

논문

3.60wt%C-2.50wt%Si 구상흑연주철의 소둔 및 소준시 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향

백종규 · 서갑성 * · 권해욱 **†

영남대학교 금속공학과, *대한특수금속(주), **영남대학교 신소재공학부

Effects of Alloying Elements on the Mechanical Properties of Annealed and Normalized 3.60wt%C-2.50wt%Si Ductile Cast Irons

Jong-Kyu Baek, Gap-Seong Seo*, and Hae-Wook Kwon**†

Dept. of Met. Eng., Graduate School, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-749, Korea

*Daehan Special Metal Co., Ltd. Gyeoungbuk 717-870, Korea

**School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-749, Korea

Abstract

Effects of alloying elements on the mechanical properties of 3.60wt%C - 2.50wt%Si ductile cast iron with annealing and normalizing were investigated. Yield and tensile strengths were increased from 278 and 415 MPa to 316 and 440 MPa respectively as manganese content was increased upto 0.45wt% while elongation was decreased from 24.2 to 5.0%. The formers were increased and the latter was decreased with the increased amount of copper, molybdenum or nickel added. Meanwhile the tensile strength of annealed specimen was increased with the amount of alloying elements added, it was decreased by annealing. It was increased greatly by normalizing and the amount of alloying elements added except molybdenum.

key words : Cast iron, Ductile cast iron, Heat-treatment, Mechanical properties, Alloying element

(Received June 7, 2007 ; Accepted July 18, 2007)

1. 서 론

구상흑연주철은 탄소 함량이 높은 철기 합금(iron-base alloy)으로서, 응고가 일어나는 동안 흑연이 구상으로 형성하게 하여 강도와 인성을 향상시킨 주철이다. 주로 페라이트와 펄라이트가 혼합된 기지에 구상흑연이 분포되어 있다. 주방 상태의 구상흑연주철의 미세 조직은 기지에 펄라이트의 부피 분률이 더 많을수록 강도와 경도는 증가하고 연성은 감소한다. 반대로 페라이트의 부피 분률이 더 많을 경우 강도와 경도는 감소하는 대신 연성이 증가하는 경향이 있다. 이와 같이 조직의 부피 분률에 따라 기계적 성질은 크게 달라진다. 주방 상태에서의 기계적 성질은 탄소당량에 따라 인장강도는 400~700 MPa 이고 합금 원소 첨가량에 따라 달라진다[1,2].

일반적으로 구상흑연주철 주조품을 열처리하여 미세 조직과 기계적 성질을 조절할 수 있으며 목적에 따라 열처리 방법은 달라진다. 그리고 열처리 반응성을 증가시키기 위하여 구리, 몰리브덴 및 니켈 등과 같은 몇 가지 합금 원소를 첨가한다. 이와 같은 합금 원소는 구상흑연주철을 오스테나이트화 처리한 후 냉각하는 동안 오스테나이트가 펄라이트로 분해하는 것을 지연시킨다[2,3]. 구상흑연주철은 탄화물을 제거하고 기지 조직을 균일하게 하

여 기계 가공성을 향상시키고 기계적 성질을 개선시키기 위해 열처리를 한다. 소둔은 주방 상태에서 존재할 수 있는 잔류 탄화물을 분해시키고 완전히 페라이트 기지 조직을 얻기 위한 연화 열처리이다. 합금 원소를 첨가하지 않은 상태에서 탄화물을 분해시키기 위한 완전 소둔은 900~920°C 범위의 온도에서 2시간동안 가열하는 처리이다. 그리고 주조품을 노 내에서 700°C까지 서냉한 후 5시간동안 유지하고 2시간에 걸쳐서 500°C로 다시 냉각시킨 후 상온으로 공냉한다. 그리고 소둔은 탄화물을 제거하고 펄라이트 기지를 얻기 위한 강화 열처리이다. 주방 상태에서 탄화물이 존재하면 900~920°C의 범위로 그리고 탄화물이 존재하지 않으면 850°C의 온도로 가열하여 2 시간동안 유지한다. 그리고 단면적이 작을 경우에는 정지된 공기 중에서 그리고 두께가 25 mm 이상으로 두꺼울 경우에는 냉각 팬을 사용하여 강제적으로 600°C까지 공냉한다. 냉각 속도가 충분히 빠르지 않으면 일부의 페라이트가 형성하여 강도와 경도가 낮아진다[2,4].

본 연구에서는 구상흑연주철을 열처리하여 기계적 성질을 향상시키기 위한 기초 연구를 하였다. 기본 소재로 탄소와 규소 함량이 각각, 오스템퍼드 구상흑연주철을 제조할 때 일반적으로 선택되는 조성 범위의 평균 조성인[2], 3.60 및 2.50wt%인 조

†E-mail : hwkwon@ynu.ac.kr

성의 구상흑연주철을 선택하였다. 이 조성의 구상흑연주철의 특성과 열처리 반응성에 미치는 합금 원소의 영향을 연구하였다. 특히, 주방 상태, 소둔 및 소준 처리한 이 조성의 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 0.00~1.20wt% 범위의 구리, 0.00~0.50wt% 범위의 몰리브덴 및 0.00~1.60wt% 범위의 니켈 첨가의 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1. 용해 및 주조

기계적 시험과 미세 조직 검사용 시편을 얻기 위하여 표준 Y 블록 시편을 주조하였다. 이때 사용한 Y 블록 시편의 모양과 크기는 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 두 개의 Y 블록 금형과 상부 및 하부 조형 상자를 이용하여 각 조건별로 생형을 조형하였다.

