

논문

후육 구상흑연주철의 이상흑연 제어

이상목[†] · 신호철 · 신제식 · 문병문

한국생산기술연구원 신소재개발본부 신소재 공정팀

Control of Abnormal graphite Structure in Heavy Section Ductile Cast Iron

Sang-Mok Lee[†], Ho-Chul Shin, Je-Sik Shin, and Byung-Moon Moon

New Materials Processing Team, Advanced Materials R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 406-130 Korea

Abstract

A series of heavy section ductile cast iron ingots with the cube length of 250mm were systematically investigated as functions of casting parameters of sand casting. Abnormal graphite formation was specially observed with the variation of Si content and Bi or Sb addition. Effects of chilling during casting and adaptation of riserless system were also examined, and proved to be effective for the prevention of both shrinkage and abnormal graphite such as chunky one. The formation of chunky graphite was effectively prevented by low Si content despite the promotion of pearlite matrix structure. The ferritic matrix was encouraged to form by high Si content and chunky graphite formation was effectively suppressed by the addition of Bi and Sb. Bi addition, however, was not good enough to control the microstructure owing to the sensitive cooling rate dependent inoculation behavior and relative low ability of nodulization. Sb addition, on the other hand, was proved to be effective for the microstructural control and enhancement of various mechanical properties such as strength, elongation, and impact energy. It may be suggested that optimized casting parameters should be applied to produce heavy section ductile cast iron with reliability.

Key words: Heavy section, Ductile cast iron, Chilling, Si content, Bi and Sb addition, Abnormal graphite, Shrinkage, Mechanical properties

(Received January 10, 2005; Accepted February 18, 2005)

1. 서 론

두께 100 mm 이상의 구상흑연주철은 핵폐기물 저장용 캐스크, 풍력발전용 로터, 각종 산업기계 베드류 부품, 대형 롤 등 산업계에서 수요가 많은 재료임에도 불구하고, 주조공정중 상대적으로 냉각속도가 낮아서 미세조직을 제어하기 어렵기 때문에 제품을 폐기 하는 경우가 종종 발생하며, 아직 개발의 여지가 많은 기본재료이다. 미세조직 제어의 관점에서 보면, 특히 chunky흑연이라는 이상흑연조직 (abnormal graphite)의 제어, 일정치 이상의 페라이트 기지조직 분율 확보, 수축공 등 주조 결함 제어 등이 중요한 기술개발 목표가 되며, 소재 물성의 관점에서는 일정한 연신율과 충격치 확보, 피로특성 향상, 용접성 부가, 신뢰성 구현 등이 관심의 초점이다.

후육 구상흑연주철 주조공정에서는 사형주형 내에서 용탕이 응고할 때 잉고트의 중심부로 갈수록 냉각속도가 느려져 공정 응고 시간이 길어진다. 따라서 페이딩 현상에 의한 접종효과의 감소로 흑연구상화율의 저하, 흑연입수의 감소, 구상흑연의 조대화, 흑연립 부유 등의 문제가 발생하며, 특히 이상 흑연조직의 하나인 chunky 흑연의 제어는 가장 필수적인 사항이 되고

있다[1]. 이러한 chunky 흑연은 최종 응고부위인 압탕 밑 부분 혹은 잉고트 후육부의 중심부 부근에 잘 발생 된다[2,3].

Chunky 흑연이 발생된 지역의 인장강도는 잉고트 건전부에 비해 약 90% 정도의 값을 가지고 있어 큰 문제가 되지 않으나, 연신율과 충격치는 건전부에 비해 약 20-30% 정도밖에 되지 않으며[4,5], 특히 chunky 흑연 발생지역은 육안으로 보일 정도로 지저분한 외관을 나타내며, 각종 소재의 피로수명 및 신뢰성에 심각한 타격을 주므로 각 후육 구상흑연주철 관련 산업체에서는 chunky 흑연 제어가 초미의 관심사로 떠오르고 있는 실정이다.

한편 두께 100 mm 이상의 대형·후육 제품의 미세조직 및 기계적 성질을 조사할 때에는 일반적으로는 주철 용탕을 주형에 주입 후 실험 편의상 따로 Y-block (현재 규격상 두께 최대치 75 mm)에서 주조한 시험재를 사용한다. 이러한 경우 대형제품의 실제강도와 많은 차이가 발생함으로써 얻어지는 데이터의 신뢰성이 없다.

본 연구에서는 생산현장에서 바로 응용될 수 있는 데이터의 축적과 생산기술 정립을 위하여 여러 가지 조성의 용탕을 한 변의 길이가 250 mm인 괴상의 정육면체 사형 공간부에 시험

[†]E-mail : smlee@kitech.re.kr

주조하여 후육 잉고트의 미세조직과 기계적 성질을 각 잉고트 부위별로 직접 평가하였다. 또한 주조 도중의 냉각속도, 이상흑연 제어용 첨가원소로 많이 연구되고 있는 Bi, Sb 등 미량첨가 원소[1-3]의 영향 등을 분석하여 250 mm 급 후육 구상흑연주철의 시험적 주조공정의 최적화를 시도하였으며, 각종 미세조직 특성과 기계적 성질을 주조변수의 함수로서 조사하여 향후 대형 구상흑연주철 부품의 생산기술 정립의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 용해주조

용해주조에 사용한 장입재는 일반 주조현장에서 사용하는 포항선철 및 강고철을 7:3의 비율로 배합한 지금, 금속 Si과 전극 흑연 등이며, 고주파 유도용해로를 사용하였고, 용해온도는 1500°C로 고정하였다. 용해도중 금속 Si과 전극 흑연으로 목표성분의 탄소당량(Carbon Equivalent 이하 C.E로 표기)을 4.30~4.35에 맞춘 후 레이들에 출탕하면서 Fe-Si-Mg-Ca 합금철을 사용하여 샌드위치 법으로 구상화처리를 하였으며, 주형에 주입 전 Fe-75 wt.%Si 합금철을 사용하여 접종하였다. 본 용해주조 공정에서 사용한 선철, 강고철, 구상화제 및 접종제의 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 사형 주형 공간부의 치수는 250×250×250 mm³ 무압탕 방식이었고 물유리형 규사를 CO₂ 가스로 경화시켰다. Table 2에 표시한 화학조성을 사용하여 냉금을 사용하지 않고 주조한 한 변 길이 250 mm급

후육 잉고트의 제반특성을 분석한 후, 각종 미세조직 제어 및 기계적 성질의 향상을 위하여 Table 3에 표시한 3가지 조성을 용해 주조하여 냉금 사용, Si 조성, Bi 및 Sb 첨가 영향을 종합적으로 평가하였다.

