
 논문

3.60wt%C-2.50wt%Si 구상흑연주철의 경화 및 오스템퍼링 처리시 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향

박정재 * · 서갑성 ** · 권해욱 †

*영남대학교 대학원 금속공학과

**대한특수금속(주)

영남대학교 신소재공학부

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

Jung-Jee Park*, Gap-Sung Seo**, and Hae-Wook Kwon†

*Dept. of Met. Eng., Graduated School, Yeungnam Univ., Gyeongsan, Gyeongbuk, 712-749, Korea

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

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

Abstract

Effects of alloying elements on the mechanical properties of hardened and austempered 3.60wt% C - 2.50wt% C ductile cast iron were investigated. Strength and hardness were increased and ductility was decreased as the amount of alloying element increased. The increasing effect of copper addition on the strength was the most pronounced. The strength and hardness were greatly increased and ductility was decreased by hardening. The effect of alloying element on the mechanical properties of the hardened ductile cast iron was not so pronounced due to the high contents of C and Si. The strength and hardness of austempered ductile cast iron were greatly increased, meanwhile the difference of strength from that of hardened one was not so big. The ductility of the former was higher than that of the latter. The strength and ductility of austempered ductile cast iron with 0.25%Mn were the maximum of all Mn added ones. The maximum strength of that was obtained with the addition of 0.80wt%Cu or 2.00wt%Ni along with this amount of Mn added.

Key words : Cast Iron, Ductile Cast Iron, Heat - treatment, Mechanical Properties, Alloying element.

(Received September 23, 2008 ; Accepted November 20, 2008)

1. 서 론

구상흑연주철은 탄소 함량이 높은 철기 합금이며 용탕을 구상화 처리하여 응고가 일어나는 동안 구상흑연이 정출하여 강도, 경도, 연성 및 인성을 향상시킨 주철이다. 주방 상태에서는 주로 페라이트와 펄라이트가 혼합된 기지에 구상흑연이 분산되어 있다. 기지 중 펄라이트의 부피 분율이 많을수록 강도와 경도는 증가하고 인성은 감소한다. 주방 상태에서 인장 강도는 탄소 당량에 따라 대체로 400 ~ 700 MPa의 범위 내에 있으며 합금 원소의 첨가량에 따라 달라진다[1,2].

일반적으로 구상흑연주철 주조품을 열처리하여 미세 조직과 기계적 성질을 제어할 수 있으며 그 목적에 따라 열처리 방법은 달라진다. 그리고 열처리 반응성을 향상시키기 위하여 망간, 구리, 몰리브덴 및 니켈 등과 같은 합금 원소를 첨가한다. 이와 같은 합금 원소는 오스테나이트가 페라이트와 펄라이트로 변태하는 것을 억제한다[2,3].

응력 제거 처리를 제외한 모든 열처리는 고온 영역으로 가열하는 오스테나이트화 처리를 포함한다. 강철에 비하여 구상흑연주철은 탄소와 규소 함량이 높기 때문에 열처리 반응성이 크게 다르다. 임계 온도인 A_1 온도는 규소 함량이 증가함에 따라 증가한다. 구상흑연 주철은 탄소 및 규소 함량이 높으므로 경화능이 큰 반면에 탄소 함량이 높으므로 쿨링 시 균열이 발생할 수 있다. 따라서 구상흑연주철의 열처리시 화학 조성, 오스테나이트화 처리 온도와 시간 및 냉각 속도를 조절하는 것이 매우 중요하다. 규소 함량이 높기 때문에 오스테나이트 기지 중 탄소의 고용도가 낮다. 구상흑연은 오스테나이트화 처리하는 동안 기지로 탄소를 공급하고 냉각하는 동안에는 흡수한다. 구상흑연주철의 기지 중 탄소 함량은 규소 함량과 열적 이력에 따라서 달라진다[2,3].

구상흑연주철을 오스테나이트화 처리한 후 냉각하는 동안 오스테나이트의 변태를 제어하는 것이 열처리의 근거가 된다. 화학 조성 및 냉각 속도에 따라서, 탄소 화산에 의하여 오스테

†E-mail : hwkwon@ynu.ac.kr

나이트가 변태하여 페라이트 펄라이트 또는 이들의 혼합 조직 그리고 베이나이트 등의 기지 조직을 형성한다. 냉각 속도가 더욱 빨라지면 오스테나이트는 마르텐사이트로 변태한다.

경화 열처리하는 어느 정도의 연성과 인성을 가지는 상태에서 높은 강도와 경도를 얻기 위한 열처리이다. 먼저 주조품을 오스테나이트화 처리 온도로 가열하고 미리 정해진 시간동안 이 온도에서 유지시킨 후 완전히 마르텐사이트 기지를 얻기 위하여 기름 또는 다른 냉매 욕에 쿨링시키는 열처리이다. 그리고 즉시 쿨링된 마르텐사이트의 연성을 약간 회복시키고 취성을 감소시키기 위하여 임계 온도 아래의 비교적 저온으로 재가열하는 템퍼링한다. 경화 열처리로 어느 정도의 연성을 가지고 적당한 충격 저항을 유지한 상태에서 구상흑연주철의 높은 인장 강도와 피로 특성을 가지는 넓은 범위의 기계적 성질을 얻을 수 있다[2,4].

오스테퍼링은 높은 강도와 연성 및 인성을 동시에 가지는 오스테퍼라이트 기지 조직을 얻기 위한 열처리이다. 이와 같은 조직을 가지는 주철 재료를 오스테퍼드 구상흑연주철(austempered ductile cast iron, ADI)이라 한다. 오스테퍼드 구상흑연주철은 강도, 인성 및 마모 저항 등의 특성을 조합한 획기적인 특성을 나타내는 주철의 한 종류이다. 오스테퍼드 구상흑연주철은 높은 연성과 인성을 가지는 보통의 구상흑연주철에 비하여 거의 두 배 정도로 강도가 크다. 이와 같은 특성과 오스테퍼드 구상흑연주철 재료로 제조할 경우 부품의 중량을 감소시킬 수 있는 가능성으로 인하여 크게 관심을 가지게 되었다[4-7].

