
 논문

셸 적층 주조 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 주형 변수 및 주 합금 원소의 영향

김효민 * · 권민영 ** · 천병철 *** · 권도영 *** · 김기엽 **** · 권해욱 *****†

*영남대학교 대학원 첨단뿌리산업공학과

**영남대학교 대학원 신소재공학과

***해원산업(주)

****한국폴리텍대학 창원캠퍼스 신소재응용과

*****영남대학교 공과대학 신소재공학부

Effects of Mold Variable and Main Alloying Element on the Mechanical Properties of Ductile Cast Iron Poured into Shell Stack Mold

Hyo-Min Kim*, Min-Young Kwon**, Byung-Chul Chun***, Do-Young Kwon***,

Gi-Yeob Kim**** and Hae-Wook Kwon*****†

*Dept. of Advanced Root Industry Eng., Graduated School, Yeungnam Univ., Gyeongbuk 38541, Republic of Korea

**Dept. of Mat. Sci. & Eng., Graduated School, Yeungnam Univ., Gyeongbuk 38541, Republic of Korea

***Haewon Ind. Inc., Gyeongbuk 40113, Republic of Korea

****Dept. of Advanced Material Application., Korea Polytechnics Colleges, Changwon 51518, Republic of Korea

*****School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam Univ., Gyeongbuk 38541, Republic of Korea

Abstract

The effects of mold variable and main alloying element on the mechanical properties of ductile cast iron poured into shell stack mold were investigated. The strength and hardness of with the smaller cross-section of the diameter of 6.25mm were higher than those of 12.50mm. On the other hand, the elongation of the former was lower than that of the latter. The strength and hardness of the specimens obtained from the center layer in the 5-story stack mold were the lowest and those for other specimens were increased with increased distance from the center. The elongation of those were the highest of all. The strength and hardness of the specimens obtained from the center layer were decreased the elongation was increased with the increased number of layers. The strength and hardness were increased and the elongation was decreased roughly with the increased amounts of residual magnesium and carbon content added, respectively. The strength and hardness were increased and the elongation was decreased roughly with the increased amounts of silicon content added to 2.45wt% and rather decreased with that to 2.85wt%. The effect of silicon content showed the opposite tendency to those of residual magnesium and carbon content.

Key words: Ductile cast iron, Mechanical properties, Shell stack mold, Alloying element, Cast iron

1. 서 론

구상흑연주철은 탄소 함량이 높은 철기 합금이며 용탕을

구상화 처리하여 응고가 일어나는 동안 구상흑연이 정출하여 강도, 경도 및 인성이 동시에 큰 주철이다. 회주철의 편상 흑연에 비하여 구상흑연 주철의 흑연은 같은 외부 하중이 걸

- 김효민: 박사과정, 권민영: 석사과정, 천병철: 상무, 권도영: 과장, 김기엽: 교수, 권해욱: 명예교수

Received: Jan. 3, 2020; Revised: Jan. 14, 2020; Accepted: Mar. 10, 2020

†Corresponding author: Hae-Wook Kwon(Yeungnam Univ.)

Tel: +82-53-810-2477, Fax: +82-053-810-4628

E-mail: hwkwon@ynu.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society

2020. Vol. 40 No. 2, pp. 25~33

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2020.40.2.25>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

렸을 때 응력 집중 계수의 감소로 강도 및 연성이 훨씬 더 크다.

구상흑연주철은 주로 페라이트와 펄라이트가 혼합된 기지에 구상 흑연이 분산되어 있다. 구상흑연주철을 냉각할 때 오스테나이트 기지의 탄소 고용도가 감소하며, 이 때 밀려난 탄소들이 구상 흑연으로 확산되고 결합하여 구상 흑연으로 성장한다. 서냉 시 공석 온도 아래에서는 불안정한 오스테나이트가 변태하여 탄소 고용도가 매우 낮은 페라이트가 형성한다. 냉각 속도가 빠를 경우 탄소들이 구상 흑연으로 확산하는 시간이 충분하지 않아 펄라이트와 페라이트의 혼합 기지 조직이 형성한다. 펄라이트 부피 분율이 증가할수록 강도와 경도는 증가하고 연성은 감소하며 반대로 펄라이트 부피 분율은 감소할수록 강도와 경도는 감소하고 연성은 증가한다 [1,2]. 구상흑연주철의 기계적 성질은 냉각 속도 및 화학 조성 등의 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는다. 이 중 화학 조성은 흑연의 형상 및 기지 조직에 큰 영향을 미치며 원하는 구상흑연주철 주조품을 얻기 위하여 제어하여야 한다 [3]. 구상흑연주철 중 기본 원소가 미세 조직에 영향을 미친다. 기지 조직 중 탄소 함량은 페라이트와 펄라이트의 부피 분율을 결정한다. 기지 조직은 용탕의 응고가 일어난 후 공석 온도에 이르기까지 냉각하는 동안 구상흑연으로의 탄소 원자의 확산 속도에 따라서 달라진다 [2,5]. 한편 규소는 오스테나이트의 탄소 고용도를 감소시키고 페라이트와 펄라이트 비율, 페라이트 경도 및 연성-취성 천이 거동 등을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 그러나 망간은 펄라이트 형성 원소이며 그 함량은 주방 상태에서 탄화물이 형성하지 않는 조건에서 결정하여야 한다.

셀 적층 주조법은 금형을 이용하여 판 모양의 셀 주형을 제조하고 이 셀 주형판을 적층하여 조립하는 방법으로 조형한다. 조형할 때 사용하는 셀 주형판의 수는 제한이 없으나 적층하는 주형 판의 수가 증가할수록 냉각 속도의 차이로 인해 미세 조직과 기계적 성질이 달라질 수 있으므로 주의하여야 한다. 비교적 표면 조도가 우수하고 한번의 주입으로 많은 주조품을 생산할 수 있으므로 생산성이 좋고, 치수 정밀도가 좋은 주조품을 얻을 수 있다 [4].