2.2 기계적 성질 평가

주방 상태의 잉고트에서 인장시험편과 충격시험편을 Fig. 1에서 보이는 바와 같은 지역에서 얻었다. 그림에서 보듯이 250 mm 급 잉고트 표면에서부터 중심부로 두께의 1/6, 2/6, 3/6 T의 위치에서 인장시험편과 충격시험편을 가공하여 기계적 성질을 평가하였다. 인장시험편은 KS B 0801 4호 규격을 사용하였고, 10 mm/min의 cross head 속도 조건으로 시험하였다. 충격시험편은 KS B 0809 4호 무노치 규격을 사용하였고 상온에서 샤르프 충격시험을 행하였다. 인장시험과 충격시험의 치수와 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 경도시험은 브리넬 경도계 (3000 kg 하중, 10 mm 강구볼, 30초간 측정)를 사용하여 실시하였다.

2.3 미세조직 관찰

인장시험 후 인장시험편을 절단, 연마 및 선택적 부식시킨 후 광학현미경으로 흑연조직과 기지조직을 관찰하였고, 상분석기를 사용하여 흑연구상화율, 흑연입경, 흑연입수 및 페라이트 면적을 정량적으로 측정하였다. 흑연입경과 입수는 각각 10개소에 대하여 각각 100배와 50배로 확대한 상태에서 분석하였고, 직경 5 μm 이하의 흑연립은 분석에서 제외하였다. 페라이트 면적율도 흑연구상화 측정부위에서 함께 분석하였다. 인장시험

Table 1. Chemical composition of charge materials and treatment alloys

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ca	Al	Fe	Remark
pig iron	4.20	1.50	0.40	0.09	0.03	-	-	-	bal.	PoHang pig iron
steel scrap	0.005	1.240	0.278	0.014	0.009	-	-	-	bal.	
spheroidizer	-	45.0	-	-	-	6.0	2.2	0.8	bal.	domestic product
inoculant	-	75.00	-	0.02~0.04	0.02~0.04	-	-	max 2.00	bal.	domestic product

Table 2. Chemical compositions of a reference cast iron (No.1 composition)

		C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe	C.E
No.1	Target Composition	3.60	2.10	<0.40	<0.10	<0.04	0.05	bal.	4.30
	Analysis Composition	3.52	2.30	0.35	0.07	0.01	0.06	bal.	4.29

Table 3. Chemical compositions of various alloys

		C	Si	Mn	P	S	Mg	Bi	Sb	Fe	C.E
No.2	Target Composition	3.80	1.80	<0.40	<0.10	<0.04	0.05	-	-	bal.	4.40
	Analysis Composition	3.70	1.82	0.30	0.07	0.01	0.05	-	-	bal.	4.31
No.3	Target Composition	3.55	2.40	<0.40	<0.10	<0.04	0.05	50 ppm	-	bal.	4.35
	Analysis Composition	3.48	2.45	0.28	0.07	0.01	0.04	N.A.	-	bal.	4.30
No.4	Target Composition	3.55	2.40	<0.40	<0.10	<0.04	0.05	-	50 ppm	bal.	4.35
	Analysis Composition	3.48	2.41	0.29	0.07	0.01	0.05	-	N.A.	bal.	4.28

(N.A. (Not available) means 'no exact actual composition was obtained')

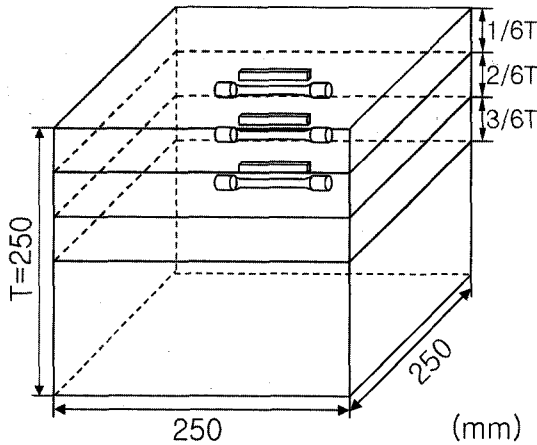


Fig. 1. Ingot configuration with denotation of sampling positions of tensile and impact test specimens.

파단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하여 각 주조 공정 변수에 상응하는 파괴거동도 파악하였다.

3. 실험 결과

3.1 250 mm급 잉고트의 시험 주조

Table 1에 표시된 No.1 조성 (C.E: 4.30)의 용탕을 용해하여 한 변의 길이가 250 mm인 정육면체 주형 공간부에 주조한 후 탈사 처리하여 제조한 잉고트의 중앙 절단면 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 잉고트 상부에 수축공 주조결함이 나타나는 것을 확인할 수 있다. No.1 조성의 주방 상태 잉고트의 표면부

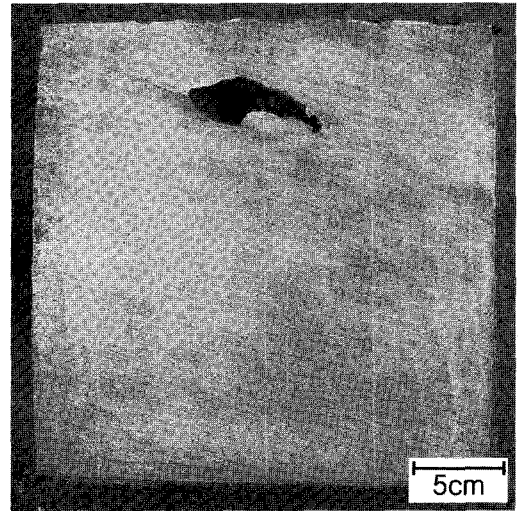


Fig. 3. Shrinkage defect occurring at the upper part of No.1 ingot.

로부터 1/6, 2/6, 3/6 T 위치에서의 미세조직을 Fig. 4에 나타내었다. 흑연립의 구상화율은 표면에서 중심부까지 60% 미만으로 매우 낮게 나타났고, 흑연립 주위에는 많은 양의 이상흑연조직인 chunky 흑연이 생성되어 있다.