본 연구에서는 구상흑연주철을 열처리하여 기계적 성질을 향상시키기 위한 기초 연구를 하였다. 기본 재료로 탄소와 규소 함량이 각각, 오스테퍼드 구상흑연주철을 제조할 때 일반적으로 선택되는 조성 범위의 평균 조성인[2], 3.60 및 2.50wt% 조성의 구상흑연주철을 선택하였다. 이 조성의 구상흑연주철을 경화 열처리 및 오스테퍼링할 때 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향을 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 용해 및 주조

기계적 성질 시험과 미세 조직 검사용 시편을 얻기 위하여

표준 Y- 블록 시편을 주조하였다. 이 때 얻은 Y- 블록 시편의 모양과 크기는 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 두 개의 Y- 블록 금형과 주형 상자를 이용하여 각 조건별로 생형을 조형하였다.

75 kW 용량의 고주파 유도 용해로를 이용하여 용해하였다. 망간의 함량을 변화시키거나 낮게 유지하기 위하여 장입용으로 저 망간 주물선을 사용하였다. 탄소의 목표 함량을 3.60wt%로 주물선과 강 고철을 장입하여 20 kg의 용탕을 얻었다. 기본 용탕의 규소의 목표 함량 1.32wt%를 얻기 위하여 규소 함량이 약 75.0wt%인 페로실리콘을 노중 용탕에 첨가하였다. R 형태의 열전대를 부착시킨 침적식 온도계를 이용하여 용탕의 온도를 측정하였으며 온도가 약 1,450 °C에 도달하였을 때 Y- 블록 시험 주조품 중 0.04wt%의 잔류 마그네슘 함량을 얻기 위하여 노 중 용탕에 5.0wt%Mg - Fe - Si 합금을 플런징하는 방법으로 구상화처리하였다. 그리고 필요에 따라 합금 원소를 첨가한 후 슬러스를 사용하여 용탕 표면의 슬래그를 제거하고 레이들에 출탕하였다. 이 때 용탕의 규소 함량은 약 2.10wt%이며 2.50wt%의 최종 함량을 얻기 위하여 규소 함량을 0.40wt% 증가시키는 방법으로 후접종 처리하였다. 접종제로는 직경 약 1.0~3.0 mm 크기의 입자형 1.0wt%Ba - Fe - Si 합금을 사용하였다. 용해시 사용한 장입물, 용탕 처리제 및 합금 원소 첨가제의 화학 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다.

첨가한 접종제가 완전히 녹아 들어간 후 슬러스를 사용하여 용탕 표면의 슬러스를 제거하고 용탕 온도를 측정 후 주형에 주입하였다. 이 때 주입 온도는 1,300~1,350 °C의 범위 내에 있었다. 또한 구리판 위에 설치한 금형에 소형 레이들을

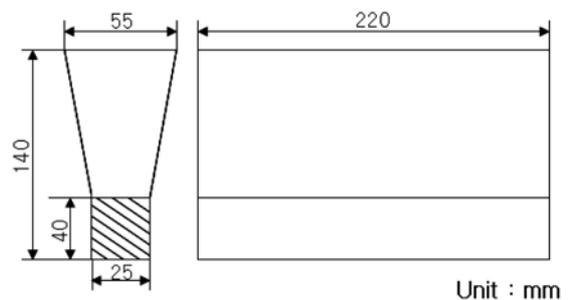


Fig. 1. Standard Y-block specimen.

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

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	

이용하여 용탕을 주입하여 화학 성분 분석용 칠 시편을 얻었다. 주형에 주입된 용탕이 완전히 응고되고 상온으로 냉각된 후 탈사 및 쇼트 피닝하여 각 조건별로 2 개의 Y 블록 시편을 얻었다.

2.2 합금 원소의 첨가

경화 열처리 및 오스테퍼링한 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향을 시험하였다. 먼저 75wt%Mn 함량의 페로망간을 사용하여 망간을 첨가하였으며 망간을 제외한 다른 합금 원소의 영향을 시험한 경우 규소 함량이 2.50wt% 인 것을 고려하여 망간 첨가량을 0.25wt%로 일정하게 하였다. 각 합금 원소 첨가제의 화학 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 모든 경우의 탄소 및 규소 함량은 각각 3.60 및 2.50wt%로 일정하게 하였다.

구리의 첨가량은 0.00, 0.20, 0.50, 0.80, 1.20, 및 1.60wt%로 변화시켰다. 몰르브덴 첨가량은 0.00, 0.30 및 0.50wt%로 변화시켜 시험하였으며 니켈 첨가량은 0.00~2.40wt% 범위에서 0.40wt% 간격으로 변화시켰다. 이와 같이 변화시켜 실험한 결과 0.80wt% 구리와 2.00wt% 니켈을 각각 단독으로 첨가할 경우 오스테퍼링 처리한 주조품의 기계적 성질이 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 이 두 함량의 합금 원소와 0.30wt%의 몰리브덴 두 가지씩 또는 세 가지 모두를 동시에 첨가하여 동시에 첨가의 영향을 시험하였다.

2.3 열처리

경화 열처리 및 오스테퍼링 처리한 3.60wt%C - 2.50wt%Si 조성의 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향을 시험하기 위하여 열처리 실험을 하였다. 3.1 kW 용량의 발열체가 칸탈인 상용 및 최고 온도가 각각 900 및 1200 °C 인 박스로를 이용하여 오스테나이트화 및 템퍼링 처리하였다. 오스테퍼링 처리를 하기 위해서는 7.8 kW 용량의 발열체가 니크롬선인 사용 및 최고 온도가 역시 900 및 1,200°C인 염욕로를 이용하였다. 염욕로는 질산나트륨과 질산칼륨을 중량비로 45:55인 저온용 혼합염을 사용하였다.