셀 적층 주조품의 기계적 성질에 미치는 화학 조성의 영향에 미치는 기초 자료는 부족한 실정이며, 제품의 크기에 따라 다르기는 하나, 모든 층으로부터 주조품의 기계적 성질을 만족시킬 경우 층 수를 증가시켜 생산성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 셀 적층 주조 구상흑연주철의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 주형 변수와 주 원소의 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 셀 적층 주조 주형 조형 제조

셀 적층 주조 주형판을 제조하기 위하여 먼저 금형을 설계

하여 주문·제작하였다. 각각 네 개의 KS B 0801 4호 표준 인장 시편과 서브사이즈 인장 시편을 얻기 위하여 단면 수축부의 길이와 직경이 각각 62.5 및 12.5 그리고 32.5 및 6.25mm인 주조 시편을 얻을 수 있도록 설계하였으며 금형은 Fig. 1(a)에서 보이는 바와 같다.

이 금형을 이용하여 셀 주형판을 제조하였으며, 주형판의 가로, 세로 및 두께가 각각 330, 300 및 35mm이고 주조 시편의 양쪽에는 직경 20mm의 구멍을 설치하여 조립 시 압탕 역할을 할 수 있게 하였다. 바닥판 아랫면 및 윗면의 주형 공간과 구멍은 펄세트(pepset) 주물사로 채우고, 셀 몰드를 다단으로 쌓고, 세로 길이의 가운데인 150mm 위치에서 오른쪽 세로 변으로부터 왼쪽으로 100mm의 위치에 직경 40mm의 구멍을 설치하여 주입컵을 부착할 수 있도록 하였다. 셀 적층 주형 세트를 사용하여 얻은 탈사 후의 시험 주조품은 Fig. 1(d)에서 보이는 바와 같다.

2.2 용해 및 주조

75kW 용량의 고주파 유도 용해로를 이용하여 선철과 강고철을 장입하여 용해하였다. 최종 주조품의 망간 목표 조성을 0.3%으로 하여 Fe-Mn 합금을 첨가하였으며 최종 주조품의 탄소 목표 조성을 3.75wt%으로 하여 주물선과 강고철을 장입하였다. 이 때 5층의 시험 주조품을 얻기 위해 30kg의 용탕을 얻었다. 그리고 최종 주조품의 규소 목표 함량을 2.65wt%로 하여 구상화 처리 후 용탕의 규소 목표 함량이 2.15wt%가 되게 하였으며 기본 용탕의 규소 함량이 1.49wt%가 되게 하기 위하여 규소 함량이 약 75%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 0.04wt%의 잔류 마그네슘 함량을 얻기 위하여 노 중 용탕에 5.0wt%Mg-Fe-Si 합금을 흑연 도가니를 사용하여 제조한 플런저(Plunger)를 이용하여 구상화처리하였다. 이 때 규소 함량은 약 2.15wt%이며 2.65wt%의 최종 목표 조성을 달성하기 위하여 규소 함량을 0.50wt% 증가시키는 방법으로 후 점층 처리하였다. 점층제로는 약 1.0~3.0mm 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.

용해 및 구상화 처리 후 슬러스를 사용하여 용탕 표면의 슬래그를 제거하고, 후 점층 처리한 뒤 용탕의 온도를 측정하고 주입하였다. 이 때 주입온도는 1,350~1,370°C의 범위에서 거의 일정하게 하였다. 또한 구리 판 위에 놓여 있는 금형에 소형 레이들을 이용하여 용탕을 주입하여 화학 조성 분석용 시편을 얻었다. 셀 주형판에 주입된 용탕이 완전히 응고하고 상온으로 냉각한 후 탈사하여 최종 시험 주조품을 얻었다.

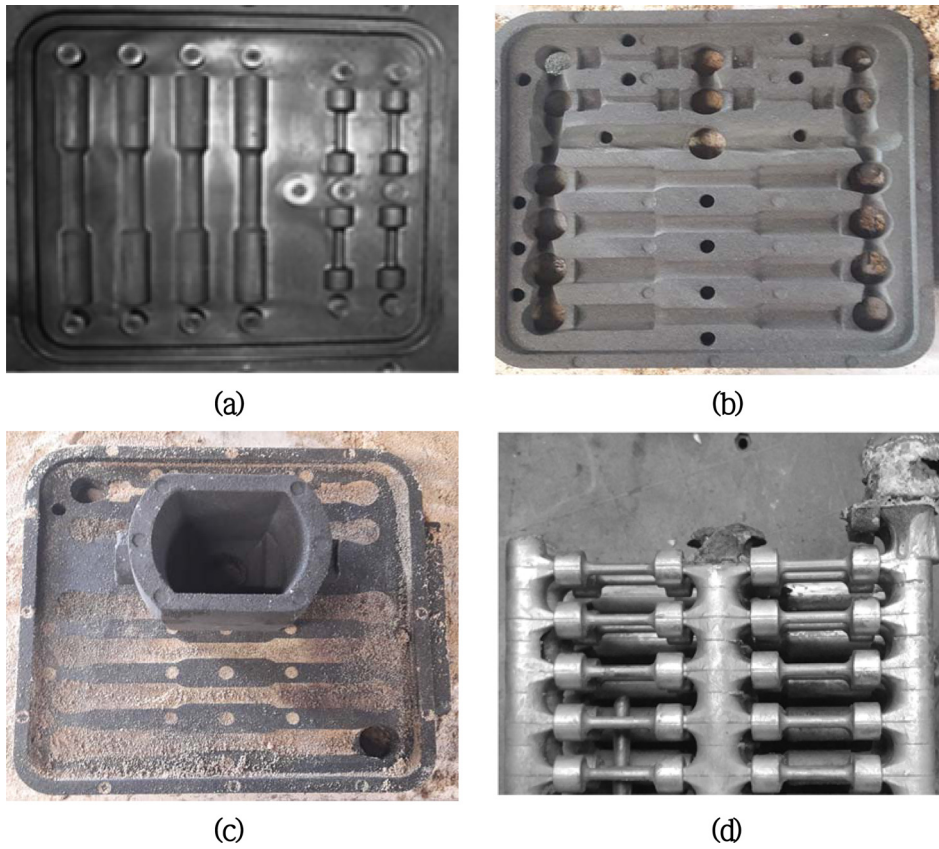


Fig. 1. Die to produce shell plate for stack mold, (a), upper planes of bottom, (b), and top plates, (c), and test casting obtained after shake out, (d).