75 kW용량의 고주파 유도 용해로를 이용하여 용해하였다. 망간의 함량을 변화시키거나 낮게 유지하기 위하여 장입용 주물선으로는 저 망간 주물선을 선택하였다. 탄소의 목표 함량을 3.60wt%로 하여 주물선과 강고철을 장입하여 20 kg의 용탕을 얻었다. 그리고 필요에 따라서 합금 원소를 첨가한 후, 기본 용탕의 규소의 목표 함량 2.10wt%를 얻기 위하여 규소 함량이 약 75.0wt%인 페로실리콘을 노 중 용탕에 첨가하였다. 최종 주조품의 목표 규소 함량은 2.50wt%였다. 최종 주조품이 목표 규소 함량은 2.50wt%였다. R타입의 열전대를 부착시킨 침적식 온도계를 이용하여 용탕의 온도를 측정하였으며 용탕의 온도가 약 1,450°C의 온도에 도달하였을 때 Y 블록 시험 주조품 중 0.04wt%의 잔류 마그네슘 함량을 얻기 위하여 5.0wt%Mg-Fe-Si 합금을 풀런징하는 방법으로 구상화 처리하였다. 그리고 규소 함량을 0.4wt% 증가시키는 방법으로 용탕을 후접종 처리하였다. 접종재로는 직경 약 1.0~3.0 mm 크기의 입자형 1.0wt%Ba-Fe-Si 합금을 사용하였으며 용해시 사용한 장입물, 첨가제 및 용탕 처리제의 화학 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다.

첨가한 접종제가 완전히 녹아 들어간 후 슬릭스를 사용하여 용탕 표면의 슬래그를 제거하고 레이들에 출탕하여 용탕 온도

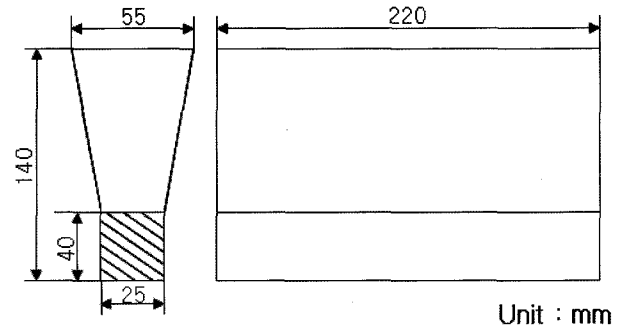


Fig. 1. Standard Y-block specimen.

를 측정 후 주형에 주입하였다. 이 때 주입온도는 1,300~1,350°C의 범위 내에 있었다. 또한 구리판 위에 놓여 있는 금형에 소형 레이들을 이용하여 용탕을 주입하여 화학 조성 분석용 질 시편을 얻었다. 각 조건별로 주형에 주입하였으며 완전히 응고가 일어나고 상온으로 냉각된 후 탈사 및 쇼트 피닝 처리하여 2개의 Y 블록 시험 주조품을 얻었다.

2.2. 합금 원소의 영향

2.2.1. 망간의 영향

먼저 주방 상태의 구상흑연주철 주조품의 기계적 성질 및 미세 조직 그리고 열처리 반응성에 미치는 합금 원소의 영향을 시험하기 위하여 망간을 첨가하였다. 망간은 75wt%Mn 함량의 페로망간을 사용하여 첨가하였다. 망간의 함량을 0.00, 및 0.25 및 0.45wt%로 변화시켜 시험하였다. 망간을 제외한 다른 합금 원소의 영향을 시험한 모든 경우의 규소 함량이 2.50wt%인 것을 고려하여 망간 함량을 0.25wt%로 일정하게 하였다. 각 합금 원소 첨가제의 화학 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 모든 경우에 탄소와 규소 함량은 3.60 및 2.50wt%로 일정하게 하였다.

2.2.2. 구리, 몰리브덴, 니켈의 영향

구리의 함량은 0.00, 0.20, 0.50, 0.80 및 1.20wt%로 변화시켰다. 그리고 몰리브덴 함량은 0.00, 0.30 및 0.50wt%로 변화시켜 시험하였으며 니켈 함량은 0.00~1.60wt% 범위에서

Table 1. Chemical analyses of charging materials, nodulariser, inoculant and additives for alloying element.

materials	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	Ca	Al	Ba	Cu	Mo	Ni	remark
pig iron(I)	4.27	0.09	0.008	0.026	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	
pig iron(II)	4.41	1.17	0.064	0.035	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	
steel scrap	0.03	0.016	0.22	0.015	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fe-75%Si	0.033	75.31	-	0.020	0.003	-	-	-	1.32	-	-	-	-	
Mg-Fe-Si	-	46.44	-	-	-	5.12	2.14	1.91	0.58	-	-	-	-	
Ba-Fe-Si	-	72.44	-	-	-	-	-	1.40	1.12	1.32	-	-	-	
Fe-Mn	6.72	0.50	75.55	0.005	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	
metallic Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.90	-	-	
Fe-Mo	0.04	0.81	-	0.04	0.08	-	-	-	-	-	0.40	60.65	-	
metallic Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.90	

0.40wt% 간격으로 변화시켰다.

2.3. 열처리 실험

구상흑연주철의 열처리 반응성에 미치는 합금 원소의 영향을 시험하기 위하여 열처리 실험을 하였다. 3.1 kW 용량의 발열체가 칸탈인 상용 및 최고 온도가 각각 900 및 1,200°C인 박스로를 이용하여 오스테나이트화 처리를 하였다. 용해 및 주조하여 얻은 표준 Y 블록 시편을 밴드 쏘를 이용하여 절단하여 직사각형 단면의 봉재 시편을 얻었다. 한 개의 표준 Y 블록 시편당 2개의 봉재 시편을 각각 얻었다. 소둔 및 소준 처리하는 경우에는 각 조건별로 3개의 봉재 시편을 열처리하였다. 각 봉재 시편을 소둔하였다. 이 경우에는 910°C의 온도에서 2시간 동안 오스테나이트화 처리하였으며 노의 전원을 차단하여 700°C까지 냉각시킨 후 이 온도에서 5시간동안 유지한 후 2시간에 걸쳐서 500°C까지 서냉하였다. 그리고 공냉하였다. 또한 봉재 시편을 사용하여 소준 처리하였다. 이 경우에는 소둔한 경우와 마찬가지로 910°C의 온도에서 2시간동안 오스테나이트화 처리한 후 압축 공기와 냉각 팬으로 강제 급공냉하였다.