용해 및 주조하여 얻은 표준 Y-블록 시편을 밴드 쓰를 이용하여 절단하여 직사각형 단면의 봉재 시편을 2 개씩 얻었다. 이를 기계 가공하여 얻은 단면적 감소부의 직경과 표점 거리가 각각 6.25 및 25.0 mm인 서브 사이즈 인장 시편을 각 조건별로 3 개씩 사용하여 열처리하였다. 서브 사이즈 인장 시편의 모양과 크기는 Fig. 2, (a)에서 보이는 바와 같다.

경화 열처리하는 경우에는 900 °C의 온도에서 1 시간동안 오스테나이트화 처리하고 수용성 기름 욕에 기름 퀘칭하였다. 그리고 550 °C의 온도에서 2 시간동안 템퍼링한 후 공냉하였다. 오스테퍼링하는 경우에는 3.1 kW 용량의 박스로에 서브 사이즈 인장 시편을 장입한 후 전원을 공급하여 상온에서 900 °C의 온도까지 승온하였다. 이때 걸린 시간은 1.5 시간이었다. 이 온도에서 45 분동안 가열하여 오스테나이트화 처리하였다. 그리고 380 °C의 온도에서 유지되고 있는 염욕에 퀘칭한 후 1 시간동안 유지하여 등온 열처리한 후 공냉하였다.

2.4 화학 조성 분석 및 미세 조직 관찰

시험 주조품의 화학 조성을 확인하기 위하여 얻은 화학 조성 분석용 칠 시편을 100 번 연마지를 사용하여 연마한 후 에미션 스펙트로미터(emission spectrometer)를 이용하여 분석하였다. 주방 상태의 한 쪽 끝으로부터 25 mm위치를 절단하여 미세조직 관찰용 시편을 얻었다. 경화 열처리 및 오스테퍼링 처리한 경우에는 열처리 및 인장 시험이 끝난 서브 사이즈 인장 시편의 헤드를 절단하여 미세 조직 관찰용 시편을 얻어 마운팅하였다. 모든 경우 절단면을 보통의 방법으로 조연마하고 다이아몬드 페이스트로 1 μm 등급까지 세연마하였다. 주방 상태의 시편의 경우 부식시키기 전의 흑연 형상을 관찰하였다. 구상화율 측정 장치를 이용하여 구상화율을 측정하였으며 시편 당 5 위치를 선정하여 측정하고 최대값과 최소값을 제외한 세 값의 평균을 얻었다. 그리고 주방 상태와 열처리한 시편의 경우 3.0% 나이탈 용액으로 부식시킨 후 기지 조직을 관찰하였다. 주방 상태 시편의 경우 구상화율 측정 장치를 이용하여 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율을 측정하였다. 이 경우에도 5 위치를 선정하여 측정하고 최대 및 최소값을 제외한 세 값의 평균값을 얻었다. 열처리한 시편의 경우 기지 조직을 관찰하여 열처리 결과를 확인하였다.

2.5 기계적 성질 시험

주방 상태의 경우 미세 조직 관찰용 시편을 절단하고 남은 봉형 시편을 기계 가공하여 얻은 KS B 0801 규격 중 10 호 표준 시편을 사용하여 인장 시험하였다. 두 가지 종류의 인장 시편의 모양과 크기는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 50 톤 용량의 만능 재료 시험기를 이용하여 시험하였다. 표준 인장 시편의 경우 2.0 mm/min의 크로스 헤스 속도 조건에서 그리고 서브사이즈 시편의 경우 STS 316L 스테인레스 강 치구와 조립하여 만능 재료 시험기에 장착시킨 후 1.0 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 평균값을 얻었다. 그리고 미세 조직 관찰용 시편을 다시 연마하여 하중 3,000 kg의 조건에서 브리넬 경도를 측정하였다. 이때에도 3 회 측정하여 평균값을 얻었다.

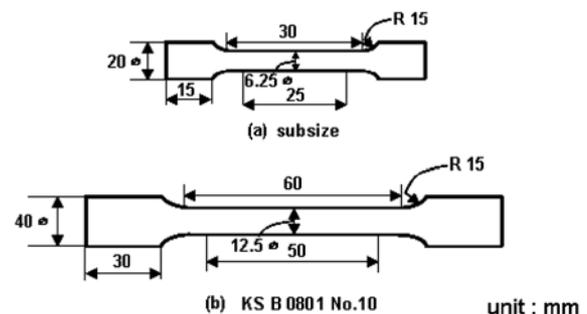


Fig. 2. Tensile test specimen.

2.6 잔류 오스테나이트 부피 분률의 측정

오스템퍼링 처리한 시편 중 잔류 오스테나이트 부피 분률을 측정하였다. X-선 회절 장치를 이용하여 연속 스캐닝하여 측정하였다. 가속 전압과 전류는 각각 40 kV 및 100 mA였으며 스캐닝 속도는 5°/mm였다. 60~90° 범위에서 2θ 값을 변화시켰으며 페라이트는 (200)면을 그리고 잔류 오스테나이트는(220)면의 피크를 각각 선택하여 상대 적분 강도로부터 잔류 오스테나이트의 부피 분률을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화학 조성 분석 결과

각 용해시 조건별로 얻은 화학 조성 분석용 칩 시편을 분석하였으며 그 결과는 Table 2에서 보이는 바와 같다. 목표 함량이 3.60wt%인 탄소는 3.52~3.72% 범위 내에 있었다. 목표 함량이 2.50wt%인 규소는 2.73wt%와 같이 실험 오차 범위를 벗어난 경우도 있기는 하나 대부분 2.45~2.60wt% 범위 내에 있었다. 잔류 마그네슘 함량은 0.04~0.05wt%범위인 것으로 나타났다.