Table 1. Chemical compositions of charging materials, nodularizer, inoculant and additives. (wt%)

| Materials | C | Si | Mn | P | S | Mg | Re | Ca | Al | Ba | Cu | Mo | Sn |
|-------------|------|------|------|------|------|------|----|----|------|------|----|----|----|
| Pig iron | 4.56 | 1.49 | 0.18 | 0.12 | 0.02 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Steel scrap | 0.03 | 0.02 | 0.22 | 0.08 | 0.01 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Fe-75%Si | 0.07 | 76.3 | - | 0.03 | 0.01 | - | - | - | 1.27 | - | - | - | - |
| 1%Ba-Fe-Si | - | 72.4 | - | - | - | - | - | - | - | 1.02 | - | - | - |
| 5%Mg-Fe-Si | - | 46.4 | - | - | - | 5.12 | - | - | - | - | - | - | - |

2.3 시험 변수

2.3.1 단면 크기 및 층 위치의 영향

셸 적층 주조 시 주조품의 기계적 성질에 미치는 단면 크기와 층 위치의 영향을 시험하였다. 그리고 셸 적층 주형 세트 조립 시 각 층의 KS B 0801 4호 표준 인장 시편과 서브사이즈 인장시편을 얻기 위한 주형 공간 중 주형 판 세트의 외부 옆면에서 가장 가까운 위치에 있는 주형 공간 단면 수축부의 가운데에 K-형태의 열전대를 설치하여, 주입한 후 응고 및 냉각이 일어나는 동안 열분석 실험하였다.

2.3.2 층 수의 영향

5층의 셸 적층 주조 시 위치의 영향 시험 결과 가운데 층의 강도와 경도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 따라서 가운데 층 주조품의 기계적 성질 및 미세조직에 미치는 층 수의 영향을 시험하였다. 이를 위하여 3 및 7 층의 셸 적층 주형에 용탕을 주입하여 시험하였다.

2.3.3 구상화 및 주 원소의 영향

셸 적층 주조 시 구상흑연주철 주조품의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 구상화 원소인 마그네슘과 주 합금 원소인 탄소 및 규소 함량의 영향을 시험하였다. 먼저 탄소와 규소

Table 2. Chemical analyses of specimens.

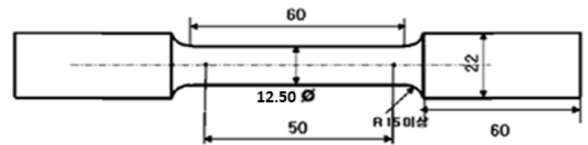
| Element | Element(wt%) | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Mg | Al | Cu | Sn | Fe | |
| Mg | 0.00 | 3.75 | 2.64 | 0.310 | 0.337 | 0.012 | 0.001 | 0.037 | - | - | Bal. |
| | 0.01 | 3.76 | 2.65 | 0.310 | 0.332 | 0.012 | 0.009 | 0.032 | - | - | Bal. |
| | 0.02 | 3.74 | 2.66 | 0.312 | 0.332 | 0.012 | 0.018 | 0.031 | - | - | Bal. |
| | 0.03 | 3.75 | 2.65 | 0.312 | 0.332 | 0.013 | 0.029 | 0.031 | - | - | Bal. |
| | 0.04 | 3.75 | 2.64 | 0.310 | 0.331 | 0.014 | 0.039 | 0.032 | - | - | Bal. |
| | 0.05 | 3.75 | 2.65 | 0.312 | 0.331 | 0.012 | 0.049 | 0.031 | - | - | Bal. |
| | 0.06 | 3.75 | 2.65 | 0.312 | 0.331 | 0.011 | 0.059 | 0.031 | - | - | Bal. |
| C | 3.55 | 3.54 | 2.64 | 0.311 | 0.336 | 0.012 | 0.040 | 0.037 | - | - | Bal. |
| | 3.75 | 3.74 | 2.64 | 0.311 | 0.331 | 0.012 | 0.040 | 0.035 | - | - | Bal. |
| | 3.95 | 3.95 | 2.65 | 0.311 | 0.332 | 0.012 | 0.040 | 0.035 | - | - | Bal. |
| Si | 2.45 | 3.74 | 2.44 | 0.310 | 0.332 | 0.011 | 0.039 | 0.036 | - | - | Bal. |
| | 2.65 | 3.74 | 2.64 | 0.311 | 0.331 | 0.012 | 0.040 | 0.035 | - | - | Bal. |
| | 2.85 | 3.74 | 2.84 | 0.310 | 0.335 | 0.012 | 0.040 | 0.035 | - | - | Bal. |
| Shell stack mold | 3-story | 3.76 | 2.65 | 0.300 | 0.260 | 0.020 | 0.040 | 0.050 | - | - | Bal. |
| | 5-story | 3.75 | 2.63 | 0.290 | 0.310 | 0.030 | 0.040 | 0.070 | - | - | Bal. |
| | 7-story | 3.75 | 2.66 | 0.310 | 0.340 | 0.030 | 0.040 | 0.070 | - | - | Bal. |

의 함량을 각각 3.75 및 2.65wt%로 일정하게 하고 잔류 마그네슘 함량을 0.00 ~ 0.06wt% 범위에서 0.01wt% 간격으로 변화시켜 그 영향을 시험하였다. 규소와 잔류 마그네슘 함량을 각각 2.65 및 0.04wt%로 일정하게 하고 탄소 함량을 3.55 ~ 3.95wt% 범위에서 0.20wt% 간격으로 변화시켜 시험하였다. 그리고 탄소와 잔류 마그네슘 함량을 각각 3.75 및 0.04wt%로 일정하게 하고 규소 함량을 2.45 ~ 2.85wt% 범위에서 0.20wt% 간격으로 변화시켜 시험하였다.

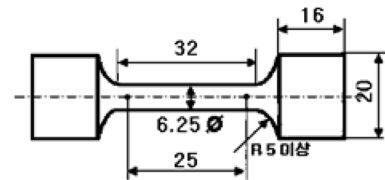
2.4 기계적 성질 시험

5층의 셸 적층 구조 시 층 위치의 영향을 시험한 경우에는 모든 층으로부터 그리고 나머지 경우에는 셸 적층 구조의 가운데 층으로부터 얻은 시험 구조품을 탈사하여 직경과 표점거리가 각각 12.50 및 50mm인 KS B 0801 4호 표준 시편과 직경과 표점거리가 각각 6.25 및 25mm인 서브사이즈 인장시편을 얻어 인장 시험을 하였다. 두 종류의 인장시편의 모양과 크기는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다.

