

논문

# 셸 스택 주조 3.6wt.%C-2.5wt.%Si 주철의 흑연 형상과 기계적 성질에 미치는 마그네슘 및 알루미늄 첨가의 영향

이학주 · 권해욱 \*†

동명대학교 조선공학과, \*영남대학교 신소재공학부

## Effects of Additions of Magnesium and Aluminum on the Graphite Morphology and Mechanical Properties of 3.6wt.%C-2.5wt.%Si Cast Iron Poured into Shell Stack Mold

Hag-ju Lee and Hae-Wook Kwon\*†

Dept. of Naval Architecture, Tongmyung University, Pusan, 608-711

\*School of Mat. Sci. & Eng., Yengnam University, Gyeongbuk, 712-749

### Abstract

The effects of addition of magnesium only and the simultaneous addition of magnesium and aluminum on the graphite morphology of the cast iron with the composition of 3.6wt.% and 2.5wt.%Si poured into shell stack mold were investigated. The nodularity and mechanical properties of the specimen with smaller cross-section were higher than those with larger one, when copper was not added. When the magnesium only was added, the nodularity was decreased with decreased residual magnesium content and the C, V, graphite was obtained with the magnesium content in the range of 0.010~0.015wt.%. When the magnesium and aluminum were added together, the nodularity was decreased with decreased residual magnesium and increased aluminum contents. When copper was added, the volume fraction of pearlite in the matrix, strength and hardness were higher and elongation was lower for specimen with smaller cross-section. The volume fraction of pearlite, strength and hardness were increased and the elongation was decreased with increased copper content for the specimen with C, V, graphite.

**Key words :** Cast iron, Graphite morphology, Alloying element, Microstructure, Stack molding.

(Received September 10, 2009 ; Accepted October 1, 2009)

### 1. 서 론

철-탄소-규소 합금에서 흑연은 육방정 결정 구조를 가지며 그 성장은 a 및 c 축의 두 결정 방향 중 한 방향으로 일어나거나 두 방향으로 동시에 일어난다. 흑연 결정 중 탄소 원자의 면 밀도는 프리즘면(prismatic plane)보다 기저면(basal plane)에서 훨씬 더 크며 따라서 표면(계면) 에너지는 그 반대이다. 구상흑연은 탄소가 주로 기저면에 결합되어 c 축 방향으로 성장하며 편상흑연은 주로 프리즘면에 탄소 원자가 결합되어 a 축 방향으로 성장한다[1~3].

주철의 흑연 형상은 용탕의 화학 조성에 따라서 달라진다. 회주철의 편상흑연은 용탕 내에 녹아있는 산소와 황을 제어하지 않았을 때 용탕 내에서 핵생성하여 그 주위로 오스테나이트와 비교적 정상 공정(normal eutectic)에 가까운 방법으로 성장한다. 구상흑연은 용탕 내에 탈산제 및 탈황제 역할을 하는 구상화 원소를 첨가하였을 때 형성하며 각 구상흑연과 그 주위의 오스테나이트가 공정 셸을 이루는 비정상 공정(abnormal

eutectic)의 일종인 divorced eutectic이다[1~3]. C, V, 흑연은 구상흑연의 경우보다 적은 양의 구상화 원소를 용탕에 첨가하였을 때 형성할 수 있다.

순수한 철-탄소 2 원계의 액상이 흑연과 오스테나이트로 응고하는 공정 반응은, 비금속인 흑연은 고체의 계면이 원자적 규모에서 평활한 계면으로 성장하며 금속 상인 오스테나이트는 계면이 원자적 규모에서 거친 계면으로 성장하는 비정상 공정이다. 이 때에는 탄소 원자가 비교적 조밀하게 배열되어 표면 에너지가 낮은, 육방정 결정의, 기저면으로 부가되어 구상흑연이 형성한다. 그러나 액상 내에 황과 산소가 녹아 있으면 이들 원소가 표면 에너지가 높은 프리즘면에 흡착되어 이 면을 원자적 규모에서 거친 면으로 변환시켜 거친 계면을 가지는 오스테나이트와 흑연 두 상 사이의 cooperative eutectic에 가까운 거동으로 성장하여 회주철이 형성한다. 이 때 응고 과냉은 작다. 그리고 액상 내에 황과 산소가 존재할 때 구상화 원소를 충분히 첨가하면 이 원소가 황과 산소와 반응하여 제거하며 평활한 계면을 가지는 흑연과 거친 계면을 가지는 오스

†E-mail : hwkwon@ynu.ac.kr

테나이트가 형성하는 비정상 공정의 거동으로 구상흑연이 형성한다[2]. 또한 용탕 내에 알루미늄, 티타늄 또는 안티몬 등과 같은 원소가 존재하면 이들 원소는 흑연 구상화를 저해하는 역할을 하며 구상흑연주철 용탕 내에 충분히 존재하면 C. V. 흑연의 형상을 조장한다[4,5]. 이 때 흑연은 핵생성하여 먼저 편상흑연이 성장하는 방법으로 성장하다가 나중에 편석으로 그 농도가 증가한 구상화 원소의 영향으로 구상흑연의 성장 거동과 같은 방법으로 전환되어 성장하며 특히 알루미늄은 C. V. 흑연의 편상흑연과 같은 거동으로 성장한 쪽의 흑연 계면에 더 많이 편석된다[6].