0.25 및 0.45wt%로 변화시킨 망간 함량은 각각 0.24 및 0.44로, 그리고 0.20, 0.50, 0.80, 1.20 및 1.60wt%로 변화시

킨 구리 함량은 각각 0.20, 0.50, 0.77, 1.16 및 1.56wt%로 나타났다. 그리고 0.40~2.40wt% 범위에서 0.40wt% 간격으로 변화시킨 니켈 함량은 각각 0.38, 0.76, 1.21, 1.57, 1.96 및 2.36wt%였다. 각각 0.80, 0.30 및 2.00wt%의 구리, 몰리브덴 및 니켈을 두 원소 또는 세가지 모두를 첨가한 경우 각 원소의 함량은 0.80~0.81, 0.27~0.33 그리고 1.96~1.98wt% 범위인 것으로 나타났다. 모든 시편의 화학 조성은 실험 오차 범위 내에 있었으며 경화 열처리 및 오스템퍼링 처리한 3.60wt%C - 2.50wt%Si 조성의 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향 시험 결과를 분석하는 데에는 대체로 문제가 없는 것으로 판단되었다.

3.2 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향

3.2.1 망간의 영향

먼저 주방 상태의 기계적 성질과 기지 조직에 미치는 망간 첨가의 영향을 시험하였으며 그 결과는 Table 3에서 보이는 바와 같다. 망간 첨가량이 0.45%까지 증가함에 따라 항복 강도와 인장 강도는 증가하였다. 그리고 연신률은 감소하였으며 브리넬 경도값은 증가하였다. 이의 원인을 밝히기 위하여 각 시편의 미세 조직을 관찰하였으며 그 결과도 Table 3에서 보이는 바와 같다. 구상화율은 96%이상이고 단위 면적당 구상흑

Table 2. Chemical analyses of the specimens.

(wt%)

specimen	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	
	1.60	3.61	2.56	0.25	0.03	0.005	0.04	1.56	0.001	0.010	
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	
	2.00	3.63	2.64	0.27	0.03	0.005	0.04	0.012	0.001	1.96	
	2.40	3.60	2.58	0.25	0.03	0.004	0.05	0.008	0.002	2.36	
0.80wt%Cu-0.30wt%Mo	3.59	2.53	0.23	0.03	0.004	0.04	0.80	0.29	0.005		
0.30wt%Mo-2.00wt%Ni	3.61	2.55	0.30	0.03	0.007	0.04	0.01	0.33	1.97		
2.00%Ni-0.80%Cu	3.63	2.59	0.25	0.03	0.010	0.04	0.80	0.015	1.98		
0.80wt%C-0.30wt%Mo-2.00wt%Ni	3.69	2.56	0.25	0.03	0.009	0.04	0.81	0.27	1.96		

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

* The aim content of Mn was 0.25wt%.

Table 3. Results of the measurement of mechanical properties and observation of microstructure of as-cast specimen.

specimen	mechanical properties				microstructure			remark
	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	%Elong.	BHN	nodularity (%)	nodlue count (mm ²)	%pearlite	
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
	1.60	504	647	8.3	248	98.3	66.0	97.5
effect of	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
	2.00	431	550	16.8	198	96.3	79.1	34.1
	2.40	497	612	13.2	204	98.6	68.0	34.9

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

* The aim content of Mn was 0.25wt%.

연의 수도 대체로 80이상으로 건정한 구상흑연주철 조직을 얻었다. 그리고 망간 첨가량이 0.45%까지 증가함에 따라 기지 조직 중 펄라이트 부피 분률이 증가하였다. 망간은 탄화물 형성 원소이며 비록 펄라이트 기지 조직을 얻기 위하여 의도적으로 첨가하는 원소가 아니지만 응고가 일어나는 동안 오스테나이트 기지에 고용되어 공석 온도 부근에서 오스테나이트가 변하는 동안 탄소의 확산을 억제하여 펄라이트의 형성을 촉진한다. 따라서 망간 첨가량이 증가함에 따라 주방 상태의 기지 조직 중 펄라이트 부피 분률이 증가하고 이에 따라 강도 및 경도는 증가하고 연신률은 감소하였다.

3.2.2 구리, 몰리브덴 및 니켈 첨가의 영향

오스테퍼링 처리한 경우 망간을 0.25% 첨가한 경우에 강도, 경도 및 연신률이 상대적으로 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 다른 합금 원소의 영향을 시험하는 모든 경우에 망간의 함량을 0.25%로 일정하게 하였다.

구리, 몰리브덴 및 니켈 함량을 서로 다르게 첨가하여 이의 기계적 성질과 미세 조직에 미치는 영향을 시험한 결과는 Table 3에서 보이는 바와 같다. 구리, 몰리브덴 및 니켈의 3가지 합금 원소를 각각 첨가한 경우 정도의 차이는 있으나 합금 원소의 첨가량이 증가함에 따라 항복 강도와 인장 강도는 증가하고 연신률은 감소하였다. 특히 구리를 첨가한 경우 그 효과는 매우 더 컸으며 몰리브덴을 첨가한 경우와는 달리 경도도 크게 증가하였다. 니켈을 첨가한 경우 경도는 약간 증가하였다.

이러한 결과의 원인을 알아 보기위하여 조건별 시편의 미세 조직을 관찰하였으며 Table 3에서 보이는 바와 같다. 몰리브덴을 첨가한 경우는 그렇게 얇으나 구리와 니켈을 첨가한 경우

그 첨가량이 각각 증가함에 따라 펄라이트 부피 분률이 증가하였으며 특히 그 증가 속도는 구리를 첨가한 경우가 훨씬 더 큰 것으로 나타났다. 구리 첨가량이 증가함에 따라 펄라이트 부피 분률이 크게 증가하였다.