50톤 용량의 만능 재료 시험기를 이용하여 인장시험하였다. 표준 시편의 경우 분당 2mm의 크로스 헤드 속도 조건에서 그리고 서브사이즈 인장시편의 경우에는 STS 316L 스테인리스 강 치구와 조립하여 만능 재료 시험기에 장착 시킨 후 분당 1mm의 크로스 헤드 속도 조건에서 시험하였다. 투영기를 이용하여 인장 시험 전후의 단면 직경과 표점 거리를 측정하여 항복 및 인장 강도 그리고 연신율을 계산하였으며 각 조건별로 3회 시험하여 평균값을 얻었다. 그리고 각 조건별로 나머지 1개씩의 단면 수축부가 각각 12.5 및 6.25mm



(a) KS B 0801 No. 4 standard specimen



(b) sub-size specimen

unit : mm

Fig. 2. Tensile test specimen.

인 시험 구조품을 절단하고 연마 후 브리넬 경도 시험을 하였다. 5번 시험하여 최댓 값과 최솟 값을 제외한 나머지의 평균값을 얻었다.

2.5 화학 조성 분석과 미세 조직 관찰

셸 적층 구조 시 최종 구조품의 화학 조성을 확인하기 위하여 얻은 화학 조성 분석용 칩 시편의 표면을 벨트 그라인더를 이용하여 연마한 후 에미션 스펙트로미터(emission spectrometer)를 이용하여 분석하였다. 주방 상태의 구상화율과 화학 조성 변화에 따른 기지 조직의 변화를 확인하기 위하여 미세조직을 관찰하였다. KS B 0801 4호 표준 인장 시편 및 서브사이즈 인장 시편을 절단한 후 절단면을 보통의

방법으로 조연마하고 다이아몬드 슬러리로 1 μ m 등급까지 세 연마하였다. 부식시키기 전 시편의 흑연 조직과 3.0% 나이탈 용액으로 부식 시킨 후의 기지 조직을 광학 현미경으로 관찰 하였다. 그리고 화상분석 장치를 이용하여 구상화율, 흑연립 수 및 기지 조직 중 펄라이트 부피 분율을 측정하였다. 모든 경우에 5위치를 측정하고 최대 및 최소 값을 제외한 세 값의 평균값을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단면 크기 및 층 위치의 영향

셸 적층 주조 구상흑연주철의 기계적 성질 및 미세조직에 미치는 단면 크기 및 셸 적층 주조 시 층 위치의 영향을 시험하였으며 그 결과는 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 단면 수축부의 직경이 작은 주조 시편이 단면 수축부의 직경이 큰 주조 시편보다 강도 및 경도가 더 크고 연신율은 더 작았다.

그 원인을 규명하기 위하여 열분석 실험을 하고 각 시편의 미세조직을 관찰하였다. 열분석 실험으로, 가운데 층으로부터, 얻은 대표적인 냉각 곡선은 Fig. 4(b)에서 보이는 바와 같다. 단면 크기가 작은 시편이 단면 크기가 큰 시편보다 응고 및 냉각 속도가 더 빨랐다. 빠른 냉각 속도로 인하여 과냉이 더 크고 흑연 핵 생성 속도가 더 커서, Table 3에서 보이는 바와 같이, 흑연립수가 더 많았다. 그리고 기지 조직 중 탄소의 확산이 일어날 시간이 짧아, Table 3에서 보이는 바와 같이, 펄라이트 부피 분율이 더 높았다.

5층 셸 적층 주형을 사용하여 얻은 구상흑연주철의 기계적 성질 및 미세조직에 미치는 층 위치의 영향을 실험하였으며 그 결과는 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 5층 셸 적층 주조 시 가운데 층으로부터 얻은 시편의 인장 강도 및 경도가 가장 낮았으며 아래 및 위로 층의 위치가 멀어질수록 강도 및 경도가 증가하였다. 그리고 그 변화의 경향은 단면적 크기가 작은 경우 훨씬 더 컸다. 반대로, 연신율은 가운데 층으로부터

터 얻은 단면이 큰 시편이 가장 컸고 아래 및 위로 층의 위치가 멀어질수록 연신율은 감소하였다. 그리고 그 변화의 경향은 단면 크기가 큰 경우 약간 더 컸다.

그 원인을 규명하기 위하여 열분석 실험을 하였으며 그 결과는 Fig. 4(c)에서 보이는 바와 같다. 단면의 크기가 같을 때 가운데 층에서 응고 및 냉각 속도가 가장 느리고 아래 및 위로 층 위치가 멀어질수록 응고 및 냉각 속도가 증가하여, Table 3에서 보이는 바와 같이, 흑연립수와 기지 중 펄라이트 부피 분율이 증가하였다. 대기에 노출된 한 층의 셸 판으로 덮혀 있는 꼭대기 5층의 경우 열 방출 속도가 가장 빠르다. 따라서 펄라이트 부피 분율이 높고 미세하여 강도 및 경도가 높았다. 바닥 층의 경우에는 실험실 바닥 위에 펌 세트 주물사로 주형 공간을 채워 넣은 한 개의 셸 판이 놓이므로 꼭대기 층에 비하여 열방출 속도가 느렸다. 그리고 나머지 층들은 주입 후 아래 및 위 층에 의하여 보온이 되기 때문에 가운데 3층의 인장 강도 및 경도가 가장 낮아 졌을 것으로 생각되었다. 그러므로 가운데 3층으로부터 얻은 시편이 원하는 기계적 성질을 만족하면 다른 층으로부터 얻은 시편도 만족할 것으로 판단되었다.

3.2 셸 적층 주형 층 수의 영향

셸 적층 주조 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 층 수의 영향을 시험하기 위하여 3 및 7층의 주형을 조형하여 시험하였으며 그 결과는 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 층 수가 증가함에 따라 가운데 층으로부터 얻은 시편의 강도 및 경도는 감소하였으며 연신율은 증가하였다. 셸 판의 수가 증가함에 따라 가운데 층의 열방출 속도가 늦어지고 따라서 응고 및 냉각 속도가 감소하여, Table 3에서 보이는 바와 같이, 흑연립수와 펄라이트 부피분율이 감소하였다.