C. V. 흑연은 구상흑연주철의 개발 초기 단계에서 처음 발견 되었으나 1970년대에 와서 많은 연구자들이 연구하였다[5]. 구상흑연주철을 제조할 때 필요한 양에 비하여 적은 량의 구상화 원소만을 첨가하여 C. V. 흑연 조직을 얻는 데에는 제조 과정상 일관성과 재현성이 있는 결과를 얻기가 어렵다. 구상화 원소와 구상화 저해 원소를 동시에 주철 용탕에 첨가하여 C. V. 주철 조직을 얻는 방법이 알려졌다[4]. 미량의 세륨을 함유하고 있는 마그네슘 페로실리콘을 사용하여 잔류 마그네슘이 0.010wt.%일 때 C. V. 주철 조직을 얻은 경우도 있으며[7], 구상화 저해 원소인 알루미늄 또는 티타늄을 동시에 첨가하면 잔류 마그네슘이 0.030wt.% 이상일 때에도 C. V. 주철 조직을 얻을 수 있다는 결과가 보고된 바 있다. 또한 C. V. 주철 조직을 얻기 위하여 단일 처리 합금이 개발되었으며 이 단일

처리 합금의 첨가량은 용탕에 함유된 황의 함량에 따라 달라지고 0.030wt.% 이하의 황을 함유하고 있는 용탕에 잔류 마그네슘 및 티타늄이 각각 0.015~0.030 및 0.06~0.13wt.%일 때 그 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 생형에 비하여 냉각 속도가 빨라 구상화율이 더 높을 것으로 예상되는, 셸 스택 주조 시 주철의 흑연 형상과 기계적 성질에 미치는 구상화 원소인 마그네슘 단독 첨가와 구상화 원소인 마그네슘과 구상화 저해 원소인 알루미늄을 동시에 첨가의 영향을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 셸 스택 주형의 제조

셸 스택 주형을 제조하기 위하여 먼저 금형을 설계하여 주문·제작하였다. 네 개의 KS B 0801 4 호 표준 인장 시편과 서브사이즈 인장 시편을 각각 얻기 위하여 단면적 수축부의 길이와 직경이 각각 62.5 및 17.5 그리고 32.5 및 9.5 mm인 주조 시편을 얻을 수 있도록 설계하였으며 Fig. 1, (a)에서 보이는 바와 같다. 이 금형을 이용하여 셸 주형을 제조하였으며 주형의 크기는 가로, 세로 및 두께가 330, 300 및 35 mm이며 주조 시편의 양쪽에는 직경 20 mm의 구멍을 설치하여 조립시 압탕 역할을 하게 하였다. 세로 길이의 가운데인 150 mm 위치에서 오른쪽 세로 변으로부터 왼쪽으로 100 mm의 위치에

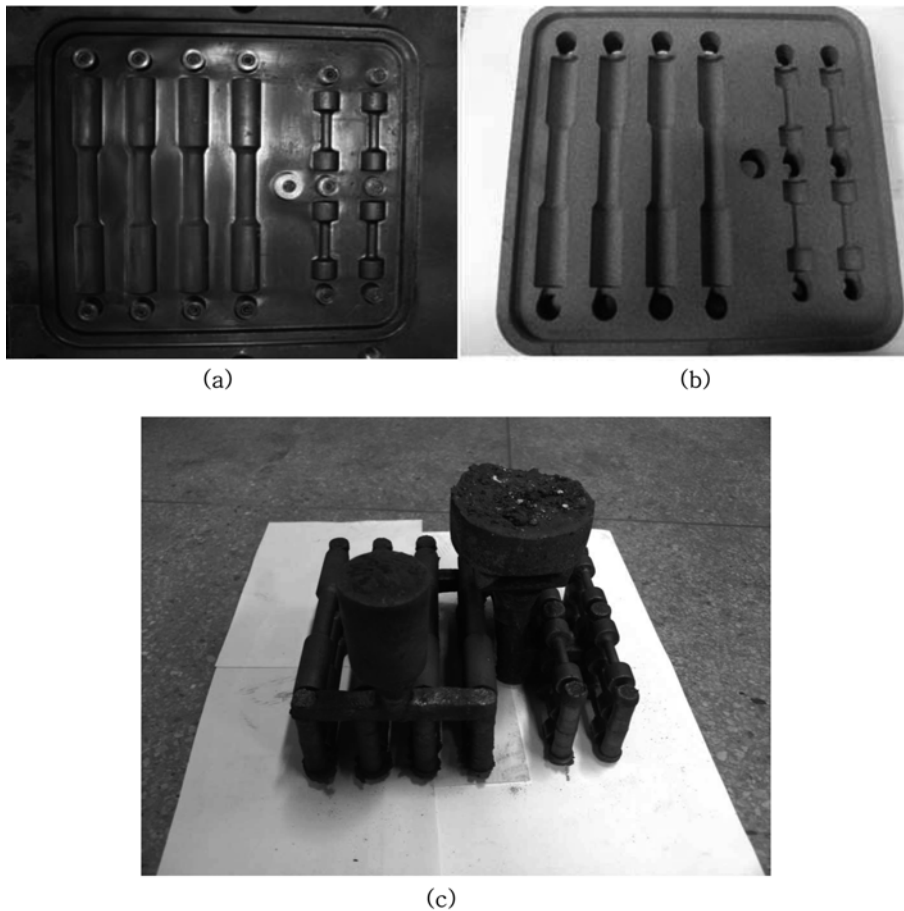


Fig. 1. Metal mold, (a), to produce plate for shell stack mold, (b), and test casting obtained after shake out, (c).

직경 40 mm의 구멍을 설치하여 주입컵을 부착시킬 수 있도록 하였다. Fig. 1, (b)에서 보이는 바와 같은 셀 주형을 사용하여 3층의 셀 스택 주형 세트를 조립하였다. 셀 스택 주형 세트를 사용하여 얻은 탈사 후의 시험 주조품은 Fig. 1, (c)에서 보이는 바와 같다.