Fig. 5는 No.1 조성의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 잉고트의 표면부로부터 1/6, 2/6, 3/6 T 위치에서의 강도는, 낮은 구상화율 및 chunky 흑연 발생 등에도 불구하고 1/6, 2/6, 3/6 T 전 위치에 걸쳐 인장강도 440 N/mm² 정도, 항복강도 270 N/mm² 정도의 양호한 값을 보여주고 있으며, 잉고트 위치에 따른 변화는 무시할 수준이다 (Fig. 5(a) 참조). Fig. 5(b)

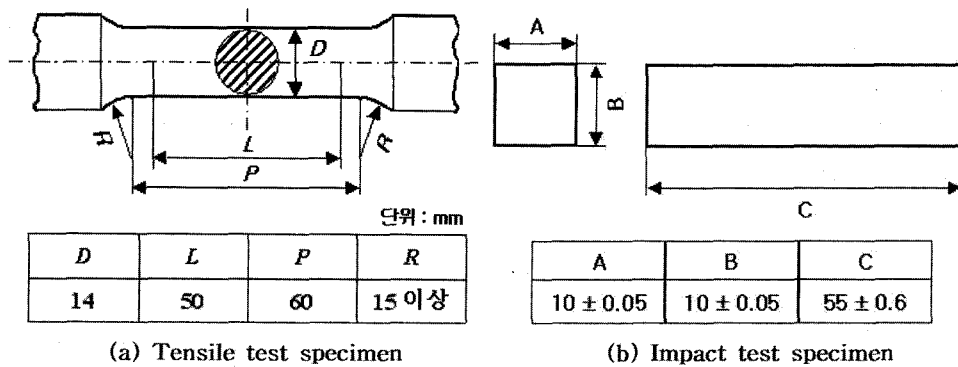


Fig. 2. Configurations of test specimens.

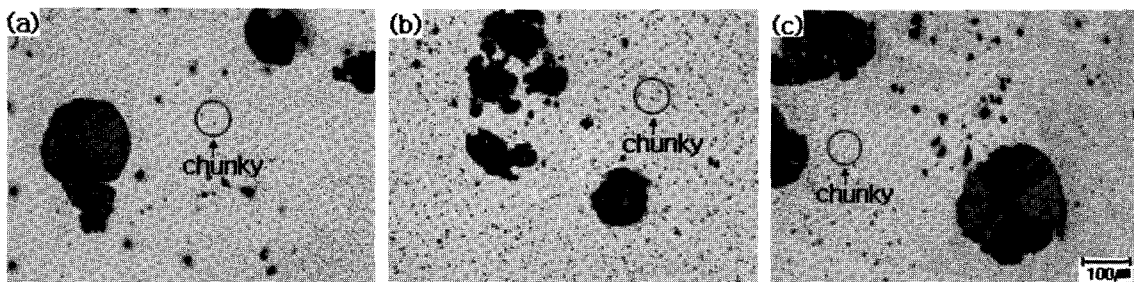
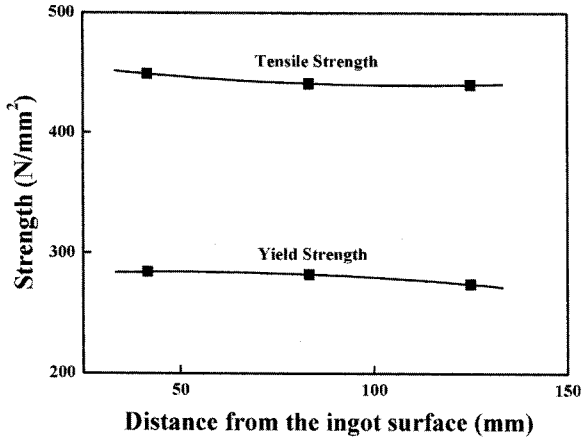
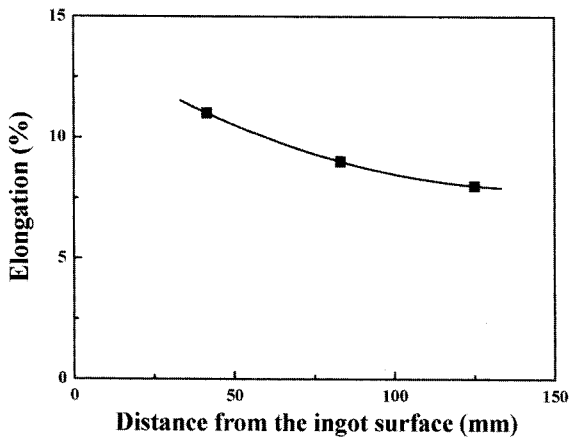


Fig. 4. Representative microstructures of No.1 ingot at various positions; a) 1/6, b) 2/, and c) 3/6 T.

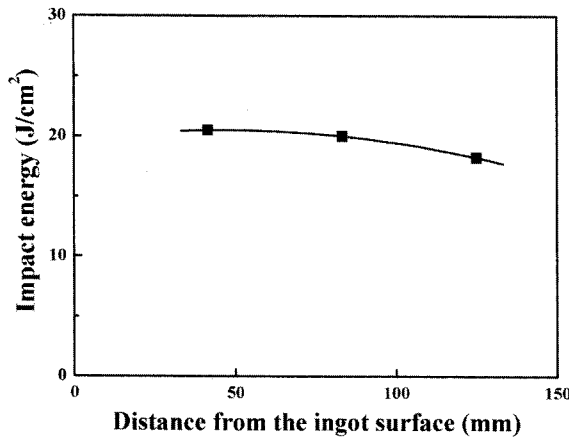
에는 연신율을 나타내고 있는데, 잉고트 표면에서 중심부로 갈수록 약 11%에서 9% 정도로 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있으며, 일반적인 구상흑연주철 소재의 연신율에 비해서는 크게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 상온 샤르피 충격치의 경우도 Fig. 5(c)에 나타난 것처럼 잉고트 표면에서 중심으로 갈수록



(a) Strength



(b) Elongation



(c) Impact energy

Fig. 5. Various mechanical properties of No.1 ingot as a function of distance from the ingot surface; (a) Strength, (b) Elongation, and (c) Impact energy.

약간 떨어지는 경향을 나타내었다. 따라서 이상 흑연이 잉고트 전 구역에서 발생한 No.1 시편의 경우 두께에 따른 편차는 크지 않지만, 연신율과 충격치는 일반 구상흑연주철의 경우에 비해 매우 적은 것으로 평가되었고, 이는 기존의 연구 결과와 잘 일치 한다[2,3]. 그림에 표시하지는 않았지만, 잉고트 각 부위에서의 경도값은 1/6, 2/6, 3/6 T 부근에서 각각 143, 141, 147HB 등으로 일정하게 나타났으며, 위치에 따른 차이는 거의 발생하지 않았다.