3.3 구상화 원소 및 주 원소 함량의 영향

3.3.1 잔류 마그네슘의 영향

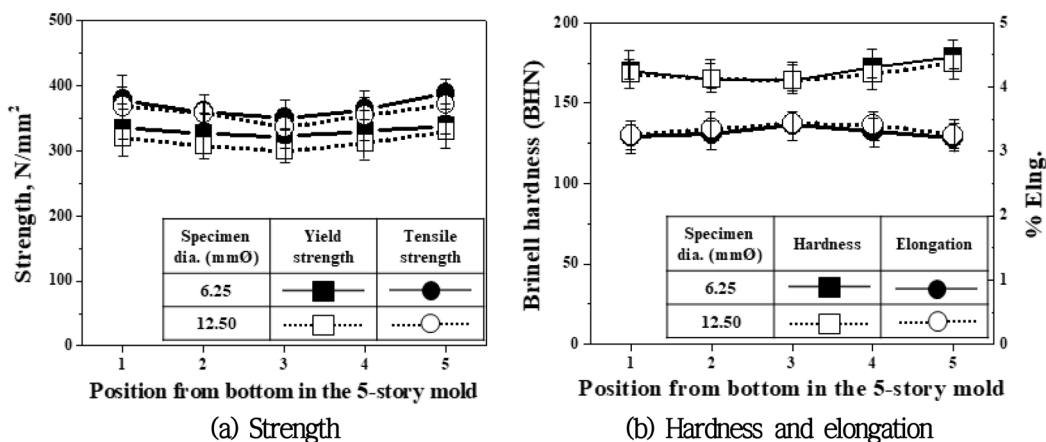
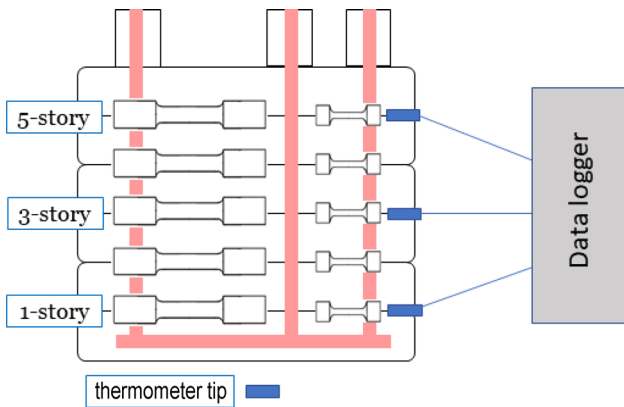
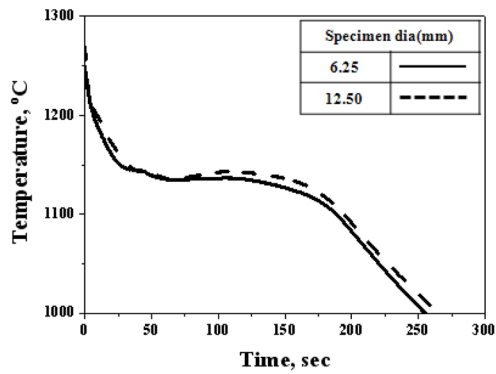


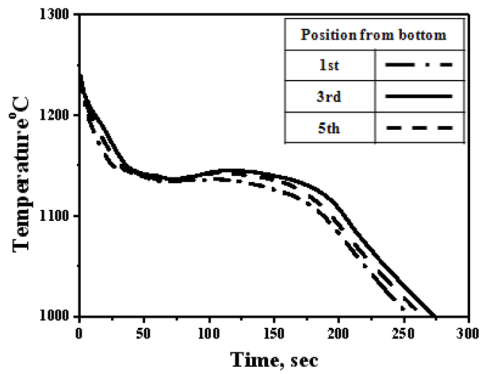
Fig. 3. Effects of the section size and position on the mechanical properties of ductile cast iron poured into 5-story shell stack mold.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Variations of cooling curves with the section size and position of specimens poured into 5-story shell stack mold.

주방 상태의 기계적 성질과 기지 조직에 미치는 잔류 마그네슘의 영향을 시험하기 위하여 잔류 마그네슘 함량을 0.00 ~ 0.06wt% 범위에서 0.01wt% 간격으로 변화시켜 실험하였으며 그 결과는 Fig. 6에서 보이는 바와 같다. 이 때, 탄소 및 규소 함량은 각각 3.75 및 2.65wt%으로 일정하게 하였다.

단면 수축부의 직경이 6.25mm로 작은 시편의 경우 잔류 마그네슘 함량이 0.01wt%에서 0.01wt% 간격으로 0.06wt%

Table 3. Effects of position, the number of stories and section size on the microstructure of ductile cast iron poured into shell stack mold.

| No of stories | Position from bottom | Specimen diameter. (mm) | Nodularity (%) | Nodule count (#/mm ²) | Vol.% Pearlite |
|---------------|----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
| 3 | 1st | 6.25 | 95.9 | 245 | 47.3 |
| | | 12.50 | 92.7 | 227 | 45.6 |
| | 2nd | 6.25 | 94.0 | 227 | 45.8 |
| | | 12.50 | 87.6 | 188 | 40.3 |
| | 3rd | 6.25 | 94.0 | 263 | 48.7 |
| | | 12.50 | 92.5 | 250 | 46.5 |
| 5 | 1st | 6.25 | 93.9 | 189 | 40.1 |
| | | 12.50 | 89.5 | 192 | 39.7 |
| | 2nd | 6.25 | 94.6 | 160 | 35.2 |
| | | 12.50 | 87.6 | 156 | 35.4 |
| | 3rd | 6.25 | 89.8 | 156 | 34.7 |
| | | 12.50 | 90.6 | 130 | 32.3 |
| | 4th | 6.25 | 89.0 | 198 | 42.1 |
| | | 12.50 | 93.3 | 183 | 38.7 |
| | 5th | 6.25 | 86.1 | 265 | 48.9 |
| | | 12.50 | 90.5 | 242 | 47.0 |
| 7 | 1st | 6.25 | 95.3 | 185 | 39.0 |
| | | 12.50 | 92.9 | 185 | 37.4 |
| | 2nd | 6.25 | 93.6 | 133 | 31.9 |
| | | 12.50 | 91.4 | 136 | 32.1 |
| | 3rd | 6.25 | 94.5 | 126 | 26.9 |
| | | 12.50 | 92.8 | 128 | 26.9 |
| | 4th | 6.25 | 91.0 | 137 | 27.5 |
| | | 12.50 | 92.9 | 132 | 27.8 |
| | 5th | 6.25 | 92.9 | 165 | 35.4 |
| | | 12.50 | 92.7 | 160 | 35.4 |
| | 6th | 6.25 | 92.0 | 186 | 41.1 |
| | | 12.50 | 90.8 | 186 | 40.3 |
| | 7th | 6.25 | 91.6 | 261 | 49.4 |
| | | 12.50 | 88.5 | 202 | 43.4 |

