 관찰하였으며 그 결과는 Table 2, Fig. 3 및 4에서 보이는 바와 같다. 모든 경우에 구상화율은 크게 차이 나지 않았으나 흑연립수는 단면이 작은 경우가 큰 경우에 비하여 더 많았다. 단면 직경이 작을 경우 큰 경우에 비하여 용탕이 주형에 주입된 후 냉각 속도가 빨라 과냉이 증가하여 흑연의 핵생성 속도가 증가하여 흑연립수가 상

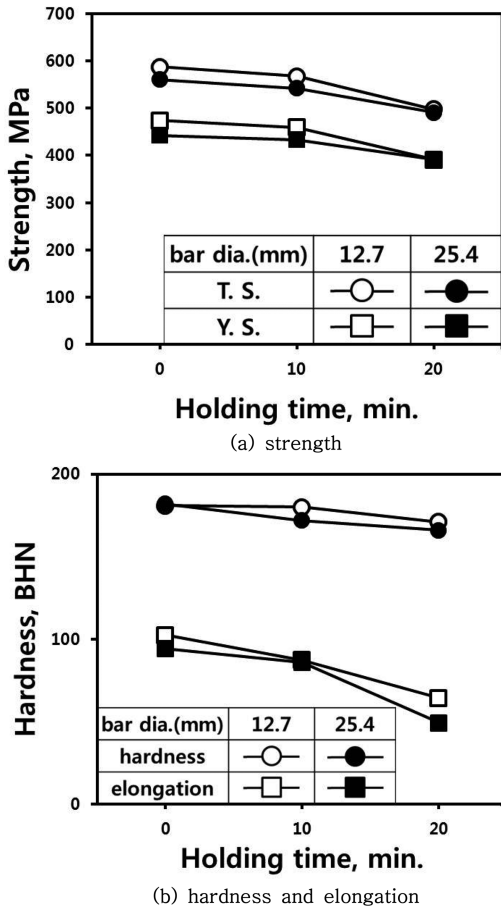


Fig. 2. Effects of section size and holding time on the mechanical properties of high silicon ductile cast iron bar.

대적으로 많아지고 그 크기는 감소하였을 것이다. 이 경우 일반적으로 고체 상태에서 오스테나이트가 페라이트 또는 페라이트와 펄라이트의 혼합 조직으로 변태할 때 탄소의 확산 거리, 즉, 흑연립간 거리가 짧아 펄라이트 부피 분률도 감소하였다. 그리고 고체 상태에서의 냉각 속도도 빨라 페라이트 결정립 크기도 더 미세해졌다. 주철 중 흑연은 일반적으로 기계적 성질 관점에서 보면 결함인 것으로 작용하며 단면 직경이 작은 경우 큰 경우에 비하여 흑연이 미세하여 강도, 경도 및 연신률이 동시에 더 클 것이다. 실험 결과를 보면 기지 조직 중 펄라이트 부피 분률의 차이는 그리 크지 않아 이의 영향은 작았던 것으로 생각되었다.

3.3 용탕 유지의 영향

약 1톤의 용탕을 출탕하면서 구상화 처리한 후 바로 주입한 경우와 10 및 20분 동안 유지한 후 주입하여 얻은 봉형 시험 구조품의 기계적 성질 변화도 Table 3 및 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 용탕 유지 시간이 20분까지 증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 단면 직경이 12.7 mm로 작은 경우 각각

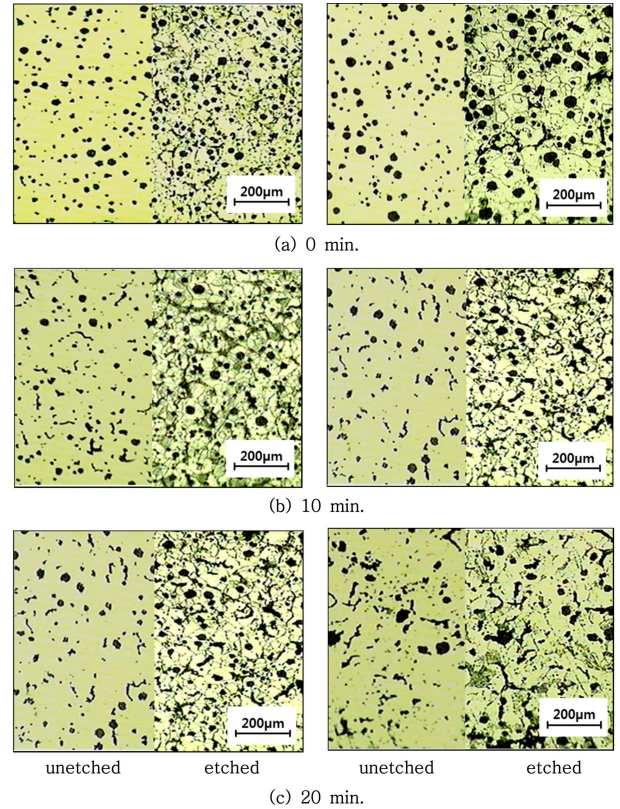


Fig. 3. Variations of the microstructure of high silicon ductile cast iron bar with the different diameter and holding time(left ; 12.7 mm \varnothing , right ; 25.4 mm \varnothing).