2.4. 화학 조성 분석 및 미세 조직 관찰

시험 주조품의 화학 조성을 확인하기 위하여 얻은 화학 조성 분석용 칩 시편의 표면을 100번 연마지를 사용하여 연마한 후 에미션 스펙트로미터(emission spectrometer)를 이용하여 분석하였다. 주방 상태와 소둔 및 소준한 경우에는 Y 블록 시험 주조품을 절단하여 얻은 봉형 시편의 한 쪽 끝으로부터 25 mm 위치를 절단하여 미세 조직 관찰용 시편을 얻었다. 모든 경우 절단면을 보통의 방법으로 조연마하고 다이아몬드 페이스트로 1 µm 등급까지 세연마하였다. 구상화율 측정 장치를 이용하여 구상흑연의 수를 측정하였으며 시편당 5개의 위치를 선정하여 측정하고 최대값과 최소값을 제외한 세 값의 평균값을 얻었다. 그리고 열처리한 경우 3.0%나이트알 용액으로 부식시킨

후 기지 조직을 관찰하였다. 그리고 구상화율 측정 장치를 이용하여 기지 조직 중 펠라이트의 부피 분율을 측정하였다. 이 경우에도 5개의 위치를 선정하여 측정하고 최대 및 최소값을 제외한 세 값의 평균값을 얻었다.

2.5. 기계적 성질 시험

미세 조직 관찰용 시편을 절단하고 남은 봉형 시편을 기계 가공하여 KS B 0801 규격 중 평행부의 지름과 표점 거리가 12.5 및 50 mm인 10호 표준 인장 시편을 사용하여 인장 시험하였다. 인장 시편의 모양과 크기는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 50톤 용량의 만능 재료 시험기를 이용하고 2.0 mm/min의 크로스 헤드 속도 조건에서 인장 시험하였다. 투영기를 이용하여 인장 시험 전의 단면의 직경과 인장 시험 전후의 표점 거리를 측정하여 항복 및 인장 강도 그리고 연신률을 측정하였으며 각 조건별로 3 회 시험하여 그 평균값을 얻었다. 그리고 미세 조직 관찰용 시편을 다시 연마하여 하중 3,000 kg의 조건에서 브리넬 경도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 화학 조성 분석 결과

각 용해시 조건별로 화학 조성을 분석하기 위한 칩 시편을

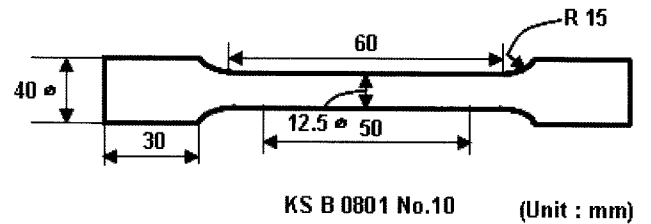


Fig. 2. Tensile test specimen.

Table 2. Chemical analyses of specimen.

specimen	amount added (wt%)	elements									remark
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Mo	Ni	
effect of Mn	0.00	3.71	2.46	0.03	0.03	0.006	0.04	0.009	0.001	0.005	
	0.25	3.58	2.59	0.24	0.03	0.007	0.04	0.009	0.001	0.005	
	0.45	3.63	2.73	0.44	0.04	0.007	0.05	0.010	0.004	0.006	
effect of Cu*	0.20	3.56	2.55	0.25	0.03	0.006	0.04	0.20	0.001	0.006	
	0.50	3.52	2.51	0.24	0.03	0.005	0.04	0.50	0.001	0.011	
	0.80	3.60	2.60	0.25	0.03	0.005	0.04	0.77	0.002	0.004	
	1.20	3.61	2.65	0.25	0.03	0.005	0.04	1.16	0.001	0.004	
effect of Mo	0.30	3.74	2.60	0.24	0.03	0.005	0.04	0.011	0.25	0.008	
	0.50	3.63	2.58	0.24	0.03	0.005	0.04	0.012	0.45	0.006	
effect of Ni†	0.40	3.62	2.55	0.26	0.03	0.005	0.04	0.070	0.002	0.38	
	0.80	3.60	2.53	0.25	0.03	0.006	0.05	0.010	0.002	0.76	
	1.20	3.69	2.54	0.25	0.03	0.005	0.04	0.012	0.002	1.21	
	1.60	3.69	2.55	0.28	0.03	0.005	0.04	0.012	0.002	1.57	

The aim contents of C and Si were 3.60 and 2.50wt% respectively.

* The aim content of Mn was 0.25wt%.

열어 분석하였으며 그 결과는 Table 2에서 보이는 바와 같다. 목표 함량이 3.60wt%인 탄소 함량은 3.52~3.72wt% 범위 내에 있었다. 그리고 목표 함량이 2.50wt%인 규소 함량은 2.73wt%와 같이 실험 오차 범위를 벗어난 경우도 있기는 하나 대부분 2.46~2.60wt% 범위 내에 있었다. 잔류 마그네슘 함량은 0.04~0.05wt% 범위인 것으로 나타났다.