3/6 T 지점의 인장시험후의 인장시편 파단면을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 흑연립은 매우 조대하고 불규칙한 모습을 하고 있으며, 상호 연결되어 있었으며, 거의 모든 흑연립이 기지조직과 함께 파단 되는 형상을 나타내고 있다. 또한 기지조직에서도 전형적인 벽개파괴의 증거인 river pattern이 나타난다. 따라서 조대하고 서로 연결되어 있는 이상 흑연으로 인해 취성파괴 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

3.2. 냉금 사용, Si 조성 변화, Bi 및 Sb 첨가의 영향

냉금을 사용하지 않은 No. 1조성의 250 mm급 사형주조 결과 분석으로부터 수축공 결함 제거 및 chunky 흑연 제어를 위하여 Table 2에 정리된 것처럼 No.2에서 No.4까지의 3가지 조성을 냉금을 설치하여 주조하였다. 냉금의 재질은 구상흑연 주철재이고 크기는 사형 주형 공간부의 치수와 동일하게 하였다. 그리고 냉금의 표면에는 도형제 처리를 하였다. 이러한 실험을 통하여 냉금 사용의 효과, 같은 C.E 하에서의 Si 조성 변화의 영향, Bi 및 Sb 등 미량 첨가원소의 영향을 분석하고자 하였다. 3종 조성의 경우 공히 사형 주조시 냉금을 사용하여 냉각속도를 최대한 증대시키고자 하였다. No.2에서 No.4까지의 3종의 시험 조성을 선택한 이유와 분석의 중점사항은 각각 다음과 같다.

No.1: [기준 조성] (Si 2.10), 무 냉금: 수축공 발생, chunky 흑연발생

No.2: (Si 조성: 1.80), chunky 흑연 발생 조장원소인 Si 원소 감소시켜 봄

중점분석사항: Si의 함량이 2.1에서 1.8로 감소한 경

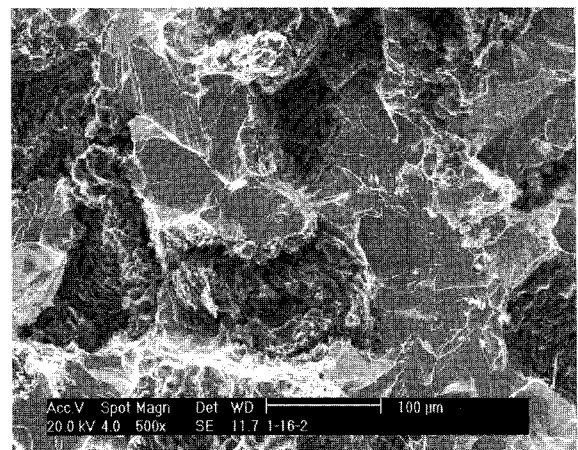


Fig. 6. Fractography of tensile test specimen of No.1 ingot.

우의 chunky 흑연발생 거동 및 기지조직 관찰

No.3: (Si 조성: 2.45), 50 ppm Bi 첨가, 기지조직 페라이트화 위해 Si 조성 증가시킴

중점분석사항: 페라이트 안정화 위해 증가시킨 Si 조성하에서의 Bi 영향

No.4: (Si 조성: 2.60), 50 ppm Sb 첨가, 기지조직 페라이트화 위해 Si 조성 증가시킴

중점분석사항: 페라이트 안정화 위해 증가시킨 Si 조성하에서의 Sb 영향

(※ No.1부터 No.4 잉고트의 C.E는 4.3 정도)

No.2에서 No.4까지 3종의 조성에 대하여 본 실험에서 사용한 무압탕 방안에 냉금을 설치하고 No.1과 같은 주조공정 변수를 설정하여 시험 주조한 후 잉고트의 중앙을 절단하여 관찰한 결과, 3종 조성에서 모두 수축공 주조결함이 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다. Fig. 7(a)는 250 mm급 사형주조 공간부에 냉금을 설치한 모습이고, Fig. 7(b)는 No.2 조성의 잉고트 중앙 단면부로 수축공 등 주조결함이 없는 건전한 중앙 절단면을 나타내고 있다.

No.2에서 No.4까지의 3종의 잉고트에 대하여 각 위치별 미세조직 사진을 Fig. 8에 타내었다. 3가지 잉고트 모두 위치에 상관없이 구상화율이 85% 이상으로 양호한 구상화를 나타내고 있고, 1/6 T 지점에서는 미세한 흑연 입자가 잘 발달되어 있고 2/6 T 지점부터 급격하게 조대화되고 있으며, 2/6 T 지점의 미세조직 특성은 잉고트의 중심부(3/6 T)와는 별 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 또한 3종의 잉고트 모두 chunky 흑연 등 이상흑연은 거의 관찰되지 않았다. 한편, No.2 조성의 경우 (Si의 함량이 1.80으로 낮은 경우), 1/6 T 지점에서의 기지조직은 완전 페라이트이나, 2/6 T 지점에서부터 기지조직의 페라이트 분율이 감소하며 펄라이트가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 한편, No.3과 No.4 조성의 경우 잉고트 전 구역을 걸쳐 기지조직은 높은 페라이트 분율을 유지하고 있다.

Fig. 9는 3종의 조성 잉고트에 대하여 흑연립의 여러 가지 기하학적 특성을 분석한 결과이다. Fig. 9(a)는 흑연 구상화율로서 3가지 조성 모두 잉고트의 표면에서 중심부로 갈수록 완만하게 구상화율이 떨어지고 있으나, 그 절대값은 모두 약 80-85% 정도 이상이었다. 그 중에서도 Sb이 50 ppm 첨가된 No.4 잉고트의 경우가 구상화율이 가장 우수한 것으로 평가되는데, 1/6 T에서 88%, 2/6 T에서 87% 3/6 T에서 85%로 높은 값을 보이고 있다. 각 조성의 잉고트에서의 구상흑연 입자수는 Fig. 9(b)에 나타내었다. 모든 조성에 대하여 냉각속도가 높은 표면부위에서 150-200개/mm² 정도로 매우 높게 나타나고 내부로 갈수록 120-150개/mm² 정도로 감소하는 경향을 보인다. 또한 아무 원소도 첨가하지 않은 No.2 조성에 비해 Bi이 첨가된 No.3 잉고트, Sb이 첨가된 No.4 잉고트에서의 구상흑연 입수가 크게 나타나며, 그 효과는 특히 표면 부위에서 두드러진다. 특히, Bi이 첨가된 No.3 시편의 경우, 잉고트의 윗부분인 1/6 T 지점에서는 Sb 첨가의 경우와 같이 매우 높은 구상흑연 입수를 보이다가 2/6 T 지점부터 Sb 첨가의 경우에 비해 상대적으로 흑연입수가 더욱 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 9(c)에 나타낸 흑연입경의 경우 No.2, No.3, No.4 잉고트에 대해서 1/6 T 지점에서는 각각 40 μm, 18 μm, 26 μm 정도로 No.2 잉고트가 가장 크게 나타나고, Bi가 첨가된 No.3의 경우가 가장 적은 값을 나타낸다. 하지만 3/6 T 지점에서는 No.2, No.3, No.4의 잉고트의 경우 각각 76, 65, 54 μm 정도로 Sb이 첨가된 No.4 잉고트가 가장 적은 값을 갖는 것을 알 수 있었다.