**2.2 용해 및 주조**

75 kW 용량의 고주파 유도 용해로를 이용하여 용해하였다. 망간 함량이 0.09 및 0.38wt.%인 주물선을 사용하였다. 탄소의 목표 조성을 3.60wt.%로 하여 주물선과 강고철을 장입하였으며 20 kg의 용탕을 얻었다. 2.50wt.%의 최종 주조품의 규소 함량을 얻기 위하여 구상화처리한 후 용탕의 규소 함량이 2.10wt.%가 되도록하였으며 이를 위하여 기본 용탕의 규소 함량을 조절하기 위하여 규소 함량이 75wt.%인 페로실리콘을 노 중 용탕에 첨가하였다. R-형태의 열전대를 부착시킨 침적식 온도계를 이용하여 용탕의 온도를 측정하였으며 온도가 약 1,450°C에 도달하였을 때 시험 주조품 중 잔류 마그네슘 함량을 변화시키기 위하여 노 중 용탕에 5.0wt.%Mg-Fe-Si 합금을 플린징하는 방법으로 구상화 처리하였다. 그리고 필요에 따라 합금 원소를 첨가한 후 슬럭스를 사용하여 용탕 표면의 슬래그를 제거하고 레이들에 출탕하였다. 이 때 용탕의 규소 함량은 약 2.10wt.%이며 2.5wt.%의 최종 목표 함량을 얻기 위하여 규소 함량을 0.40wt.% 증가시키는 방법으로 후 집종 처리하였다. 집종제로는 직경이 약 1~3 mm 크기의 입자형 1.0wt.% Ba-Fe-Si 합금을 사용하였다. 용해 시 사용한 장입물, 용탕 처리제 및 합금 원소 첨가제의 화학 조성은 Table 1에서 각각 보이는 바와 같다.

후 집종 처리한 용탕의 온도를 측정후 주형에 주입 온도는 1,370~1,380°C의 범위에서 거의 일정하였다. 주입된 주형의 주입구와 압탕에 발열제를 뿌렸다. 또한 구리 판 위에 놓여 있는 금형에 소형 레이들을 이용하여 용탕을 주입하여 화학 조성 분석용 시편을 얻었다. 주입된 용탕이 완전히 응고되고 상온으로 냉각한 후 탈사하여 시험 주조품을 얻었다.

**2.3 시험 변수**

**2.3.1 마그네슘 단독 첨가의 영향**

먼저 구상화 원소인 마그네슘의 단독 첨가 시 잔류 마그네슘 함량의 변화에 따른 구상화율의 변화를 시험하였다. 먼저 잔류 마그네슘 함량을 0.000~0.040wt.% 범위에서 0.010wt.% 간격으로 변화시켜 시험하였다. 그리고 이 시험 결과로 얻은 시험 주조품의 현미경 조직 검사 결과로부터 안정하게 C. V. 주철을 얻을 수 있는 잔류 마그네슘 함량의 범위를 결정하기 위하여 인접한 두 조건 사이의 중간 잔류 마그네슘 함량인 0.005 및 0.015wt.%와 0.000과 0.005wt.%사이의 중간 잔류 마그네슘 함량인 0.0025wt.% 조건을 시험하였다.

**2.3.2 마그네슘과 알루미늄 동시 첨가의 영향**

시험 주조품의 구상화율에 미치는 구상화제인 마그네슘과 구상화 저해 원소인 알루미늄의 동시 첨가의 영향을 시험하였다. 구상화 원소인 잔류 마그네슘 함량은 0.010~0.040wt.% 범위에서 0.010wt.% 간격으로 그리고 구상화 저해 원소인 알루미늄은 0.10~0.40wt.% 범위에서 0.10wt.% 간격으로 각각 변화시켜 시험하였다.

**2.3.3 C. V. 주철의 기지 조직에 미치는 구리 첨가의 영향**

구상화율 40% 이하의 건전한 C. V. 흑연 조직을 가질 때 기지 조직의 펄라이트 부피 분율에 미치는 구리 첨가의 영향을 시험하였다. 잔류 마그네슘과 알루미늄의 함량을 각각 0.015 및 0.30wt.%로 일정하게 하고 구리의 첨가량을 0.20~0.80wt.% 범위에서 0.20wt.% 간격으로 변화시켰다.

**2.4 화학 조성 분석 및 미세 조직 관찰**

시험 주조품의 화학 조성을 확인하기 위하여 화학 조성 분석용 칩 시편의 표면을 100 번 연마지를 사용하여 연마한 후 에미션 스펙트로미터를 이용하여 분석하였다. 그리고 주조품을 탈사 및 절단하여 3 층의 주조품 중 가운데 층으로부터 얻은 수축부의 직경이 각각 한 개의 17.5 및 9.5 mm인 주조 시편의 가운데를 절단하였다. 지름이 17.5 mm로 큰 주조 시편의 경우에는 높이가 15 mm인 시편을 얻고 지름이 9.5 mm로 작은

Table 1. Chemical analyses of charging materials, nodularizer and inoculant.

material	C	Si	Mn	P	S	Mg	R.E.	Ca	Al	Ba	Cu	remark
pig-iron (I)	4.35	0.78	0.09	0.045	0.008	-	-	-	-	-	-	
pig-iron (II)	4.75	0.62	0.38	0.024	0.021	-	-	-	-	-	-	
steel scrap	0.03	0.016	0.22	0.015	0.009	-	-	-	-	-	-	
Fe-75%Si	0.03	75.31	-	0.020	0.003	-	-	-	1.32	-	-	
Mg-Fe-Si	-	46.44	-	-	-	5.12	2.14	1.91	0.58	-	-	
Fe-Mn	6.72	0.50	75.55	0.005	0.35	-	-	-	-	-	-	
Ba-Fe-Si	-	72.44	-	-	-	-	-	1.40	1.12	1.32	-	
Al shot	-	-	-	-	-	-	-	-	99.60	-	-	
metallic Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.90	