구상흑연주철의 기계적 성질에는 기지 조직의 영향이 매우 크다. 주방 상태의 기지 조직을 조절하기 위하여 합금 원소를 첨가하며 구리는 탄화물 형성을 촉진시키지 않고 펄라이트 형성을 촉진하는 원소이다. 몰리브덴과 니켈은, 펄라이트 기지 조직을 얻기 위하여 첨가하는 원소는 아니며, 비록 그 효과가 구리에 비해서는 훨씬 낮으나 기지 조직 중 펄라이트 형성을 촉진한다. 이것은 망간의 경우와 마찬가지로 응고가 일어나는 동안 오스테나이트 기지 중에 고용되었다가 공석 온도 범위를 통과하여 냉각되는 동안 탄소의 확산을 억제하여 펄라이트 형성을 촉진하였을 것이기 때문이다.

3.3 열처리 시편의 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향

경화 열처리 및 오스테퍼링 처리시 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향을 시험하였다. 주조하여 얻은 Y-블록 시험 주조품을 절단하여 얻은 봉재 시편을 기계 가공한 표점 거리 25 mm의 서브사이즈 인장 시편을 열처리하였다. 이와 같이 얻은 시편의 열처리 만족도를 확인하기 위하여 미세 조직을 관찰하였으며 그 대표적인 조직은 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 열처리 결과 얻은 미세 조직은 열처리한 시편의 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향을 분석하는 데에는 별 문제가 없는 것으로 나타났다. 그리고 인장 시험한 결과와 첨가한 합금 원소의 함량과 열처리 종류에 따른 강도의 변화는 각각 Table 4 및 Fig. 4~8에서 보이는 바와 같다.

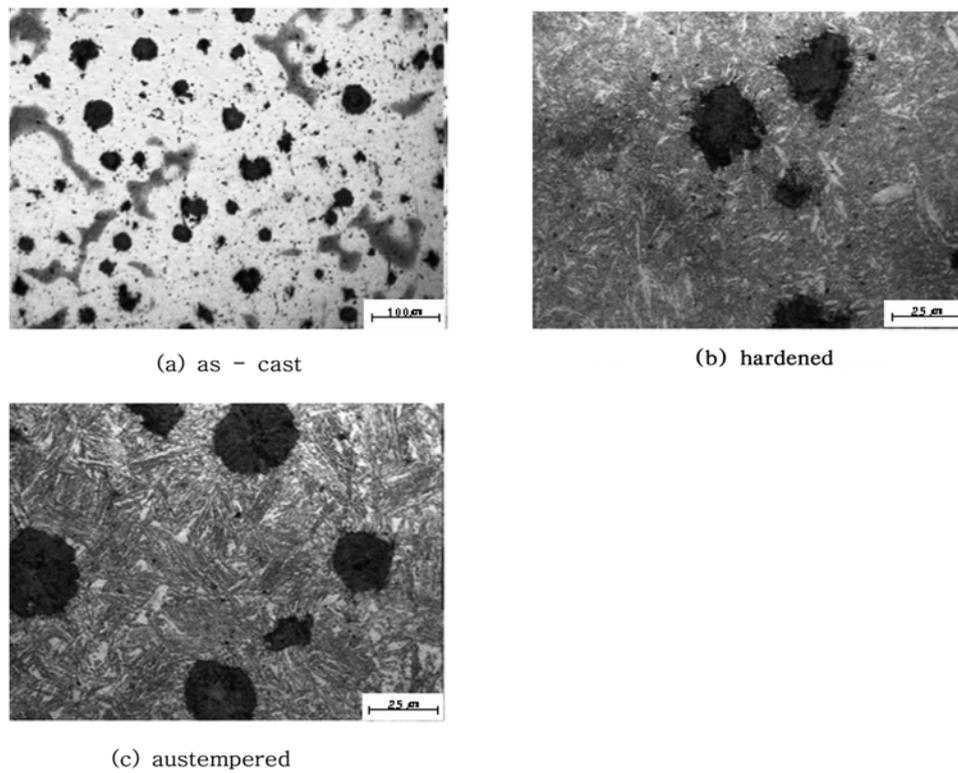


Fig. 3. Variation of the microstructure of the specimen containing 0.8%Ni with heat - treatment.

Table 4. Mechanical properties of quenched and tempered and austempered specimens.

specimen	quenched and tempered				austempered				remark
	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	%Elong.	BHN	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	%Elong.	BHN	
effect of Mn	0.00	949	1018	3.2	313	974	1042	12.7	273
	0.25	946	996	3.8	300	1010	1070	15.0	270
	0.45	952	1020	2.8	307	999	1027	12.0	270
effect of Cu*	0.20	948	1026	4.7	300	972	1052	13.1	273
	0.50	948	1019	4.7	317	992	1050	13.7	290
	0.80	946	992	4.1	320	998	1083	15.7	290
	1.20	950	1060	3.8	323	957	1084	16.4	283
	1.60	854	927	1.5	301	923	963	5.8	281
effect of Mo*	0.30	982	1060	5.1	317	1001	1046	8.4	279
	0.50	947	1022	5.7	324	982	992	7.6	268
effect of Ni*	0.40	949	1028	4.3	288	953	1049	12.3	273
	0.80	952	1060	3.4	352	874	1007	12.4	267
	1.20	950	1091	3.9	308	965	1072	12.3	265
	1.60	954	1085	2.7	307	965	1043	15.3	251
	2.00	953	1085	4.2	302	894	1076	16.7	252
	2.40	955	1078	2.6	316	957	1026	12.1	267

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

* The aim content of Mn was 0.25wt%.