473.8 및 586.9MPa에서 391.0 및 497.6MPa로 감소하였으며 단면 직경이 25.4 mm로 큰 경우 각각 442.5 및 560.3MPa에서 390.8 및 490.7MPa로 감소하였다. 그리고 연신률과 경도는 전자의 경우 각각 20.5% 및 181에서 12.9% 및 171로 그리고 후자의 경우 각각 18.9% 및 182에서 9.9% 및 166으로 감소하였다. 이것은 Table 2의 화학 조성 분석 결과에서 보이는 바와 같이 용탕을 20분까지 유지함에 따라 잔류 마그네슘 함량이 0.025에서 0.018%까지 감소하여 페이딩이 일어났기 때문이다. 물론 마그네슘의 페이딩과 함께 접중에 의한 흑연의 핵생성 서브스트레이트의 수도 페이딩으로 인하여 감소하였다.

대표적인 미세 조직은 Fig. 3에서 보이는 바와 같으며 구상화율 및 흑연립수를 측정된 결과는 Table 3 및 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. 용탕이 구상화처리 직후부터 20분까지 유지됨에 따라 단면 직경이 12.7 mm로 작은 경우와 25.4 mm로 큰 경우 구상화율은 90.6 및 91.0%에서 49.7 및 50.0%로 그리고 흑연립수는 1 mm²당 455 및 359개에서 316 및 154개로 각각 감소하였다. 구상화율이 감소함에 따라 인장 응력이 걸릴 때 응력 집중 계수가 증가하여 흑연 단부 앞의 기지에 조기에 디스로케이션 이동이 일어난 후 기지와 흑연 계면의 분리가 일어나 항복 강도, 인장 강도, 연신률 및 경도가 모두 감소하였

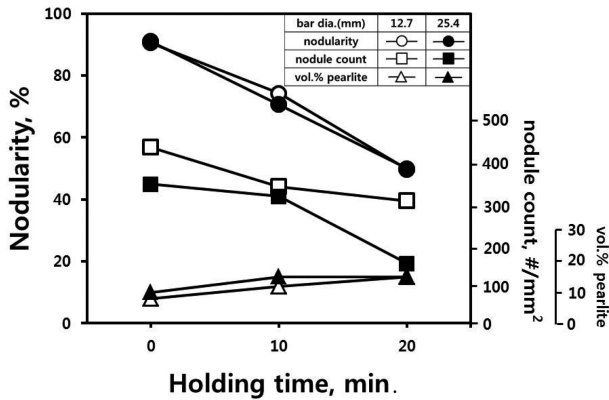


Fig. 4. Variations of the microstructure of high silicon ductile cast iron bar with the different diameter and holding time.

을 것이다. 또한 구상화 원소 및 흑연 핵생성 서브스트레이트의 페이딩이 일어남에 따라 단위 면적당 흑연립수가 감소하고 따라서 흑연은 조대화되며 이와 같은 현상도 기계적 성질을 감소시키는데 기여하였을 것이다. 그리고 단위 면적당 흑연립수가 감소함에 따라 흑연립사이의 거리가 증가하고 탄소 확산이 일어날 시간은 한계가 있어 용탕이 20분까지 유지됨에 따라 기조직 중 펄라이트 부피 분률도 약간 증가하였다.

4. 결 론

고규소 구상흑연주철의 기계적 성질 및 미세 조직에 미치는 단면 크기 및 용탕 유지의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론

을 얻었다.

- 1) 단면의 크기가 작은 경우가 큰 경우에 비하여 강도, 연신률 및 경도 모두가 더 높았다.
- 2) 전자가 후자에 비하여 단위 면적당 흑연립수가 더 많고 펄라이트 부피 분률이 약간 더 낮았다.
- 3) 구상화 처리 후 시간이 경과함에 따라 강도, 연신률 및 경도 모두 감소하였다.
- 4) 구상화 처리 후 시간이 경과함에 따라 구상화율과 단위 면적당 흑연 립수는 감소하고 펄라이트 부피 분률은 약간 증가하였다.

참고문헌

- [1] GMW 13, Mat. Spec. Met., World Engineering Standard, GM, "High Temperature Nodular Iron", Jun. 2009, 1-5.
- [2] Standard, Renault, "Cast Irons for Vehicle Parts", Mar. 2005, 1-25.
- [3] Mat. Spec., Engineering Standard, H.-K. Motors, "Heat-Resistant Ductile Cast Iron", Jan. 2003, 1-7.
- [4] BWS 33025, Standard Mat., BorgWarner Turbo & Emissions Systems, "Vermicular Graphite Cast Iron", Mar. 2010, 1-11.
- [5] K. -H. Choe, S. -M. Lee, M. -H. Kim, S. -W. Yun and K. -W. Lee : J. KFS, "Effect of Si and Mo on the Temperature-Dependent Properties of High Si High Mo Ductile Cast Irons", 29(6), 2009, 257-264.
- [6] A. Alagarsamy et. al. : Ductile Iron Handbook, 1993, 76-77.
- [7] J. Pelleg : Trans. AFS, "Influence of Silicon on Ductile Cast Iron", 71, 1963, 315-323.
- [8] Ductile Iron Data for Design Engineers, QIT-Feret Titane Inc., 1990, 5-5.