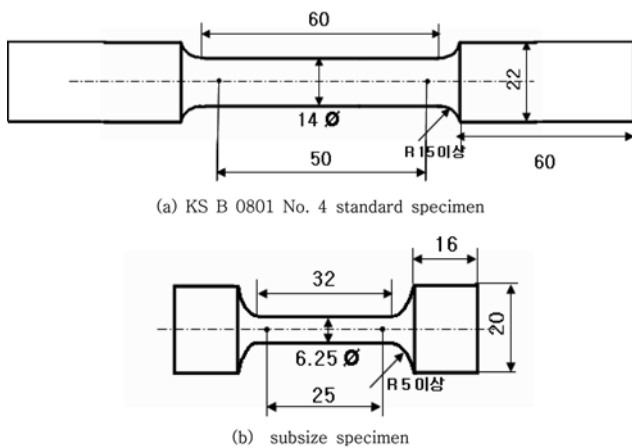


Fig. 2. Dimensions of tensile test specimens.

시험 주조품의 경우에는 높이가 7.0 mm인 시편을 얻어서 마운팅하였다. 모든 경우에 시험 주조품의 가운데의 절단면을 보통의 방법으로 조연마하고 다이아몬드 페이스트로 1 μm 등급까지 세연마하였다. 부식시키기 전 시편의 흑연 조직과 3.0% 나이탈 용액으로 부식시킨 후의 기지 조직을 관찰하였다. 그리고 화상 분석 장치를 이용하여 구상화율을 측정하였다. C, V, 주철의 기지 조직에 미치는 구리의 영향을 시험한 시편의 경우에도 부식시키기 전의 흑연 형상과 3.0% 나이탈 용액으로 부식시킨 후 기지 조직을 관찰하였다. 이 경우에도 화상 분석 장치를 이용하여 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율을 측정하였다. 5 위치를 선정하여 측정하고 최대 및 최소값을 제외한 세 값의 평균값을 얻었다.

### 2.5 기계적 성질 시험

3 층의 셀 스택 주조품을 탈사 및 절단하여 가운데 층으로부터 얻은 수축부의 길이와 직경이 각각 62.5 및 17.5 그리고 32.5 및 9.5 mm인 주조 시편을 얻었다. 이를 기계 가공하여 직경과 표점 거리가 각각 14.0 및 50.0 mm인 KS B 0801 규격 중 4 호 표준 인장 시편과 직경과 표점 거리가 각각 6.25 및 25.0 mm인 서브사이즈 인장 시편을 얻어 인장 시험하였다. 두 종류의 인장 시편의 모양과 크기는 Fig. 2에서 보

이는 바와 같다. 50 톤 용량의 만능 재료 시험기를 이용하여 시험하였다. 표준 시편의 경우 분당 2 mm의 크로스 헤드 속도 조건에서 그리고 서브사이즈 시편의 경우에는 STS 316L 스테인레스강 치구와 조립하여 만능 재료 시험기에 장착시킨 후 분당 1 mm의 크로스 헤드 속도 조건에서 시험하였다. 투영기를 이용하여 인장 시험 전의 단면 직경과 인장 시험 전후의 표점 거리를 측정하여 항복 및 인장 강도 그리고 연신률을 측정하였으며 각 조건별로 3 회 시험하여 평균값을 얻었다. 그리고 각 조건별로 광학 현미경 조직 관찰용 시편을 재연마하여 로크웰 경도 시험을 하였다. 5 회 시험하여 최대값과 최소값을 제외한 세 값의 평균을 얻었으며 브리넬 경도 값으로 환산하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 화학 조성 분석 결과

각 용해시 조건별로 화학 조성을 분석하기 위한 철 시편을 얻어 분석하였다. 목표 함량이 3.60wt.%인 탄소 함량은 3.55~3.67wt.% 범위 내에 있었다. 목표 함량이 2.50wt.%인 규소는 2.56~2.66wt.% 범위로 약간 높게 나타났다. 모든 경우에 망간의 목표 함량은 0.40wt.%였으며 망간 함량은 0.39~0.47wt.% 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 0.00~0.04wt.% 범위에서 0.01wt.% 간격으로 변화시킨 잔류 마그네슘은 각각 0.001, 0.013~0.016 범위, 0.019~0.020 범위, 0.032 및 0.042wt.%로 나타났다. 그리고 잔류 마그네슘 목표 함량을 각각 0.0025, 0.005 및 0.015wt.%로 하여 마그네슘을 첨가한 경우에는 각각 0.0024, 0.005~0.009 및 0.015~0.018wt.% 범위로 나타났다. 구리 첨가량을 0.20~0.80wt.% 범위에서 0.20wt.% 간격으로 변화시켜 기지 조직에 미치는 구리 첨가의 영향을 시험한 경우에는 각각 0.21, 0.39, 0.61 및 0.81wt.%인 것으로 나타났다. 잔류 마그네슘 목표 함량이 0.015wt.% 이하로 낮은 경우 잔류 마그네슘 함량이 다소 높게 나타나기는 하였으나 대부분 시편의 화학 조성은 실험 오차 범위 내에 있었으며 셀 스택 주조시 흑연형상에 미치는 마그네슘 단독첨가 및 마그네슘과 알루미늄 동시 첨가의 영향 실험 결과를 분석하는 데에는 별 문제가 없는 것으로 판단되었다.

Table 2. Variations of the nodularity and mechanical properties of the casted specimen with the diameter of 17.5 mm with the addition of magnesium element only.