3.3.1 경화 열처리

경화 열처리한 경우에는 Table 4 및 Fig. 4~8에서 보이는 바와 같이 강도와 경도는 주방 상태에 비하여 매우 더 큰 값

으로 나타났다. 그러나 연신률은 상대적으로 더 낮아졌다. 이것은 경화 열처리로 템퍼드 마르텐사이트 기체가 형성되었기 때문이다. 시편의 화학 조성 중 탄소와 규소 함량이 각각 3.60

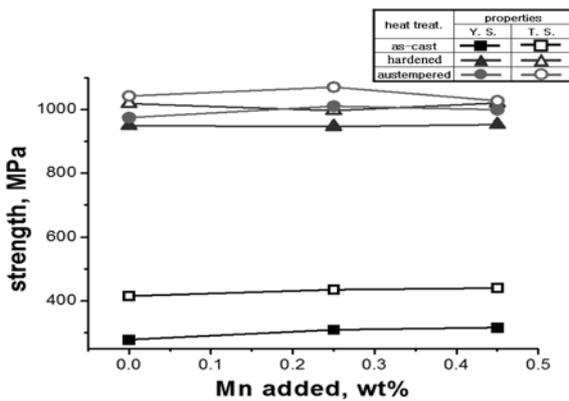


Fig. 4. Variations of strength of specimen with heat - treatment and the amount of Mn added.

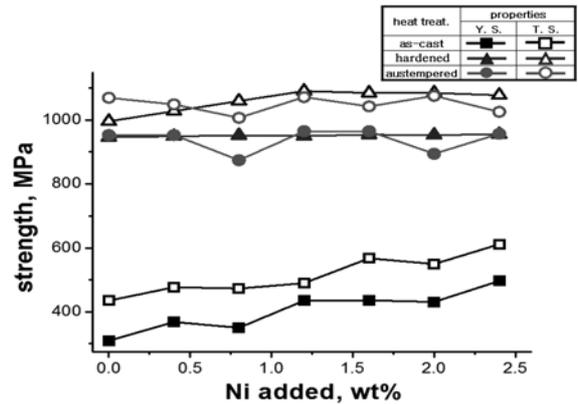


Fig. 7. Variations of strength of specimen with heat - treatment and the amount of Ni added.

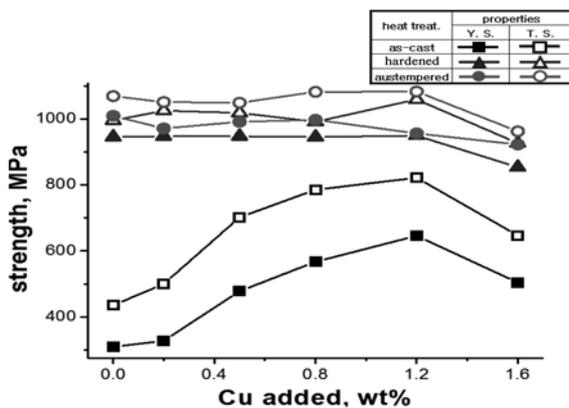


Fig. 5. Variations of strength of specimen with heat - treatment and the amount of Cu added.

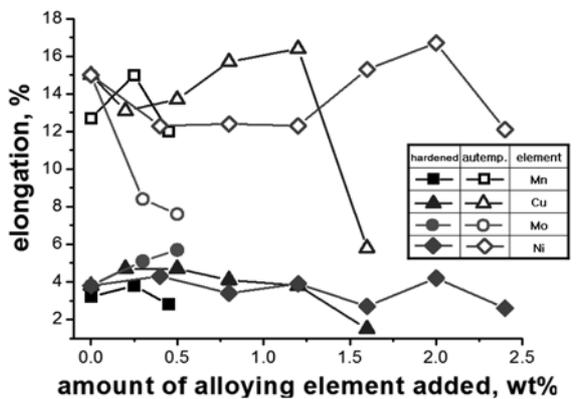


Fig. 8. Variations of elongation of the specimen with heat - treatment and alloying element added.

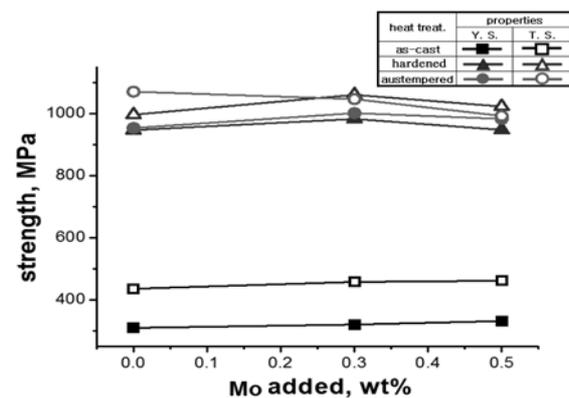


Fig. 6. Variations of strength of specimen with heat - treatment and the amount of Mo added.

및 2.50%로 매우 높기 때문에 다른 합금 원소의 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 니켈의 경우 첨가량이 1.20%까지 증가함에 따라 강도는 증가하였다가 니켈 함량이 그 이상으로 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 니켈 함량이 증가함에 따라 경화능은 증가하나 M_s 온도도 증가하여 잔류 오스테나이트 부피 분률이 약간 증가하였기 때문으로 생각된다.

3.3.2 오스테퍼링 처리

오스테퍼링한 시편의 경우에는 Table 및 Fig. 4~7에서 보이는 바와 같이 강도 및 경도가 크게 증가하였다. 또한 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 경화 열처리한 경우에 비하여 더 높거나 비슷한 정도값을 가지면서 연신률이 훨씬 더 높다.