3가지 조성의 잉고트에서 기지조직의 페라이트 분율을 Fig. 10에 나타내었다. Si의 함량이 1.8% 정도로 적은 No.2 잉고트의 경우 1/6 T에서는 84%정도의 높은 페라이트 분율을 나타내지만 2/6 T 지점부터 급속도로 페라이트 분율이 떨어져서 중심부에서는 69% 미만의 값을 나타내며, 약 31% 정도의 펄라이트가 형성되었다. 반면에 No.3 (Bi 첨가)과 No.4 (Sb 첨가)의 경우에는 Si의 함량이 각각 2.45, 2.60% 등으로 상대적으로 높아 흑연화 조장의 결과로 페라이트가 안정화되어 있

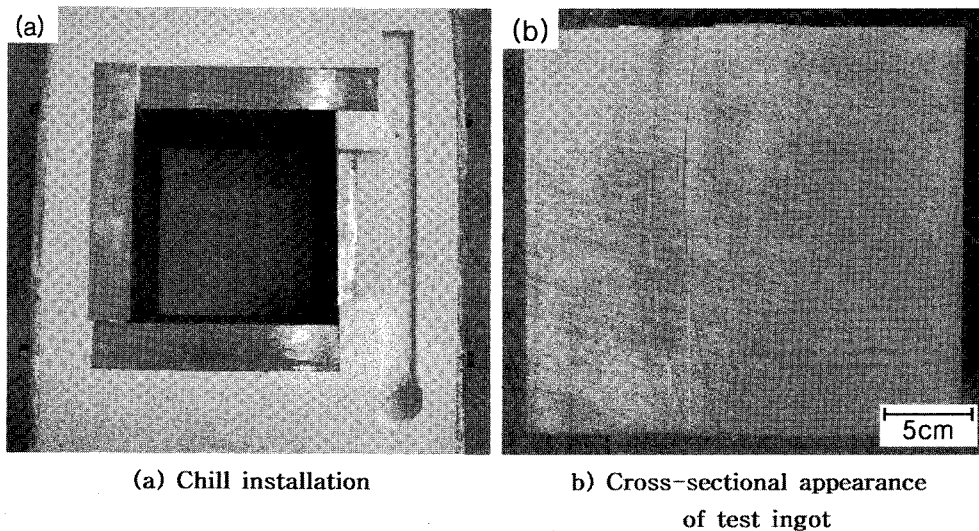


Fig. 7. General views of (a) Chill installation and (b) Cross-sectional appearance of test ingot.

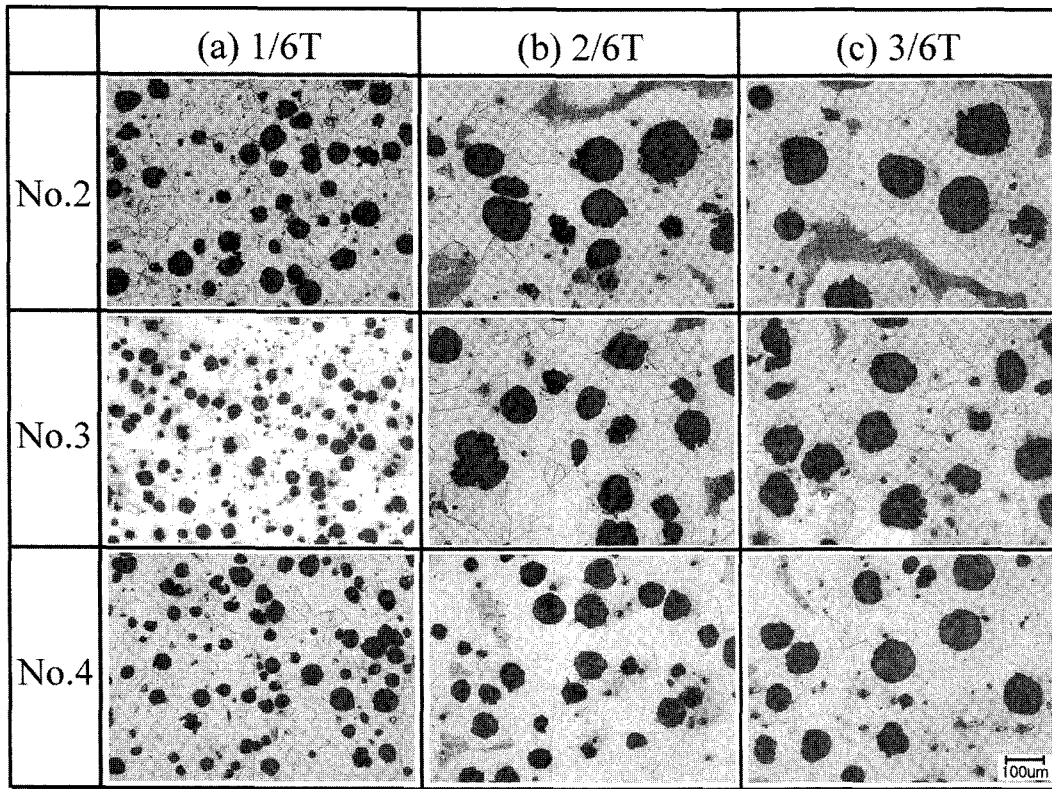


Fig. 8. Microstructures of various alloys as a function of distance from the ingot surface.