Aim content of residual Mg	Nodularity (%)	Mechanical properties				Remark
		Y. S.(MPa)	T. S.(MPa)	%E <sub>l</sub> ng	Hardness (BHN)	
0.000	15.0*	240	320	-	152	
0.0025	20.0*	255	335	-	154	
0.0050	35.0	263	360	2.2	159	
0.010	38.0	300	402	2.5	164	
0.015	39.0	310	400	2.0	165	
0.020	45.0	330	415	3.8	165	
0.030	83.6	350	430	4.2	172	
0.040	87.6	360	470	4.0	177	

\*Flake graphite

Table 3. Variations of the nodularity and mechanical properties of the casted specimen with the diameter of 9.5 mm with the addition of magnesium only

Aim content of residual Mg	Nodularity (%)	Mechanical properties				Remark
		Y. S.(MPa)	T. S.(MPa)	%Elng.	Hardness (BHN)	
0.000	10.0*	260	340	-	163	
0.0025	15.0*	270	353	-	152	
0.005	35.0	283	370	3.6	174	
0.010	40.0	310	423	4.8	187	
0.015	40.0	330	432	4.4	192	
0.020	60.0	340	440	5.0	208	
0.030	90.0	400	450	4.2	218	
0.040	92.0	360	470	4.5	229	

\*Flake graphite

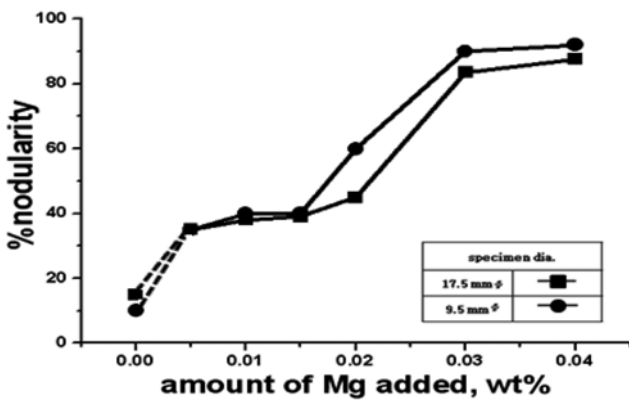


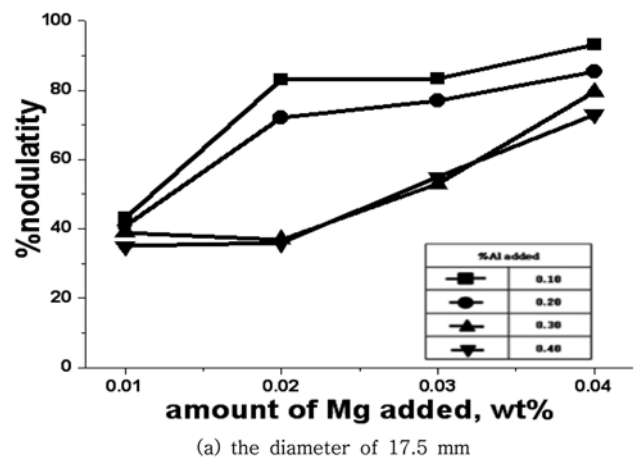
Fig. 3. Variations of the nodularity of as-cast specimen with magnesium addition.

### 3.2 마그네슘 단독 첨가의 영향

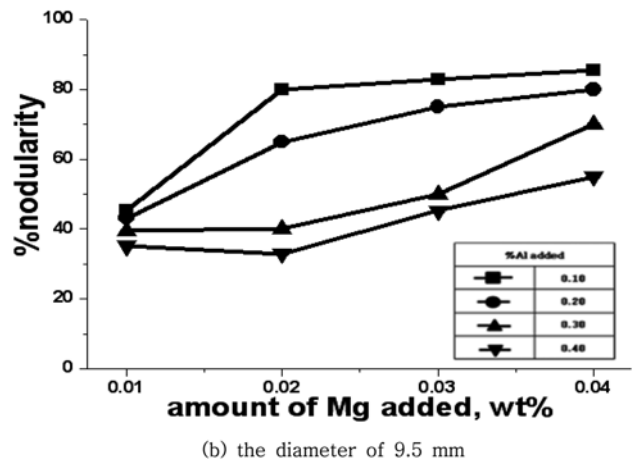
셀 스택 주조 시편의 흑연 구상화율과 기계적 성질에 미치는 구상화제인 마그네슘 단독 첨가의 영향을 시험하였으며 그 결과는 Table 2 및 3 그리고 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 단면적 수축부의 직경이 9.5 mm로 작은 주조 시편의 구상화율은 수축부의 직경이 17.5 mm로 큰 주조 시편에 비하여 약간 더 높았다. 그리고 강도, 경도 및 연신률이 전자의 경우가 후자보다 더 높은 것으로 나타났다. 이것은 용탕이 주입되어 같은 주형 내에서 응고 및 냉각이 일어날 경우 주조 시편의 단면이 작은 경우 큰 경우에 비하여 응고 및 냉각 속도가 더 커서 구상화율은 약간 더 높으며 흑연과 기지 조직이 더 미세하여 강도, 경도 및 연신률 등 기계적 성질이 더 높은 것으로 생각된다.

0.000~0.040wt% 범위에서 잔류 마그네슘 함량이 감소함에 따라 구상화율은 감소하였다. 구상화 원소인 마그네슘을 첨가하지 않은 경우와 C. V. 흑연 조직을 얻기 위한 잔류 마그네슘의 범위 중 하부 경계 함량을 얻기 위하여 0.0025wt%를 잔류 마그네슘의 목표 함량으로 한 경우에는 편상 흑연 조직으로 나타났다.