까지 증가함에 따라 인장 강도는 318.4에서 415.9N/mm²으로 증가하였다. 그리고 브리넬 경도 값은 125에서 179까지 증가하였으며 연신율은 4.12에서 2.86%으로 감소하였다. 단면 수축부의 직경이 12.50mm로 큰 시편의 경우 잔류 마그네슘 함량이 0.01wt%에서 0.01wt% 간격으로 0.06wt%까지 증가함에 따라 인장 강도와 경도는 각각 286.8에서 381.6 N/mm²으로 그리고 100에서 172까지 증가하였으며 연신율은 4.27에서 3.21%으로 감소하였다.

그 원인을 밝히기 위하여 각 시편의 미세조직을 관찰하였으며 그 결과는 Table 4에서 보이는 바와 같다. 단면 수축

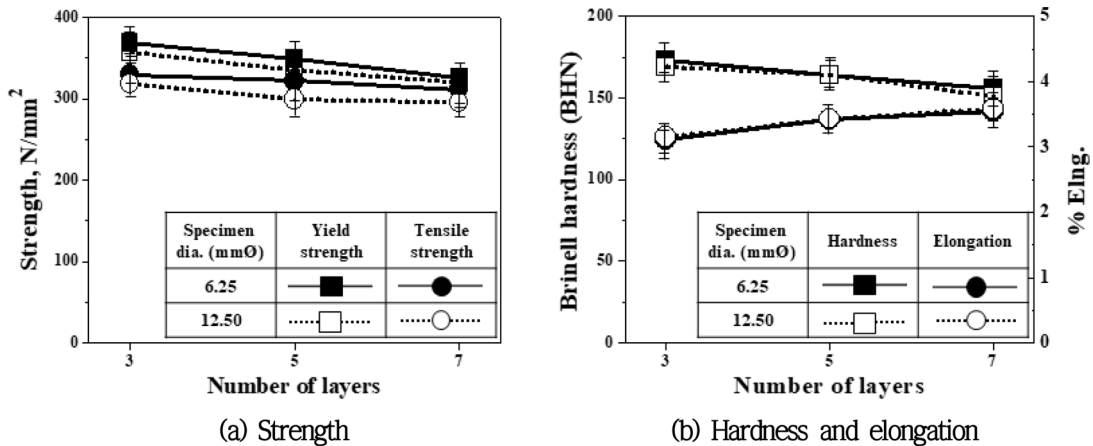


Fig. 5. Effects of the section size and the number of layers of on the mechanical properties of specimen obtained from the center layer of shell stack mold.

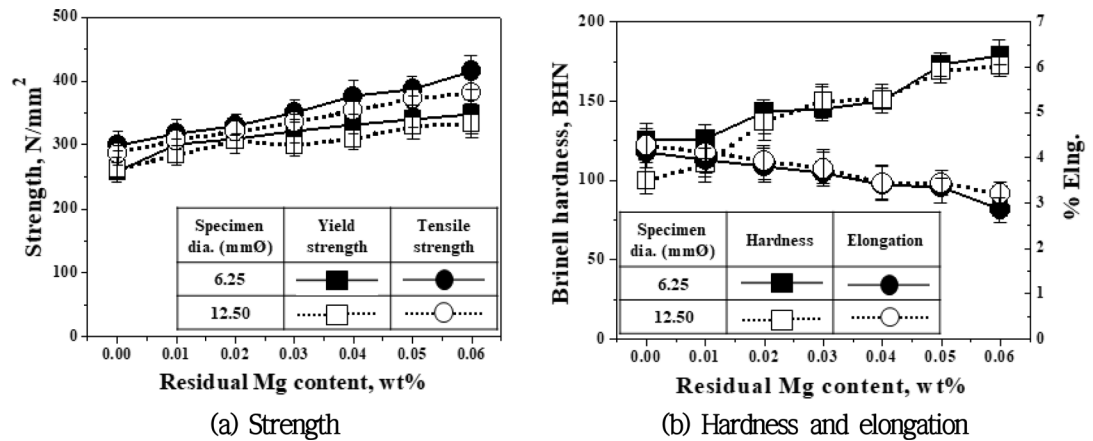


Fig. 6. Effects of the section size and amount of residual Mg added on the mechanical properties of the specimen obtained from the center layer of 5-story shell stack mold.

부의 직경이 6.25mm으로 작은 시편의 경우 잔류 마그네슘 함량이 0.01wt%에서 0.06wt% 간격으로 0.06wt%까지 증가함에 따라 구상화율은 51.4에서 92.4%까지 증가하였다. 그리고 단면 수축부의 직경이 12.50mm으로 큰 시편의 구상화율은 50.7에서 92.9%로 증가하였다.

일반적인 주철의 응고 과정에서 용탕 중 구상화 원소가 존재하지 않을 경우 흑연 결정의 프리즘면에 구상화 저해 원소인 산소 및 황이 흡착하여 프리즘면의 계면 에너지를 감소시켜 편상 흑연이 성장한다. 그러나 구상화 원소인 마그네슘을 첨가하면 이 두 원소와 결합하여 제거하고 계면 에너지가 낮은 기지면 방향으로 성장할 수 있게 되어 구상흑연이 성장한다. 구상화율이 높을수록 용력 집중 계수가 감소하여 강도와 경도가 증가하였으며 연신율은 약간 감소하였다.