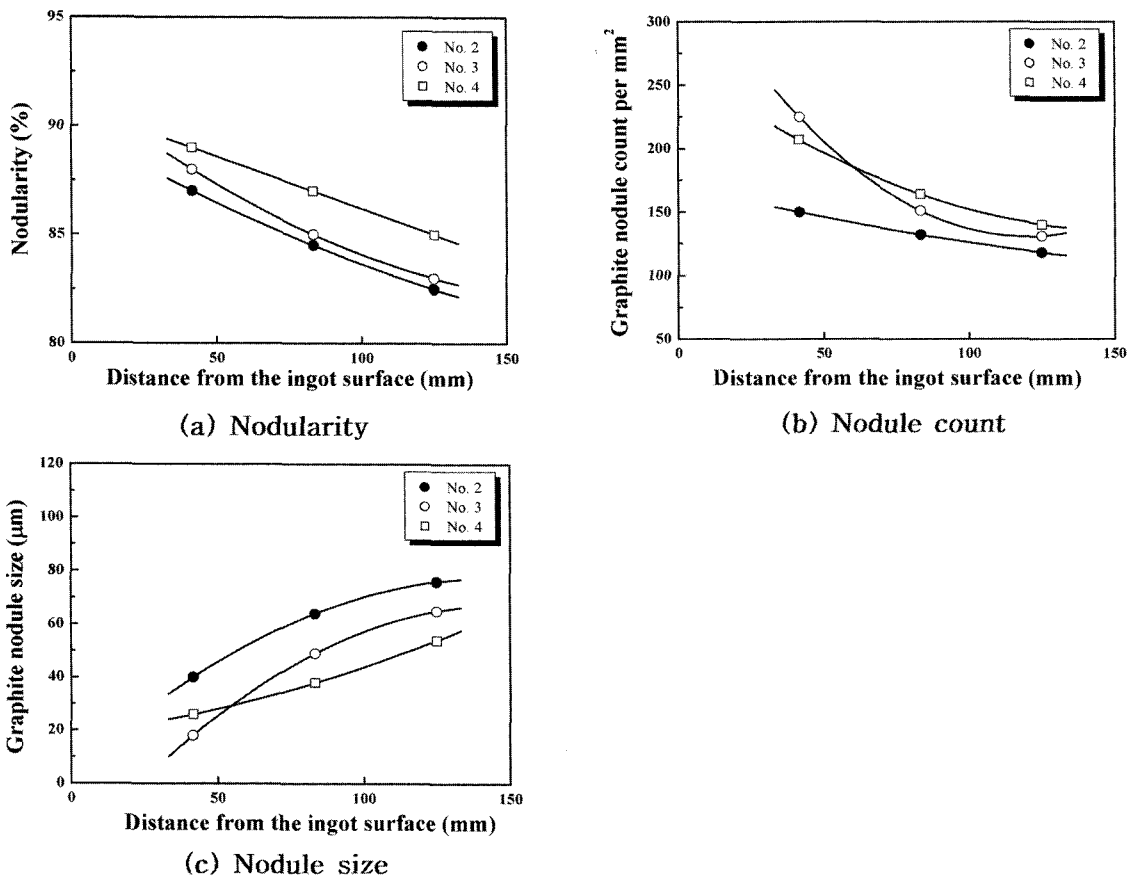


Fig. 9. Various microstructural features of graphites of various alloys as a function of distance from the ingot surface.

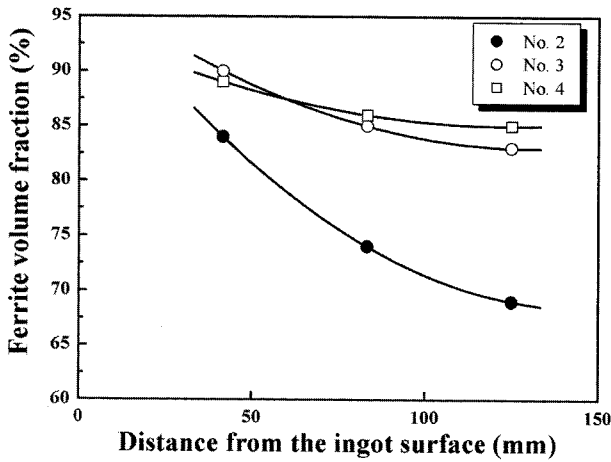


Fig. 10. Ferrite volume fractions of various alloys as a function of distance from the ingot surface.

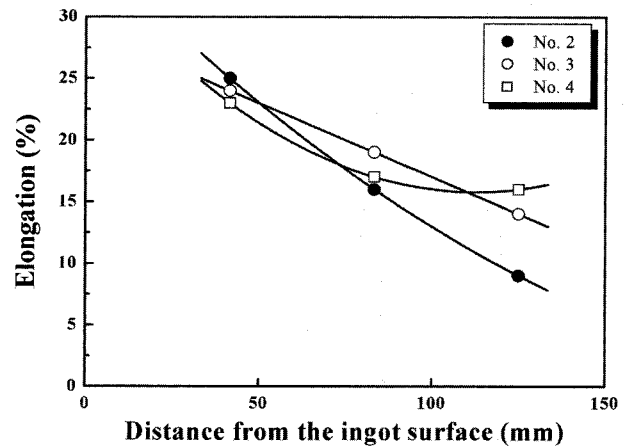


Fig. 12. Variation of elongations of various alloys as a function of distance from the ingot surface.

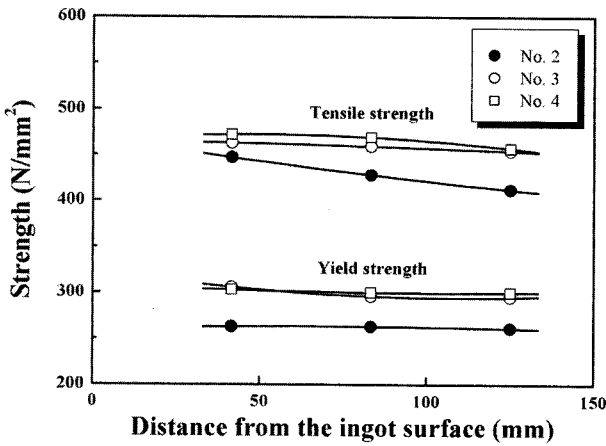


Fig. 11. Variation of tensile and yield strengths of various alloys as a function of distance from the ingot surface.

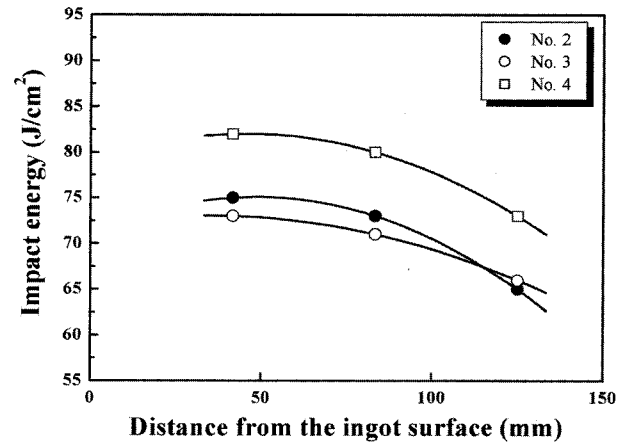


Fig. 13. Variation of impact energies of various alloys as a function of distance from the ingot surface.