Table 1 및 2에서 보이는 바와 같이, 잔류 마그네슘 함량이 증가함에 따라 강도와 경도 및 연신률이 동시에 더 커졌다. 이것은, 편상 흑연 조직으로 나타난 경우를 제외하고, 잔류 마그네슘 함량이 증가함에 따라 구상화율이 증가하고 금속 기지



(a) the diameter of 17.5 mm



(b) the diameter of 9.5 mm

Fig. 4. Variations of nodularity of the as-cast specimen with the simultaneous addition of magnesium and aluminum.

중 결합으로 작용하는 흑연의 구상화율이 증가함에 따라 흑연 앞의 기지 중 응력 집중이 감소하여 기계적 성질이 증가하는 것으로 생각된다.

### 3.3 마그네슘과 알루미늄 동시 첨가의 영향

셀 스택 주조 시편의 흑연 구상화율과 기계적 성질에 미치는

**Table 4.** Variations of the nodularity and mechanical properties of the casted specimen with the diameter of 17.5 mm with the simultaneous additions of magnesium and aluminum

Aim content		Nodularity (%)	Mechanical properties				Remark
%Mg	%Al		Y. S.(MPa)	T. S.(MPa)	%Elng.	Hardness (BHN)	
0.01	0.10	43.2	320	410	4.3	153	
	0.20	41.0	300	390	4.5	157	
	0.30*	39.0	280	350	4.1	165	
	0.40	35.0	275	330	3.3	168	
0.02	0.10	83.0	400	450	3.5	158	
	0.20	72.0	350	428	4.4	164	
	0.30*	37.0	346	425	5.6	167	
	0.40	36.0	332	407	6.1	170	
0.03	0.10	83.5	350	480	10.2	167	
	0.20	77.0	331	473	8.6	180	
	0.30	53.0	321	465	7.1	166	
	0.40	55.0	310	447	6.7	177	
0.04	0.10	93.2	370	481	11.5	173	
	0.20	85.3	350	475	9.3	165	
	0.30	79.6	331	462	12.5	157	
	0.40	73.0	310	444	7.5	170	

**Table 5.** Variations of the nodularity and mechanical properties of the casted specimen with the diameter of 9.5 mm with the simultaneous additions of magnesium and aluminum

Aim content		Nodularity (%)	Mechanical properties				Remark
%Mg	%Al		Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	%Elng.	Hardness (BHN)	
0.01	0.10	45.3	350	426	6.6	160	
	0.20	43.2	375	420	6.3	167	
	0.30*	39.5	400	440	7.3	168	
	0.40	35.2	340	410	4.2	170	
0.02	0.10	80.0	461	547	12.3	158	
	0.20	75.0	444	514	10.5	170	
	0.30*	40.0	426	47.	5.2	165	
	0.40	33.0	393	469	4.5	170	
0.03	0.10	83.0	530	550	15.5	155	
	0.20	75.0	479	531	13.5	170	
	0.30	50.0	441	501	10.2	185	
	0.40	45.3	430	475	9.1	165	
0.04	0.10	85.6	510	550	16.6	185	
	0.20	80.0	473	535	14.6	175	
	0.30	70.0	448	526	9.1	170	
	0.40	55.0	430	494	9.3	179	

구상화제인 마그네슘과 구상화 저해 원소인 알루미늄의 동시 첨가의 영향을 시험하였다. 잔류 마그네슘은 0.010~0.040wt.% 범위에서 0.010wt.% 간격으로 알루미늄은 0.10~0.40wt.% 범위에서 0.10wt.% 간격으로 각각 변화시켜 시험하였으며 그 결과는 Table 4 및 5 그리고 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. 이 경우에도 구상화제를 단독으로 첨가한 경우와 마찬가지로 수축부의 직경이 9.5 mm로 작은 주조 시편의 구상화율과 기계적

성질이 수축부의 직경이 17.5 mm로 큰 주조 시편에 비하여 더 높은 것으로 나타났다.

수축부의 직경이 17.5 mm로 큰 주조 시편의 경우나 수축부의 직경이 9.5 mm로 작은 주조 시편의 경우 모두 잔류 마그네슘 함량이 0.010~0.040wt.% 범위에서 증가함에 따라 구상화율은 증가하였다. 마그네슘은 탈황제 및 탈산제 역할을 하여 용탕 중 황과 산소를 제거하고 흑연 결정인 육방정의 프리즘

Table 6. Variations of the matrix structure and mechanical properties of the casted specimen after simultaneous additions of magnesium and aluminum with the diameter and the amount of copper added

Specimen		Microstructure		Mechanical properties				Remark
Aim content of Cu (wt%)	Size (mmΦ)	Nodularity	Vol.% of pearlite	Y. S.(MPa)	T. S.(MPa)	%EIng.	Hardness (BHN)	
0.20	17.5	37.0	10.2	284	351	10.4	165	
	9.5	39.0	12.3	303	375	9.3	167	
0.40	17.5	39.0	15.4	323	405	8.4	173	
	9.5	40.0	20.5	340	413	6.2	177	
0.60	17.5	40.0	70.5	384	453	4.2	177	
	9.5	40.0	70.7	395	460	3.2	183	
0.80	17.5	40.0	73.5	413	483	3.3	181	
	9.5	40.0	82.5	420	494	2.3	187	