3.3.2 탄소 함량의 영향

주방 상태의 기계적 성질과 기지 조직에 미치는 탄소 첨가

의 영향을 시험하기 위하여 탄소 함량을 3.55 ~ 3.95wt% 범위에서 0.20wt% 간격으로 변화시켜 실험하였으며 그 결과는 Fig. 7에서 보이는 바와 같다. 이 때 규소와 잔류 마그네슘 함량은 각각 2.65 및 0.04wt%로 일정하게 하였다.

단면 수축부의 직경이 6.25mm로 작은 시편의 경우 탄소 첨가량이 3.55wt%에서 0.20wt% 간격으로 3.95wt%까지 증가함에 따라 인장 강도는 379.0에서 334.6N/mm²로 감소하였고, 브리넬 경도 값은 153.0에서 149.0으로 감소하였으며 연신율은 3.25에서 3.81%로 증가하였다. 단면적 수축부의 직경이 12.50mm로 큰 시편의 경우 탄소 첨가량이 탄소 첨가량이 3.55wt%에서 0.20wt% 간격으로 3.95wt%까지 증가함에 따라 인장 강도는 360.1에서 327.9 N/mm²로 감소하였고, 브리넬 경도 값은 150에서 147으로 약간 감소하였으며 연신율은 3.32에서 3.85%로 증가하였다.

그 원인을 규명하기 위하여 각 시편의 미세 조직을 관찰하였으며 그 결과는 Table 4에서 보이는 바와 같다. 구상화율

Table 4. Effects of section size and alloying element on the microstructure of ductile cast iron poured into shell stack mold.

| Element | Specimen diameter. (mm) | Nodularity (%) | Nodule count (#/mm ²) | Vol.% Pearlite | Vol.% Ferrite | Vol.% Graphite | Carbon equivalent | |
|---------|----------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|------|
| Mg | 0.01 | 6.25 | 51.4 | 153 | 21.2 | 78.8 | - | 4.63 |
| | | 12.50 | 50.7 | 143 | 22.3 | 77.7 | - | |
| | 0.02 | 6.25 | 75.4 | 164 | 24.9 | 75.1 | - | 4.64 |
| | | 12.50 | 74.1 | 152 | 23.5 | 76.5 | - | |
| | 0.03 | 6.25 | 80.7 | 169 | 29.1 | 70.9 | - | 4.62 |
| | | 12.50 | 79.9 | 161 | 27.4 | 72.6 | - | |
| | 0.04 | 6.25 | 90.3 | 162 | 31.6 | 68.4 | - | 4.63 |
| | | 12.50 | 92.3 | 151 | 29.5 | 70.5 | - | |
| | 0.05 | 6.25 | 91.5 | 175 | 32.1 | 67.9 | - | 4.63 |
| | | 12.50 | 91.5 | 153 | 32.3 | 67.7 | - | |
| | 0.06 | 6.25 | 92.4 | 189 | 34.1 | 65.9 | - | 4.63 |
| | | 12.50 | 92.9 | 161 | 32.1 | 67.9 | - | |
| C | 3.55 | 6.25 | 88.9 | 161 | 26.9 | 73.1 | 5.18 | 4.42 |
| | | 12.50 | 89.7 | 126 | 18.9 | 81.1 | 9.44 | |
| | 3.75 | 6.25 | 90.3 | 162 | 31.6 | 68.4 | 4.83 | 4.62 |
| | | 12.50 | 92.3 | 151 | 27.3 | 72.7 | 6.84 | |
| | 3.95 | 6.25 | 91.2 | 183 | 37.8 | 62.2 | 3.91 | 4.83 |
| | | 12.50 | 92.6 | 141 | 29.4 | 70.6 | 4.12 | |
| Si | 2.45 | 6.25 | 89.9 | 183 | 33.1 | 66.9 | - | 4.56 |
| | | 12.50 | 89.1 | 175 | 29.9 | 70.1 | - | |
| | 2.65 | 6.25 | 90.3 | 162 | 31.6 | 68.4 | - | 4.62 |
| | | 12.50 | 92.3 | 151 | 27.3 | 72.7 | - | |
| | 2.85 | 6.25 | 89.5 | 180 | 26.6 | 73.4 | - | 4.69 |
| | | 12.50 | 90.6 | 176 | 22.6 | 77.4 | - | |

은 88.9 ~ 92.6% 범위였으며 거의 90%에 가까웠다. 단면 수축부의 직경이 12.50mm로 큰 시편이 단면 수축부의 직경이 6.25mm로 작은 시편에 비해서 응고 및 냉각 속도가 빨라 구상흑연이 미세화되고 흑연립수가 훨씬 더 많았다. 또한, 페라이트 결정립 크기가 더 미세하고 펄라이트 부피 분율은 더 컸다. 따라서 단면 수축부의 직경이 작은 경우에 인장 강도 및 경도가 더 크고 연신율은 더 작았다. 탄소는 흑연화 원소이며 그 함량이 증가할수록 탄소 당량이 증가하여 구상 흑연의 부피 분율이 증가한다. 비록 Table 4에서 보이는 바와 같이 탄소함량이 증가함에 따라 기지 중 펄라이트 부피분율이 증가하기는 하나 탄소당량의 증가에 따른 흑연의 부피 분율 증가의 영향이 더 큰 것으로 생각되었다.

3.3.3 규소 함량의 영향

주방 상태의 기계적 성질과 기지 조직에 미치는 규소 함량의 영향을 시험하기 위하여 규소 함량을 2.45 ~ 2.85wt% 범위에서 0.20wt% 간격으로 변화시켜 실험하였으며 그 결과는 Fig. 8에서 보이는 바와 같다. 이 때, 탄소와 잔류 마그네슘

함량은 각각 3.75 및 0.04wt%으로 일정하게 하였다.