망간 함량을 0.25 및 0.45wt%로 변화시킨 경우 망간 함량이 각각 0.24 및 0.44wt%로 나타났다. 0.20, 0.50, 0.80 및 1.20wt%로 변화시킨 구리의 함량은 각각 0.20, 0.50, 0.77 및 1.16wt%로 나타났다. 0.30 및 0.50wt%로 변화시킨 몰리브덴 함량은 0.25 및 0.45wt%로 각각 나타났다. 그리고 0.40~1.60wt% 범위에서 0.40wt% 간격으로 변화시킨 니켈 함량은 0.38, 0.76, 1.21 및 1.57wt%로 각각 나타났다. 따라서 모든 시편의 화학 조성은 실험 오차 범위 내에 있었으며 구상흑연주철의 기계적 성질, 미세 조직 그리고 열처리 반응성에 미치는 합금 원소의 영향 시험 결과를 분석하는 데에는 대체로 문제가 없는 것으로 판단되었다.

3.2. 기계적 성질과 지지 조직에 미치는 합금 원소의 영향

3.2.1. 망간의 영향

먼저 주방 상태의 기계적 성질과 지지 조직에 미치는 망간 첨가의 영향을 시험하였으며 그 결과는 Table 3, Fig. 3 및 4에서 보이는 바와 같다. 망간 첨가량이 0.45wt%까지 증가함에 따라 3.60wt%C - 2.50wt%Si 조성의 구상흑연주철의 항복강도와 인장 강도는 278에서 316 그리고 415에서 440 MPa로 각각 증가하였다. 그리고 브리넬 경도는 147에서 160으로 증가하였으며 연신률은 29.2에서 18.3%로 감소하였다.

이의 원인을 밝히기 위하여 각 시편의 미세 조직을 관찰하였으며 그 결과는 Table 3 및 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 구상화율은 96% 이상이고 1mm²당 구상흑연의 수도 대체로 80개 이상으로 건전한 구상흑연주철 조직을 얻었다. 그리고 망

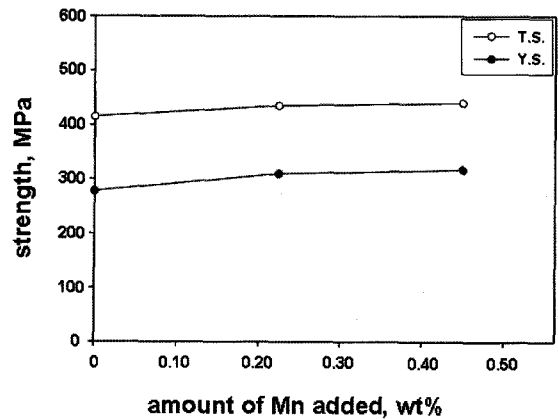


Fig. 3. Variation of strength of as-cast specimen with the amount of manganese added.

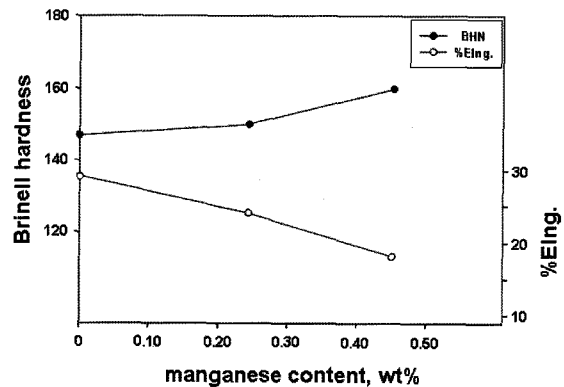


Fig. 4. Variations of hardness and elongation with the amount of manganese added.

간 첨가량이 0.45wt%까지 증가함에 따라 지지 조직 중 펄라이트 부피 분률이 5.9에서 18.9%로 증가하였다. 망간은 탄화

Table 3. Results of mechanical testing and microstructural analysis of as-cast specimen.

specimen	amount added (wt%)	mechanical properties			microstructure			remark
		Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	%Elong	BHN	nodularity (%)	nodule count (mm ²)	
effect of Mn	0.00	278	415	29.2	147	97.2	100.4	5.9
	0.25	309	435	24.2	150	97.0	91.5	12.6
	0.45	316	440	18.3	160	97.4	107.4	18.9
effect of Cu*	0.20	327	500	22.0	178	97.2	84.1	36.9
	0.50	478	702	12.5	215	97.4	82.5	78.6
	0.80	567	786	7.9	246	96.2	82.9	89.9
	1.20	646	822	5.0	250	99.2	65.1	94.6
effect of Mo*	0.30	320	457	24.4	157	99.0	92.2	13.5
	0.50	331	461	23.7	155	96.8	88.9	8.3
effect of Ni*	0.40	368	477	23.3	163	95.9	72.6	15.1
	0.80	350	473	21.4	163	96.9	87.9	17.7
	1.20	435	490	21.7	169	95.7	91.9	17.0
	1.60	436	568	16.7	183	94.8	87.3	31.0

The aim contents of C and Si were 3.60 and 2.50wt% respectively.

* The aim content of Mn was 0.25wt%.

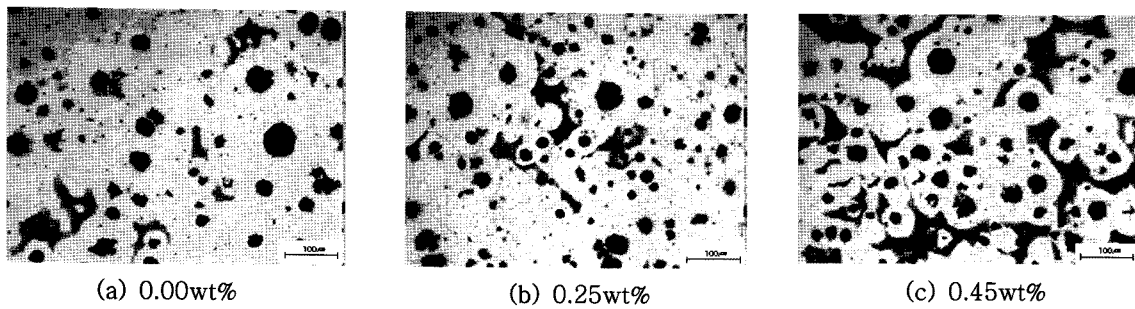


Fig. 5. Microstructures of the as-cast specimens with the different amount of manganese added.