며 3/6 T 지점에서도 약 83, 85% 정도의 높은 페라이트 분율을 나타낸다.

각 잉고트의 여러 부위에서 분석한 인장강도와 항복강도를 Fig. 11에 나타내었다. No.2 조성의 경우 가장 낮은 인장강도와 항복강도를 나타내며, 1/6 T 지점에서 3/6 T 지점으로 갈수록 인장강도는 비교적 급하게 떨어지는 경향이 나타나지만, 항복강도는 비교적 일정한 값을 유지하고 있다. 또한 항복강도/인장강도의 비는 대략 1/6 T 지점에서는 대략 0.57 정도, 3/6 T 지점에서는 대략 0.63으로 나타난다. No.3과 No.4 조성의 경우는 전 잉고트 위치에 대하여 No.2 조성에 비해 향상된 인장강도와 항복강도 값을 보이고 있으며, 각각의 강도 값은 거의 차이가 나지 않을 정도의 비슷한 범위에서 Sb이 첨가된 No.4의 경우가 약간 큰 값을 나타내고 있다. 또한 위치에 따른 인장강도와 항복강도의 변화량도 거의 나타나지 않아 후속 감수성이 예민하지 않다는 것을 알 수 있다. 항복강도/인장강도의 비는 No.3 조성과 No.4 조성 공히 위치에 관계없이 대략 0.64로 나타난다.

Fig. 12는 각 조성의 위치에 따른 연신율을 나타낸다. No.2

조성의 경우 표면에서 중심부로 갈수록 25, 16, 9%로 직선적으로 감소하는 것을 알 수 있다. No.3 조성의 경우에도 No.2 조성처럼 급격하지는 않지만 표면에서 중심부로 갈수록 24, 19, 14% 정도로 직선적으로 감소하는 것을 알 수 있다. No.4 조성의 경우, 표면에서부터 내부로 갈수록 연신율은 23, 18, 17% 정도로 완만하게 감소하고 있으며 특히 2/6 T 지점과 3/6 T 지점에서의 연신율이 큰 차이가 없을 정도로 위치에 따른 안정적인 변화 특성을 보이고 있다.

Fig. 13은 각 조성의 잉고트에 대해 각각의 위치에서 상온에서 실시한 샤르피 충격 에너지 값을 나타낸다. No.2 조성의 잉고트 경우, Bi이 첨가된 No.3 조성의 잉고트와 비슷한 충격 에너지를 나타내며, No.4 조성에 비해서는 적은 충격에너지를 나타낸다. 또한 후속 감수성이 가장 민감하며 표면부에서 중심부로 갈수록 충격에너지는 약 75 J/cm²에서 64 J/cm²로 감소하여 약 15% 이상 감소하는 경향을 나타낸다. Sb이 첨가된 No.4 조성의 경우 전 위치에서 가장 우수한 충격특성을 나타내고 있으며, 충격치도 표면에서 내부로 갈수록 82, 81, 73 J/cm² 정도로 우수한 값을 가지고 있으며 후속 감수성도 민감하지 않아 표면부에 비해 중심부의 충격에너지는 약 89% 정도

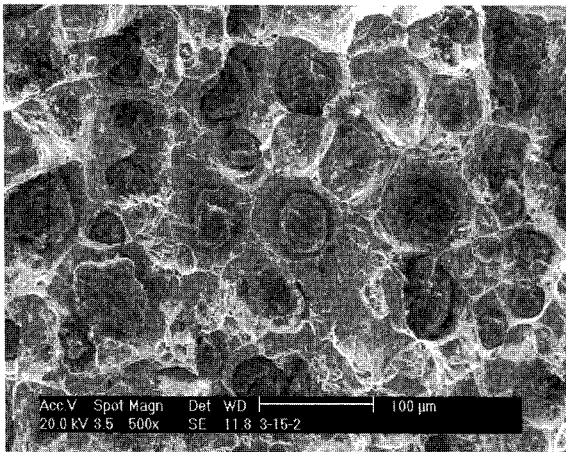


Fig. 14. Fractography of tensile test specimen of No.4 ingot at the 3/6 T position.

로, 잉고트 각 위치에 따라 일정하고 안정적인 충격 거동을 보이는 것으로 나타난다.

Fig. 14는 가장 좋은 기계적 성질을 보이는 No.4 조성 잉고트의 3/6 T 지점에서의 인장시험편의 파단면을 SEM으로 관찰한 것으로 중심부에서도 흑연립을 핵으로 하는 구형 dimple을 주체로 한 연성 파괴가 관찰되며, 흑연기지의 경계에 void가 형성된 후 void 성장과 연결에 의해 일어난 전형적인 연성 파괴의 모습을 보이고 있다[10].

4. 고 찰

4.1. 250 mm급 후육 잉고트 주조시 응고거동 및 제반 특성

무압탕 방안으로 No.1 조성을 주조한 250 mm급 후육 잉고트에서는 Fig. 3에서처럼 수축공 결함이 발생되었다. 일반적으로 구상흑연주철의 주조중에는 회주철에 비해 수축공 결함 발생 확률이 높다. 이는 회주철 응고의 경우에는, 액상에서 오스테나이트상이 생성 후 오스테나이트상 주변에서 편상흑연이 정출되며 응고가 이루어지므로 일반적으로 주형 벽면으로부터 잉고트의 안쪽 방향으로 지향성 응고가 이루어지며, 용탕이 고상인 오스테나이트로 상변태 할때의 응고 수축량을 편상흑연이 생성되면서 조장되는 흑연팽창 효과에 의해 효과적으로 상쇄함으로써 수축공 결함의 발생 확률이 감소한다. 하지만, 구상흑연 주철 응고의 경우에는 흑연이 먼저 액상에서 정출한 후, 그 주위를 오스테나이트 상이 에워싸면서 성장하는 방식으로 응고가 이루어진다. 특히 후육 구상흑연주철의 경우처럼 냉각속도가 작을 경우, 흑연의 성장속도보다 흑연을 둘러싼 오스테나이트상의 성장속도가 더 크다[3-5]. 따라서 오스테나이트를 가로지르는 탄소 확산의 어려움으로 인해 흑연립의 성장이 제한을 받게 되고, 이러한 개별적인 흑연립을 중심으로 한 응고거동은 지향성을 이루지 못하고 용탕 전체를 통해서 이루어진다. 즉, 오스테나이트 생성에 의한 응고 수축량을 흑연의 효과적인 팽창으로 적절하게 보상해 주지 못하므로써 구상흑연주철의 경우 수축공 결함 발생 빈도가 높다. 본 실험의 경우에도 냉금을

사용하지 않은 No.1 조성에 대한 시험 주조의 경우 수축공 결함이 발생하였다.