단면 수축부의 직경이 6.25mm로 작은 시편의 경우 규소 첨가량이 2.45wt%에서 0.20wt% 간격으로 2.85wt%까지 증가함에 따라 인장 강도는 378.1에서 342.0N/mm²으로 감소하였고, 브리넬 경도 값은 154에서 145.0으로 감소하였으며 연신율은 3.18에서 3.78%으로 증가하였다. 단면 수축부의 직경이 12.50mm로 큰 시편의 경우 2.45wt%에서 0.20wt% 간격으로 2.85wt%까지 증가함에 따라 인장 강도는 359.1에서 339.8N/mm²으로 감소하였고, 브리넬 경도 값은 151에서 143으로 약간 감소하였으며 연신율은 3.21에서 3.88%로 증가하였다. 그 원인을 밝히기 위하여 각각의 시편의 미세 조직을 관찰하였으며 그 결과는 Table 4에서 보이는 바와 같다. 구상화율은 89.9 ~ 92.3% 범위였으며 거의 90%에 가까웠다. 규소는 흑연화 촉진 원소로서 탄소 당량을 증가시키고 공석 온도를 높여서 페라이트를 더 안정화 시킨다. 따라서 규소 함량이 증가함에 따라 인장 강도 및 경도는 감소하고 연신율은 증가하였다.

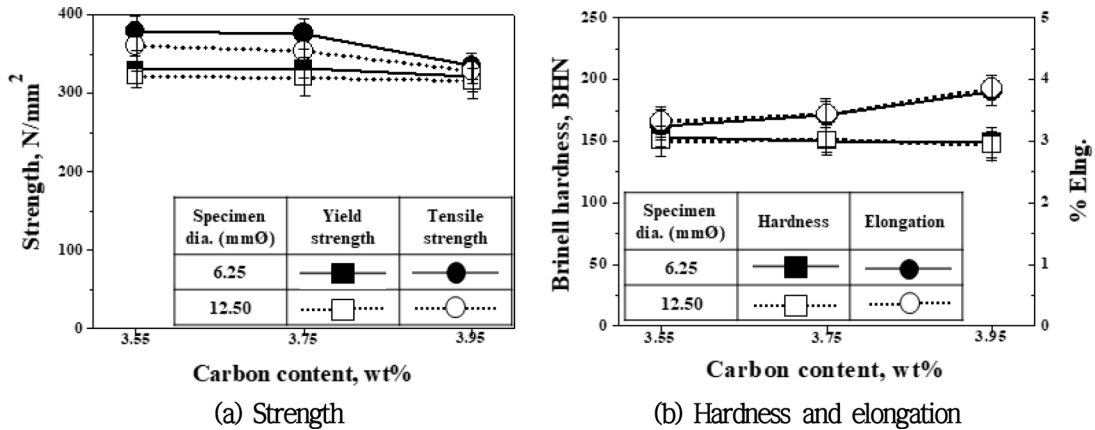


Fig. 7. Effects of the section size and amount of carbon content on the mechanical properties of the specimen obtained from the center layer of 5-story shell stack mold.

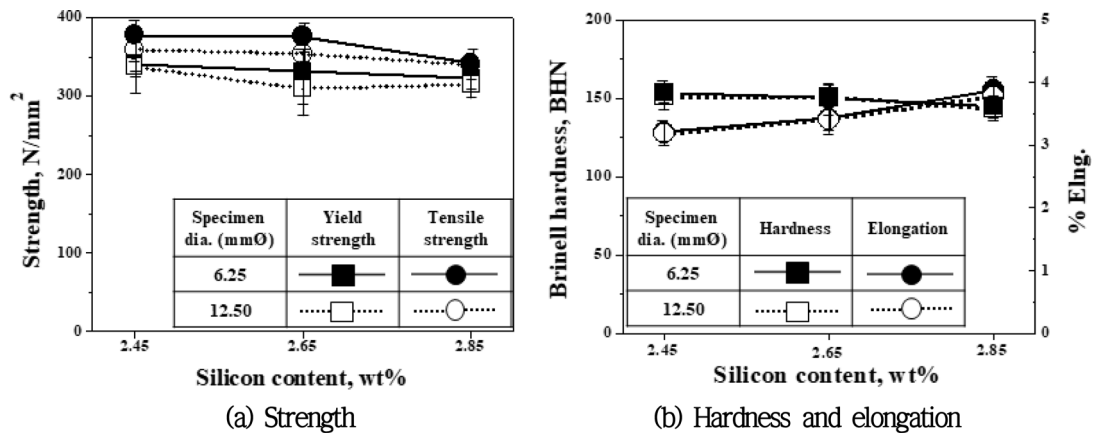


Fig. 8. Effects of the section size and silicon content on the mechanical properties of the specimen obtained from the center layer of 5-story shell stack mold.

4. 결 론

셀 적층 주조 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 주형 변수 및 주 합금 원소의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단면 수축부의 직경이 6.25mm로 작은 시편이 12.5mm로 큰 시편보다 강도 및 경도가 더 크고 연신율은 낮았다.
- 2) 5층 셀 적층 주조시 단면적 수축부의 직경이 같을 경우, 가운데 층에서 얻은 시편의 강도 및 경도는 가장 낮고 연신율은 가장 높았으며 가운데 층으로부터 멀어질수록 강도 및 경도는 증가하고 연신율은 감소하였다.
- 3) 셀 적층 주조 시 단면 수축부의 직경이 같은 경우 가운데 층 시편의 강도 및 경도는 셀 적층 주형 세트의 층수가 증가할수록 감소하였다.
- 4) 잔류 마그네슘 함량이 증가함에 따라 강도와 경도는 증가하였으나 연신율은 감소하였다.

- 5) 탄소 함량이 증가함에 따라 펄라이트 부피 분율이 증가하여 강도와 경도는 증가하였으나 연신율은 감소하였다.
- 6) 규소 함량이 증가함에 따라 강도 및 경도는 감소하였으나 연신율은 증가하였다.

References

- [1] W. F. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloy, McGraw - Hill Inc., New York (1993) 353-361.
- [2] M. Gagne, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montreal (2004) 23-45.
- [3] J. D. Mullins, Ductile Iron I, Production, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., translated into Korean by M. H. Kim et. al., Seoul (1992).
- [4] E. L. Kotzin, ed, Metalcasting & Molding Processes, AFS, IL (1981) 29-30.
- [5] M. Hohansson, Cast Iron, AFS Trans., IL (1977) 117-118.