물 형성 원소이며 비록 펄라이트 기지 조건을 얻기 위하여 의도적으로 첨가하는 원소가 아니기는 하지만 용도가 일어나는 동안 오스테나이트 기지에 고용되어 공석 온도 부근에서 오스테나이트가 변태하는 동안 탄소의 확산을 억제하여 펄라이트의 형성을 촉진한다. 따라서 망간 첨가량이 0.45wt%까지 증가함에 따라 주방 상태의 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율이 증가하고 이에 따라 강도 및 경도는 증가하고 연신률은 감소하였다.

망간은 탄화물 형성 원소이며 주방 상태에서 탄화물이 형성하지 않는 범위로 망간 함량을 선택하여야 한다. 또한 규소 함량과 주조품 두께가 망간 함량의 허용 범위에 영향을 미친다. 따라서 규소 함량이 2.50wt%인 것을 감안하여 다른 합금 원소 첨가의 영향을 시험하는 경우 망간 함량을 0.25wt%로 일정하게 하였다.

3.2.2. 구리, 몰리브덴 및 니켈 첨가의 영향

기계적 성질과 미세 조직 변화에 미치는 구리, 몰리브덴 및 니켈 첨가의 영향은 Fig. 6 및 7에서 보이는 바와 같다. 구리의 첨가량이 1.20wt%까지 증가함에 따라 항복 강도, 인장 강도 및 브리넬 경도는 각각 309에서 646 MPa, 435에서 822 MPa 그리고 150에서 250으로 크게 증가하고 연신률은 24.2에서 5.0%로 크게 감소하였다.

몰리브덴 첨가량이 0.5wt%까지 증가함에 따라 항복 강도는 309에서 331 MPa까지 증가하였으며 인장 강도는 435에서 461 MPa까지 증가하였다. 브리넬 경도는 150에서 157로 증가

하였다가 155로 감소하였으며 연신률은 23.7~24.4%로 크게 달라지지 않았다.

니켈 첨가량이 1.60wt%까지 증가함에 따라 항복 강도, 인장 강도 및 브리넬 경도는 각각 309, 435MPa 및 150에서 436, 568 MPa 및 183으로 증가하였다. 연신률은 니켈 함량이 증가함에 따라 24.2에서 16.7%까지 감소하였다.

이와 같은 결과의 원인을 알아보기 위하여 각 조건 별 시편의 미세 조직을 확인하고 기지 조직중 펄라이트의 부피 분율을 측정하였으며 그 결과는 Table 3 및 Fig. 8에서 보이는

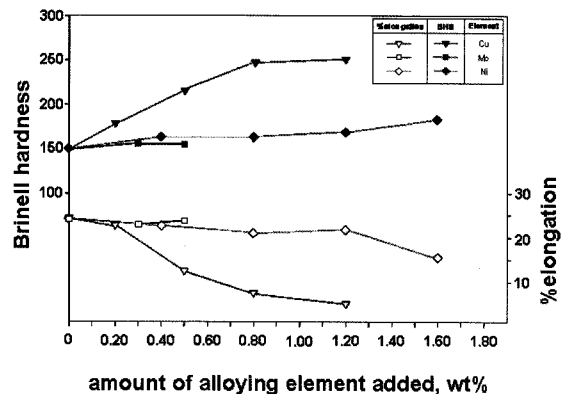


Fig. 7. Variations of hardness and elongation of as-cast specimen with alloying element added.

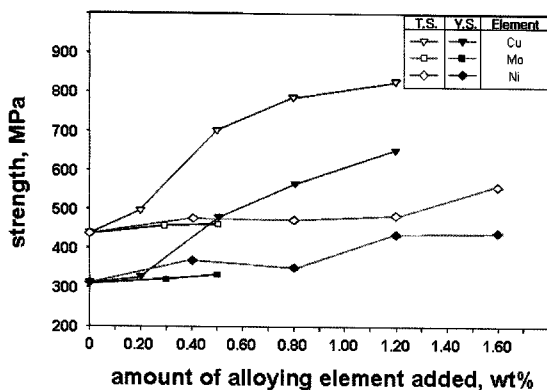


Fig. 6. Variation of strength of as-cast specimen with alloying element added.

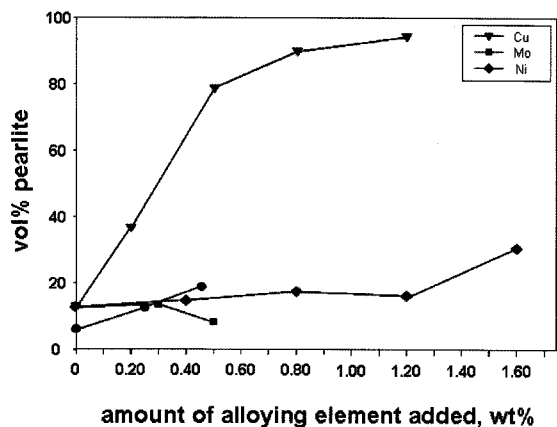


Fig. 8. Variation of the volume percentage of pearlite in the as-cast specimen with alloying element added.

바와 같다. 몰리브덴을 첨가한 경우는 그렇지 않으나 구리와 니켈을 첨가한 경우 그 첨가량이 1.20 및 1.60wt%로 각각 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 각 원소를 첨가하지 않은 경우의 12.6에서 94.6 및 31.0%로 각각 증가하였다. 구리 첨가량이 증가함에 따른 기지 조직의 변화는 Fig. 9에서 보이는 바와 같다. 따라서 구리와 니켈을 첨가한 경우 강도와 경도는 증가하고 연신률은 감소하였으며 그 효과는 구리를 첨가하는 경우가 훨씬 더 컸다.