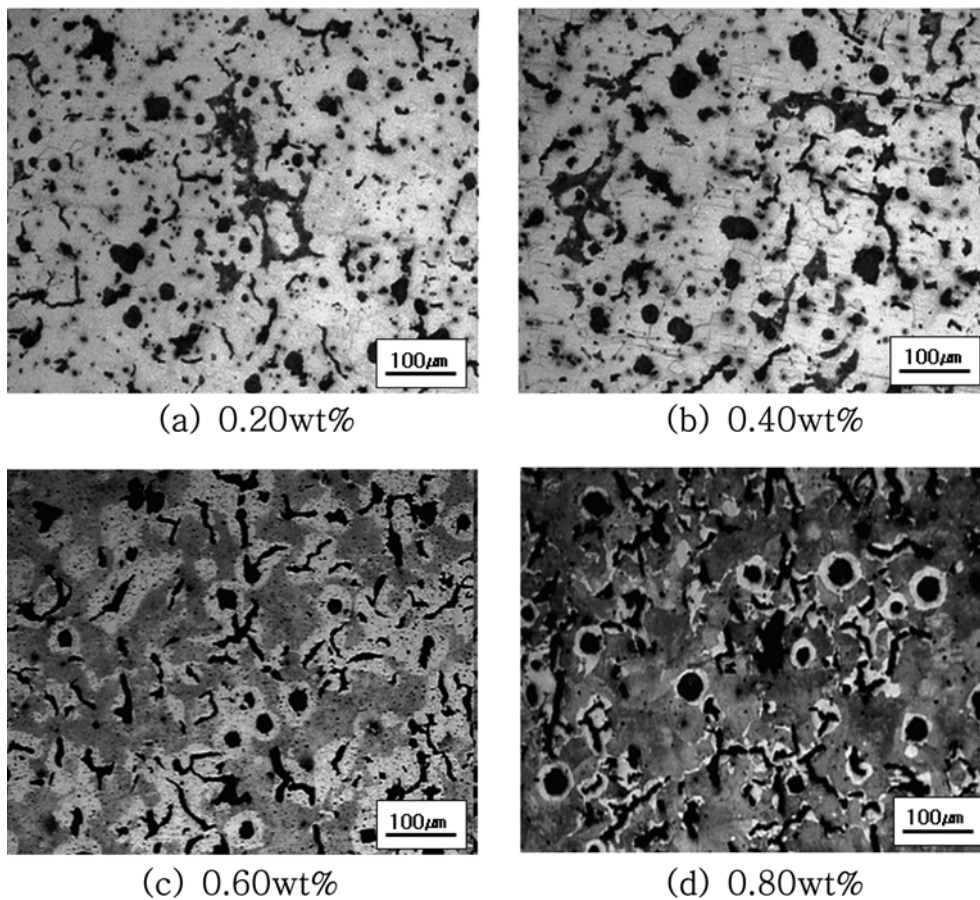


Fig. 5. Variation of the matrix structure of the C. V. graphite specimen with the diameter of 17.5 mm with the addition of copper.

면을 평활하게하여 계면 에너지가 낮은 기저면으로 탄소가 결합되어 구상 흑연이 형성한다. 따라서 잔류 마그네슘 함량이 증가할수록 구상화율이 증가할 것이다. 그리고 구상화 저해 원소인 알루미늄 첨가량이 증가할수록 구상화율은 감소하였다. 이것은 알루미늄이 C. V. 흑연의 편상 흑연의 성장 거동과 같은 거동으로 성장하는 부분에 편석되어 그 성장을 조장하여 구상화를 저해하므로 용탕 중 알루미늄 함량이 증가할수록 구상화율이 감소한 것으로 생각된다.

또한 Table 4 및 5에서 보이는 바와 같이, 알루미늄 첨가량

이 같은 경우 잔류 마그네슘 함량이 증가함에 따라 강도, 경도, 및 연신률 모두 증가하였으며 이것은 잔류 마그네슘 함량이 증가함에 따라 구상화율이 증가하여 흑연 앞의 기저에서의 응력 집중이 감소하였기 때문이다. 잔류 마그네슘 함량이 같을 경우 알루미늄 함량이 증가함에 따라 강도와 경도는 감소하고 몇가지 예외가 있기는 하지만 연신률도 대체로 감소하였다. 이것은 잔류 마그네슘 함량이 같을 경우 알루미늄 첨가량이 증가함에 따라 구상화율이 감소하여 C. V. 흑연의 분률이 증가하고 C. V. 흑연의 끝 부분 앞의 기저에 응력 집중 현상이