망간 첨가량을 변화시킨 경우 전체적으로 경도는 그렇지 않으나 강도와 연신률은 경화 열처리한 경우보다 더 높았다. 그리고 망간 첨가량이 0.25%인 경우에 항복 강도, 인장 강도 및 연신률이 각각 1,010, 1070 MPa 및 15.0%로 다른 두 경우보다 더 높았다. 따라서 다른 합금 원소의 영향을 시험시 모든 경우에 망간 함량을 0.25%로 일정하게 하였다. 망간은 경화능을 증가시키기는 하나 응고가 일어나는 동안 공정 셀 경계에 편석되어 탄화물을 형성시켜 오스테퍼링 반응을 지연시킨다. 따라서 이와 같은 악영향을 줄이기 위하여 0.30%이하로 제어할 필요가 있다.

구리를 합금 원소로 첨가한 경우 구리 함량이 0.80 및 1.20%로 증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 각각 998 및 1,083 그리고 957 및 1084 MPa까지 증가하였다가 1.60%로 증가하면 오히려 낮아지고 연신률도 감소하였다. 그 이유를 알아보기 위하여 기지 조직 중 잔류오스테나이트 부피 분률을 측정하여 비교하였으며 그 결과는 Fig. 9에서 보이는 바와 같

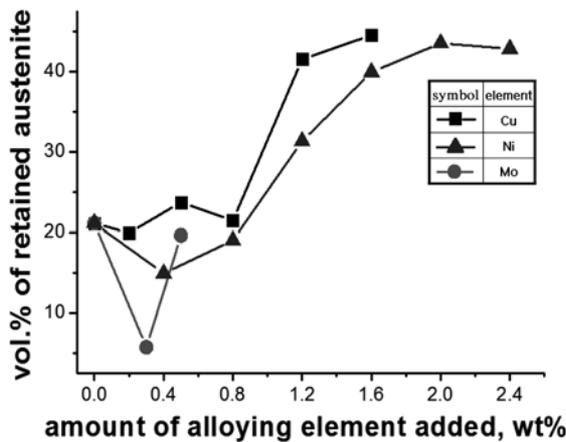


Fig. 9. Variations of the volume percentage of retained austenite with the amount of alloying element added.

다. 기지 조직 중 잔류 오스테나이트 부피 분율을 측정할 값이 오차가 비교적 클 것으로 예상되기는 하나 구리 함량이 0.80%까지 증가함에 따라 21.4%로 약간 감소하였다가 구리 함량이 1.20 및 1.60%로 더욱 증가함에 따라 41.5%로 급격히 증가하였다. 따라서 구리 첨가량이 0.80%인 경우에 최고의 강도를 나타낸 것으로 생각된다. 잔류 오스테나이트 부피 분율이 감소할수록 일반적으로 강도는 증가하고 연신률은 감소하는

것으로 알려져 있으나 얻은 실험 결과는 그렇지 않고 강도와 연신률이 동시에 증가하였다. 이는 재현성 실험을 통하여 재확인하고 그 원인을 밝히기 위한 연구가 더 필요한 것으로 생각된다.

몰리브덴 함량이 0.50%까지 증가함에 따라 첨가하지 않은 경우에 비하여 강도와 연신률은 동시에 감소하였다. 몰리브덴은 경화능을 증가시키고 오스테나이트 조직을 얻는데 유용한 것으로 알려져 있으나 탄소 확산에 의하여 페라이트 형성을 억제하는 작용은 작고 0.30%이상으로 존재하면 편석되어 기계적 성질을 나쁘게 하는 경향이 있다. 이런 현상을 완화시키기 위하여 구리 또는 니켈과 동시에 첨가하는 것을 권장하고 있다. 따라서 합금 원소의 동시 첨가의 영향을 조사하기 위해서 0.30%를 선택하였다.

니켈은 경화능을 향상시키기 위하여 첨가하며 니켈의 경우에도 2.00%까지 첨가량이 증가함에 따라 오차가 비교적 큰 것으로 예상되기는 하나 강도는 증가하였다. 니켈 첨가량이 그 이상으로 증가하면 오히려 감소하였다. 이는 잔류 오스테나이트 부피 분율이 증가하는 것으로 생각된다. 앞에서도 언급했듯이 잔류 오스테나이트 부피 분율이 감소할수록 강도는 증가하고 연신률은 감소하는 것으로 알려져 있으나, 얻은 실험 결과는 강도와 연신률이 동시에 증가하였다. 따라서 니켈 첨가량에 따라 2.00%에서 기계적 성질 시험시 제일 큰 것으로 생각되어 다른 합금과의 동시 첨가시 최적 니켈 첨가량을 2.00%로 하였다.

Table 5. Mechanical and matrix structure of the as-cast specimen and the former of the heat treated specimens containing simultaneously added elements.

specimen	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	%Elong.	BHN	%pearlite	remark
as-cast	0.80%Cu-0.30%Mo	455	702	4.9	238	88.2
	0.30%Mo-2.00%Ni	483	522	7.9	187	25.9
	0.80%Cu-2.00%Ni	567	870	4.5	267	94.9
	0.80%Cu-0.30%Mo-2.00%Ni	646	892	5.7	282	91.4
Q. T.	0.80%Cu-0.30%Mo	834	1097	1.8	335	-
	0.30%Mo-2.00%Ni	885	1018	1.3	324	-
	0.80%Cu-2.00%Ni	889	952	1.5	326	-
	0.80%Cu-0.30%Mo-2.00%Ni	833	1064	2.5	306	-
austempering	0.80%Cu-0.30%Mo	663	943	4.7	276	-
	0.30%Mo-2.00%Ni	674	1049	7.2	293	-
	0.80%Cu-2.00%Ni	703	976	5.7	290	-
	0.80%Cu-0.30%Mo-2.00%Ni	704	1050	7.5	284	-

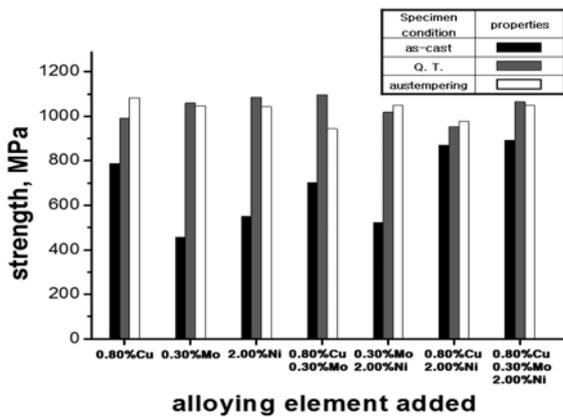


Fig. 10. Effect of simultaneous addition of alloying elements on the strength of the specimen.