3.3. 열처리 거동에 미치는 합금 원소의 영향

3.60wt%C - 2.50wt%Si 구상흑연주철의 열처리 거동에 미치는 합금 원소의 영향을 시험하기 위하여 합금 원소를 첨가하여 주조한 시편을 열처리하였다. 열처리된 시편을 기계 가공하여 얻은 인장 시편을 인장 시험하고 미세 조직을 관찰하였다. 첨가한 합금 원소의 함량과 열처리의 종류에 따른 인장 강도의 변화는 Fig. 10~13에서 보이는 바와 같다. 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율을 화상 분석 장치로 측정하였으며 소둔 및 소준한 경우에는 합금 원소 첨가량에 따라 차이는 있으나 페라이트 및 펄라이트 조직을 각각 나타냈으며 대표적인 0.80wt%Ni를 첨가한 시편의 열처리 조건에 따른 기지 조직의 변화는 Fig. 14에서 보이는 바와 같다. 열처리 조건에 따라

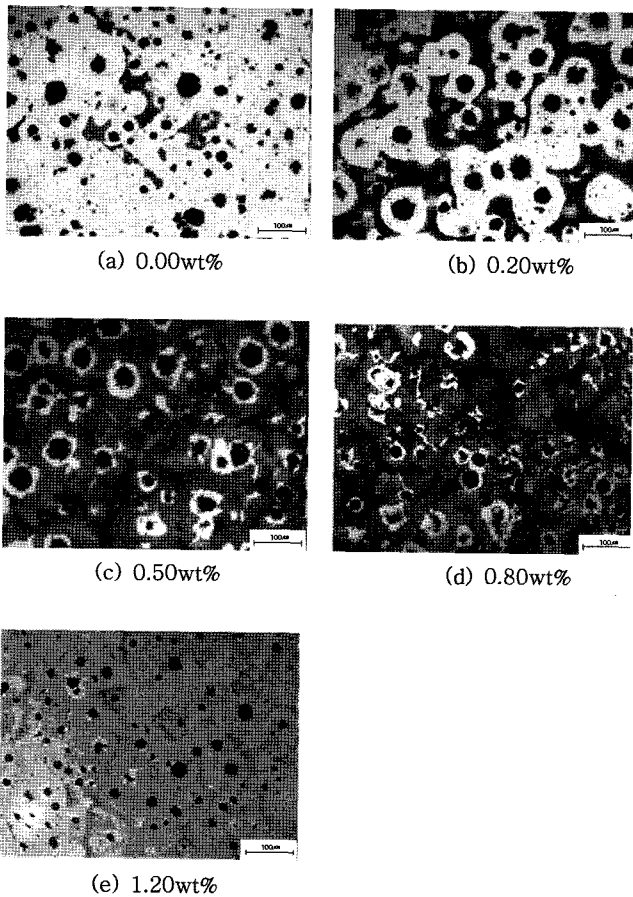


Fig. 9. Variation of microstructure of the as-cast specimen with the amount of copper added.

서로 다른 기지 조직이 형성한 결과를 보여주고 있으며 열처리 결과는 열처리 반응성에 미치는 합금 원소의 영향 시험 결과를 검토하는 데에는 대체로 문제가 없는 것으로 생각되었다. 일반적으로 강도와 경도가 증가하면 연신률이 감소한다. 따라서 여기에서는 열처리한 경우 인장 강도에 미치는 합금 원소의

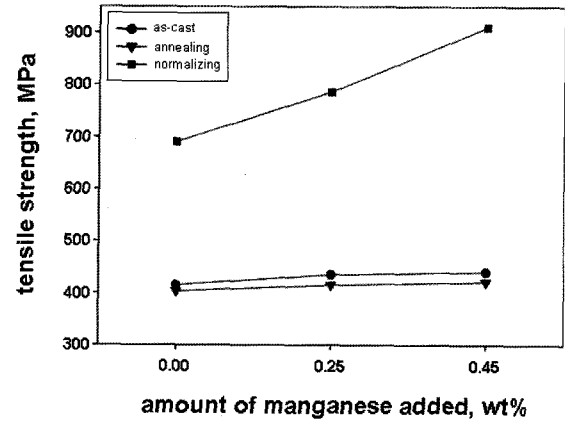


Fig. 10. Variations of the tensile strength of specimen with heat-treatment and the amount of manganese added.

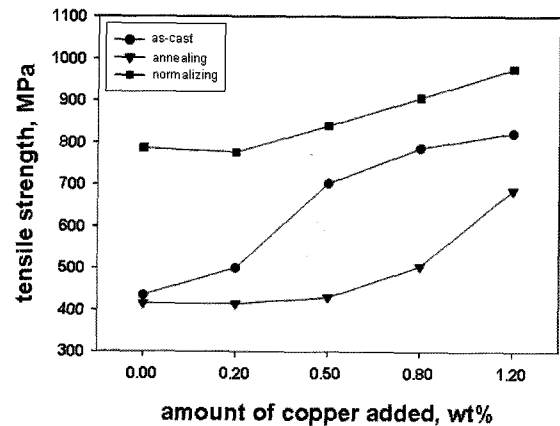


Fig. 11. Variations of the tensile strength of specimen with heat-treatment and the amount of copper added.