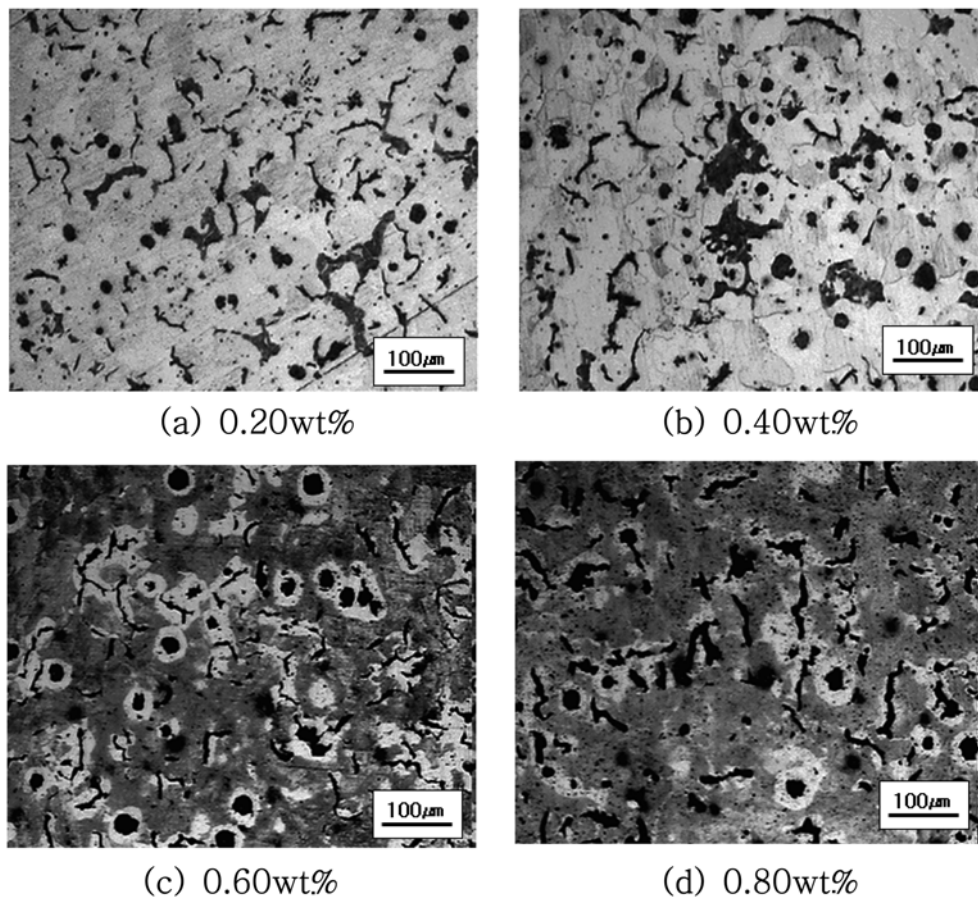


Fig. 6. Variation of the matrix structure of the C. V. graphite specimen with the diameter of 9.5 mm with the addition of copper.

증가하여 기계적 성질이 감소한 것으로 생각된다.

### 3.4 C. V. 주철의 기지 조직과 기계적 성질에 미치는 구리 첨가의 영향

마그네슘과 알루미늄을 동시에 첨가하여 얻은 구상화율 40% 이하의 건전한 C. V. 주철의 기지 조직에 미치는 구리 첨가의 영향을 시험하였으며 그 결과는 Table 6 그리고 Fig. 5 및 6에서 보이는 바와 같다. 모든 경우에 단면적 수축부의 직경이 작은 주조 시편의 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율이 단면적 수축부의 직경이 큰 주조 시편보다 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 단면적 수축부의 직경이 작은 주조 시편의 경우가 큰 시편의 경우보다 응고 및 냉각 속도가 빨라 응고 후 냉각하는 동안 기지 중 탄소가 흑연으로의 확산이 일어날 시간이 충분하지 않아 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율이 더 높았을 것으로 생각된다. 이 효과와 함께 전자의 경우가 후자의 경우보다 펄라이트가 미세화 되었을 것이기 때문에 단면적 수축부의 직경이 작은 주조 시편의 경우가 큰 시편의 경우보다 강도와 경도는 대체로 더 높고 연신률은 약간 낮은 것으로 나타났다. 그리고 구리 첨가량이 증가함에 따라 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율은 증가하였으며 특히 0.60 및 0.80wt.%의 구리를 첨가하였을 때 C. V. 주철의 기지 조직 중 부피 분율이 약 70% 이상으로 크게 증가하였다. 이것은 기지 조직 중에 구리

가 녹아들어가 주철 용탕의 응고된 후 냉각이 일어나는 동안 탄소 확산을 억제하였을 것이기 때문이다. 또한 구리 첨가량이 증가함에 따라 펄라이트가 더 미세화되었을 것이다. 따라서 구리 첨가량이 증가함에 따라 강도와 경도는 증가하고 연신률은 감소하였다.

### 4. 결 론

셀 스택 주조 시 3.6wt.%C-2.5wt.%Si 조성 주철의 흑연 형상에 미치는 구상화제 단독 첨가의 영향, 구상화제 및 구상화 저해 원소의 동시 첨가의 영향 그리고 C. V. 주철의 기지 조직에 미치는 구리 첨가의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구리를 첨가하지 않은 모든 경우에 단면 크기가 작은 주조 시편의 구상화율 및 기계적 성질은 단면 크기가 큰 주조 시편에 비하여 더 높았다.
- 2) 마그네슘의 단독 첨가시 잔류 마그네슘의 함량이 감소할수록 구상화율은 감소되었으며 0.010-0.015wt.% 범위에서 C. V. 흑연 조직을 얻을 수 있었다.
- 3) 마그네슘과 알루미늄을 동시에 첨가할 때 잔류 마그네슘 함량이 감소하고 알루미늄 첨가량이 증가됨에 따라 구상화율은 감소하였다.



4) 잔류 마그네슘과 알루미늄 함량을 각각 0.015 및 0.30wt.%로 일정하게하여 C. V. 흑연을 얻은 경우, 구리를 첨가한 경우 단면 크기가 작은 주조 시편의 기지 중 펄라이트 부피 분률이 단면 크기가 큰 주조 시편의 경우보다 더 높았으며 전자의 경우 후자보다 강도 및 경도는 더 크고 연신률은 더 낮았다.

5) 잔류 마그네슘과 알루미늄 함량을 각각 0.015 및 0.30wt.%로 일정하게하여 C. V. 흑연을 얻은 경우, 구리 첨가량이 증가함에 따라 C. V. 주철의 펄라이트 부피 분률, 강도 및 경도는 증가하고 연신률은 감소하였다.

### 참고문헌

- [1] J. F. Wallace : Trans. AFS, 83 (1975) 363-373.
- [2] S. V. Subramanian, D. Ghosh and D. A. R. Kay : Iron and Steel Magazine, March (1980) 18-25.
- [3] P. F. Wieser, C. E. Bates and J. F. Wallace : "Mechanism of Graphite Formation in Iron-Silicon-Carbon Alloy", Malleable Founders Society, Cleveland, (1967) 27-41.
- [4] R. D. Schelleng : Cast Metals Research Journal, AFS, March (1967) 30-38.
- [5] H. Mrrough : Trans. AFS, 60 (1952) 439-452
- [6] J. Y. Su, Q. T. Chow and J. F. Wallace : Trans. AFS, 60 (1982) 565-575.
- [7] J. V. Dawson and E. R. Evans : BCIRA Journal, March (1974) 137-144.