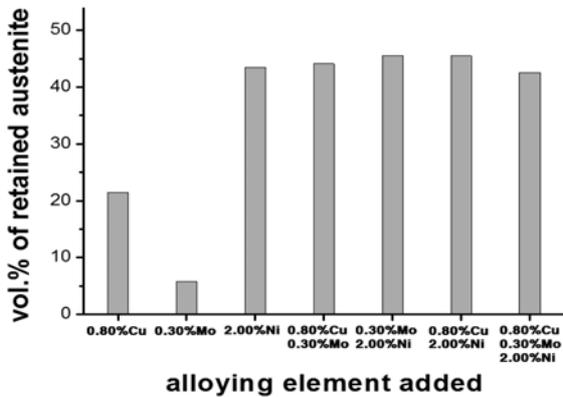


Fig. 11. Variations of the volume percentage of retained austenite in the matrix of the austempered specimen with simultaneous addition of alloying elements.

3.4 열처리 거동에 미치는 구리, 몰리브덴 및 니켈의 동시 첨가 영향

구상흑연주철의 열처리 반응성에 미치는 동시 첨가의 영향을 연구하기 위하여 구리, 몰리브덴 및 니켈 세 가지 원소 중 두 가지 또는 세 가지 모두를 동시에 첨가하여 시험하였다. 단독 첨가의 영향 시험 결과 구리 및 니켈의 최적 첨가량은 0.80% 및 2.00%인 것으로 나타났으며 몰리브덴의 첨가량은 0.30%를 선택하였다.

세 가지 원소 중 두가지 또는 세 가지 원소 모두를 동시에 첨가하여 주조한 후 주방 상태, 경화 열처리 및 오스테퍼링 처리하여 얻은 시편의 기계적 성질은 Table 5에서 보이는 바와 같으며 강도의 변화는 Fig 10에서 보이는 바와 같다. 주방 상태의 경우 세 가지 원소 모두를 동시에 첨가한 경우에 강도가 가장 높았다. 경화 열처리의 경우 0.80%의 구리와 0.30% 몰리브덴을 동시 첨가한 경우에 가장 반응성이 높은 것으로 나타났다. 그리고 오스테퍼링의 경우 두 가지 또는 세 가지 원소의 동시 첨가시 단독 첨가한 경우에 비하여 대체로 강도

와 연신률이 더 낮은 것으로 나타났다. 합금 원소를 동시에 첨가한 경우 기지 조직 등 잔류 오스테나이트 부피 분률의 변화는 Fig. 11에서 보이는 바와 같다. 합금 원소를 동시에 첨가한 경우 단독 첨가한 경우에 비하여 잔류 오스테나이트 부피 분률이 훨씬 더 컸다. 이것은 합금 원소의 첨가량 증가로 인하여 오스테나이트화 처리하는 동안 더 많은 합금 원소가 오스테나이트 기지에 고용되어 오스테나이트를 안정화시켜 잔류 오스테나이트의 부피 분률이 증가하고 따라서 감소한 것으로 생각된다.

4. 결 론

3.60wt%C - 2.50wt%Si 조성의 구상흑연주철의 기계적 성질과 경화 열처리 및 오스테퍼링 처리시 기계적 성질에 미치는 합금 원소의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 합금 원소의 첨가량이 증가함에 따라 강도 및 경도는 증가하였으며 연신률은 감소하였다.
- 2) 합금 원소에 의한 강도 증가 효과는 구리를 첨가한 경우가 가장 컸다.
- 3) 경화 열처리로 강도와 경도는 크게 증가하고 연신률은 감소하였다.
- 4) 탄소와 규소 함량이 높아 경화 열처리시 기계적 성질의 변화에 미치는 다른 합금 원소의 영향은 그리 크지 않았다.
- 5) 오스테퍼링 처리로 강도와 경도는 크게 증가하였으며 경화 열처리한 경우에 비하여 강도의 차이는 크지 않으나 연신률이 더 컸다.
- 6) 0.25wt%의 망간을 단독으로 첨가한 경우에 오스테퍼링 처리한 시편의 강도와 연신률이 최대 값을 나타냈으며 이와 같은 망간과 함께 0.80wt%의 구리 또는 2.00wt%의 니켈을 첨가한 경우에 최대 강도를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. F. Smith : "Structure of Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill Inc., (1993) 353-361.
- [2] M. Gagne : "The Sorelmetal Book of Ductile Iron", Rio Tinto & Titanium Inc., (2004) 23-45.
- [3] J. D. Mullins : "Ductile Iron 1, Production", Rio Tinto Iron & Titanium Inc.,(1992) 15-56.
- [4] A. Alagarsamy et. al. : "Ductile Iron Handbook", AFS, (1992) 323-378.
- [5] A. Nazarboland and R. Elliott : Mat. Sci. & Tech., 13 (1997) 223-232.
- [6] D. C. Wen and T. S. Lei : Mat. Trans., 40(9) (1999) 980-991.
- [7] N. Darwish and R. Elliott : Mat. Sci. & Tech., 9 (1993) 586-602.