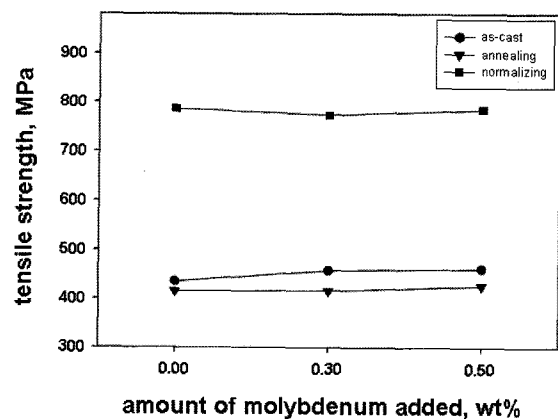


Fig. 12. Variations of the tensile strength of specimen with heat-treatment and the amount of molybdenum added.

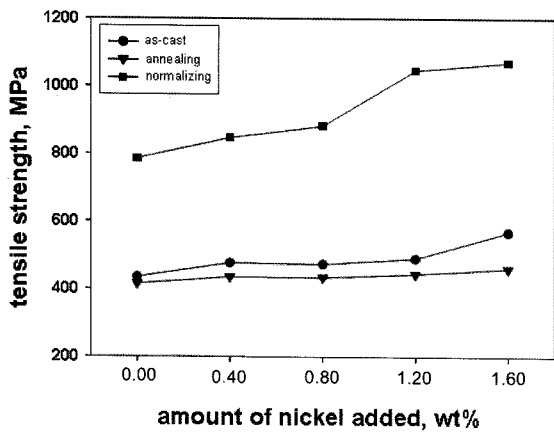


Fig. 13. Variations of the tensile strength of specimen with heat-treatment and the amount of nickel added.

영향을 고찰하였다.

망간 첨가량이 0.00~0.45wt% 범위에서 증가함에 따라 주방 상태 및 열처리한 상태의 인장 강도의 변화는 Table 3 및 4 그리고 Fig. 10에서 보이는 바와 같다. 주방 상태에서 망간 함량이 증가함에 따라 인장 강도는 415에서 440 MPa로 그리

고 소둔 처리한 경우에는 403에서 421 MPa로 약간 증가하였으나 소둔 처리로 인장강도는 전체적으로 낮아졌다. 이것은 망간 첨가량이 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 증가하기는 하나 주방 상태에서 5.9~18.9%인 펄라이트 부피 분율이 소둔 처리로 3.6~4.8%로 감소하였기 때문이다. 소준 처리로 인장 강도가 크게 증가하였으며 망간 첨가량이 증가함에 따라 인장 강도는 690에서 910 MPa로 증가하였다. 이것은 소준 처리한 경우 망간 함량이 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 56.0에서 98.4%까지 크게 증가하였기 때문이다.

구리 첨가량이 0.00~1.20wt% 범위에서 증가함에 따라 주방 상태 및 열처리한 시편의 인장 강도의 변화를 Table 3 및 4 그리고 Fig. 11에서 보이는 바와 같다. 주방 상태에서 구리 첨가량이 증가함에 따라 인장 강도는 435에서 822MPa로 증가하였으며 소둔 처리한 경우에는 415에서 686 MPa로 증가하였으나, 소둔 처리로 인장강도는 주방 상태에 비하여 감소하였다. 이것은 구리 첨가량이 증가함에 따라 주방 상태에서 펄라이트 부피 분율이 12.6에서 94.6%까지 증가하였으나 소둔 처리한 상태에서는 4.4에서 39.4%로 증가는 하나 소둔 처리로 주방 상태에 비하여 펄라이트 부피 분율이 감소하였기 때문이다. 소준 처리로 이 경우에도 주방 상태에 비하여 인장 강도

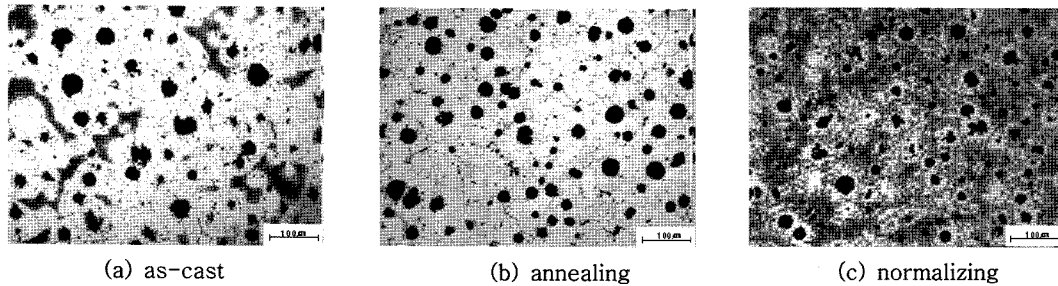


Fig. 14. Microstructures of the specimen containing 0.80% Ni with different heat-treatments.

Table 4. Mechanical properties and matrix structures of annealed and normalized specimens.

specimen	amount added (wt%)	annealed					normalized					remark
		Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	%EIng	BHN	%pearlite	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	%EIng	BHN	%pearlite	
effect of Mn	0.00	256	403	29.6	119	3.6	557	690	6.5	210	56.0	
	0.25	271	415	30.1	128	4.4	719	786	5.5	215	65.7	
	0.45	300	421	14.1	136	4.8	854	910	3.9	273	98.4	
effect of Cu*	0.20	277	414	29.7	126	3.9	667	776	6.8	225	65.9	
	0.50	301	429	27.2	131	5.7	770	839	7.0	255	81.6	
	0.80	362	504	19.4	159	59.0	885	906	5.8	274	93.9	
	1.20	606	686	7.6	194	39.4	878	975	4.8	299	93.8	
effect of Mo*	0.30	293	415	25.6	129	5.2	706	773	8.0	231	19.7	
	0.50	281	426	23.6	129	9.5	735	784	6.9	217	29.7	
effect of Ni*	0.40	321	435	26.5	151	4.9	791	847	8.8	248	19.9	
	0.80	306	433	22.5	137	5.3	841	882	7.6	241	22.6	
	1.20	347	444	25.8	156	5.1	1047	1047	5.6	279	97.0	
	1.60	381	460	24.8	159	4.1	970	1071	4.7	272	96.7	

The aim contents of C and Si were 3.60 and 2.50wt% respectively.

* The aim content of Mn was 0.25wt%.

부피 분율이 65.7에서 93.8%로 증가하였을 뿐만 아니라, 빠른 냉각과 함께 구리의 탄소 확산 억제 효과로 펄라이트가 미세화 되었기 때문이다.

몰리브덴 첨가량이 0.00~0.50wt% 범위에서 증가함에 따라 주방 상태 및 열처리한 시편이 인장 강도의 변화는 Table 3 및 4 그리고 Fig. 12에서 보이는 바와 같다. 주방 상태에서 몰리브덴 첨가량이 증가함에 따라 인장 강도는 435에서 461 MPa로 증가하였으며 소둔 처리한 경우에는 415에서 426 MPa로 증가하였다. 소둔 처리로 인장 강도는 주방 상태에 비하여 감소하였다. 이것은 비록 0.50wt%의 몰리브덴을 첨가한 주방 상태의 경우와 같이 펄라이트 부피 분율이 8.3%로 오히려 감소한 경우도 있으나 몰리브덴 첨가량이 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 증가하였기 때문으로 생각된다. 그리고 소둔 처리한 경우에도 몰리브덴 첨가량이 증가함에 따라 4.4에서 9.5%로 펄라이트 부피 분율이 증가하였다. 그리고 소둔 처리한 경우에 주방 상태에 비하여 전체적으로 펄라이트 부피 분율이 낮아졌다. 소준 처리한 경우에는 인장강도가 773~786 MPa 범위로 크게 높아 졌으나 몰리브덴 첨가에 따라 크게 달라지지 않았다.

니켈 첨가량이 0.00~1.60wt%의 범위에서 증가함에 따라 주방 상태 및 열처리한 시편의 인장 강도의 변화는 Table 3 및 4 그리고 Fig. 13에서 보이는 바와 같다. 주방 상태에서 니켈 첨가량이 증가함에 따라 인장 강도는 435에서 568 MPa로 증가하였다. 소둔 처리 처리로 인장 강도는 감소하였으나 니켈 함량이 이 범위에서 증가함에 따라 415에서 460 MPa로 약간 증가하였다. 주방 상태에서 니켈 함량이 1.60wt%까지 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 12.6에서 31.0%까지 증가하여 인장 강도가 증가하였다. 소둔 처리한 경우에는, 비록 니켈 함량이 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 약간 증가하기는 하나 전체적으로 펄라이트 부피 분율이 주방 상태에 비하여 낮아서 인장 강도가 주방 상태에 비하여 낮은 것으로 생각된다. 니켈 함량이 증가함에 따라 큰 차이는 없으나 인장 강도가 약간 증가한 것은 펄라이트 부피 분율의 변화의 영향과 함께 니켈이 페라이트에 고용되어 약간 고용 강화시켰기 때문으로 생각된다. 소준 처리된 경우에는 인장 강도는 786~1071 MPa의 범위로 주방 상태에 비하여 크게 증가하였으며 니켈 함량이 증가함에 따라 증가하였다. 이것도 소준 처리시 강제 공냉으로 인한 펄라이트 부피 분율의 증가 및 펄라이트 미세화와 함께 니켈 함량이 증가함에 따라 펄라이트의 부피 분율이 증가하고 페라이트의 고용 경화 효과가 증가하였기 때문으로 생각되었다.

4. 결 론

3.60wt%C - 2.50wt%Si 조성의 구상흑연주철의 기계적 성질과 소둔 및 소준 처리시 인장 강도에 미치는 합금 원소의 영향에 관한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 망간 첨가량이 0.45wt%까지 증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 각각 278 및 415 MPa에서 316 및 440 MPa로 증가하고 연신율은 29.2에서 18.3%로 감소하였다.
- 2) 구리 첨가량이 1.20wt%까지 증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 각각 309 및 435 MPa에서 646 및 822 MPa로 크게 증가하고 연신율은 24.2에서 5.0%로 감소하였다.
- 3) 몰리브덴 첨가량이 0.50wt%까지 증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 각각 331 및 416 MPa까지 증가하고 연신율은 23.7~24.4% 범위에서 크게 달라지지 않았다.
- 4) 니켈 첨가량이 1.60wt%까지 증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 각각 436 및 568 MPa까지 증가하고 연신율은 16.7%까지 감소하였다.
- 5) 망간 첨가량이 증가함에 따라 소둔 및 소준 처리시 인장 강도는 각각 403 및 690 MPa에서 440 및 910 MPa까지 증가하였다.
- 6) 구리 첨가량이 증가함에 따라 소둔 및 소준 처리시 인장 강도는 각각 415 및 786 MPa에서 686 및 675 MPa까지 증가하였다.
- 7) 몰리브덴 첨가량이 증가함에 따라 소둔 처리시 인장 강도는 426 MPa까지 증가하였으나, 소준 처리시에는 773~786 MPa 범위에서 크게 달라지지 않았다.
- 8) 니켈 첨가량이 증가함에 따라 소둔 및 소준 처리시 인장 강도는 각각 415 및 786 MPa에서 460 및 1070 MPa까지 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업의 연구 결과로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. F. Smith: "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill, Inc., p. 353(1993)
- [2] M. Gagne: "The Sorelmetal Book of Ductile Iron", Rio Tinto Iron & Titanium Inc., (2004)
- [3] J. D. Mullins: "Ductile Iron 1, Production", Rio Tinto Iron & Titanium Inc., (1992)
- [4] A. Alagarsamy et. al.: "Ductile Iron Handbook", AFS, p. 204(1992)