Fig. 4에서처럼 No.1 조성의 미세조직을 살펴보면, 구상화율이 60% 정도로 불량하고, 많은 양의 chunky 흑연이 발생하였으며, 잉고트 내부로 갈수록 흑연입경도 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다. 후육 잉고트 응고시 공정응고 시간이 길어짐으로서 페이딩 효과에 의한 점중효과 감소로 흑연 입자의 집적, 조대화, 성분 편석 등에 의해 흑연의 형상이 구형에서 벗어나 구상화율은 감소하며, 이러한 경향은 잉고트 내부로 갈수록 심화되는 경향이다. 또한 2/6 T 지점에서부터 발생하는 이상흑연인 chunky 흑연은 늘어난 공정응고 시간으로 말미암아 흑연립을 둘러싸고 있는 오스테나이트 층의 두께가 증가하고, 탄소의 확산에 의한 흑연립의 추가 성장이 방해를 받음으로써 발생 한다[7]. 즉, 오스테나이트에 의해 흑연립쪽에서의 이동이 제지된 탄소 원자들은 오스테나이트상 주변에서 3차원적인 네트워크 형태를 가지며 불규칙한 형상을 가지며 응고하게 되는데, 이것이 바로 chunky 흑연의 실체이다[5]. 일반적으로 응고되는 오스테나이트상 주변의 과냉 지역에서는 백선화 경향이 증대하지만, No.1 조성의 경우에는 Si의 함량이 2.1 정도로 높아 흑연의 흑연화 능력이 커져 있으므로 백선화가 진행되지 않고, chunky 흑연 응고를 하게 된 것이다.

이러한 chunky 흑연의 존재로 인해 인장강도와 항복강도는 크게 영향을 받지 않지만, 연신율, 충격치 등은 크게 영향을 받는데[4], 그러한 경향은 본 연구에서도 Fig. 5에서처럼 확인되고 있다. 따라서 chunky 흑연이 발생하는 지역은 인장강도와 연신율과의 일정한 밸런스가 맞지 않음으로써 후육 구상흑연주철 부품소재의 신뢰성을 떨어뜨리고 동작특성 및 피로수명을 단축시키는 경향이 있다[5].

4.2 후육주철 응고시 냉각속도의 영향

본 실험결과에 의해서 냉금을 사용하지 않은 No.1 조성 잉고트의 경우에는 수축공 결함이 발생되었고, 미세조직의 경우에는 chunky 흑연 등 이상흑연이 발생하였지만, 냉금을 사용한 No.2, No.3, No.4의 잉고트에서는 수축공 결함도 억제되고, chunky 흑연의 발생도 효과적으로 억제되는 것을 알 수 있었다. 결국, 후육 주철의 제조에 있어서 냉각속도의 향상이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Chunky 흑연의 발생 기구는 1) 응고중 냉각속도의 저하에 따른 공정 오스테나이트의 성장속도가 흑연립의 성장속도보다 증가하는 현상, 2) 두꺼워진 오스테나이트를 통하는 탄소원자의 확산도 저하, 3) 흑연립 성장에 참여하지 못하게 된 탄소원자들의 오스테나이트 주변에서의 불규칙 집단 응고의 순으로 이해될 수 있다. 따라서 chunky 흑연이 발생한 No.1 잉고트에서는 정상적인 흑연립의 성장이 방해되어 응고시 수반되는 액상수축률을 원활하게 보상해야 할 흑연팽창이 충분히 진행되지 못하여 수축공 결함이 발생하는 것으로 판단된다.

이상과 같이 적정한 주조방안과 함께 응고중 냉각속도를 크게 추가하면 수축공 결함과 chunky 흑연을 동시에 제어할 수 있기 때문에 후육 구상흑연주철 제조공정에서 냉각속도를 증가시키는 방안을 찾는 것은 매우 중요하다. 일반적인 사형주조

공정에서는 냉금을 사용하여 냉각속도를 향상시키는 방안을 사용하지, 특별한 대형 주철제품 제조시에는 물리적으로 냉금을 사용하는 것이 불가능한 경우도 있다. (예: 원심주조법으로 대형 구상흑연주철 클래딩 롤을 제작할 때 등) 따라서, 응고중 냉각속도가 구상흑연주철의 응고거동에 미치는 영향을 이해하고, 각각의 특별한 주조공정에서 각종 주조결함 및 미세조직 제어에 활용하는 것은 매우 중요한 일이다. 냉각속도를 증가시키는 것이 물리적으로 제한적인 주조 품목일 경우에는 특정 냉각속도 하에서의 공정응고 시간을 단축시킬 수 있도록 후속 구상흑연주철용 합금설계, 최적 C.E값 설정, 미량 첨가원소 투입 등 대안을 찾아야 할 것이다.

4.3 동일 CE하에서의 Si 조성의 영향

적정 C.E값 (4.3 근처)에서 Si 조성의 변화에 따른 미세조직의 변화를 알아보기 위하여 본 연구에서는 Si의 함량을 1.80 wt.%에서 2.60 wt.%까지 변화시켰다. Si의 양이 적은 경우와 많은 경우에 대하여 고찰해 보자.

1) Si의 양이 적을 때: No.2 조성 (Si: 1.80 wt.%, C.E: 4.3)의 잉고트

Fig. 8에서 나타난 바와 같이 Si의 양을 1.8 wt.% 정도로 적게 첨가하게 되면 효과적으로 chunky 흑연의 발생을 억제하는 것으로 나타난다. 적은 양의 Si 원소가 있을 경우에는 같은 탄소 당량 하에서 탄소농도가 높아지는 것을 의미하고, 공정응고 도중 오스테나이트와 흑연립과의 성장속도 차이를 효과적으로 감소시켜, 오스테나이트 결정립을 통해 성장하는 흑연립쪽에서의 탄소원자의 확산이 용이하다. 따라서 chunky 흑연 등 이상흑연의 발생은 현저하게 감소하게 된다. 반면, Fig. 8에서 보는 바와 같이 저 Si 조성의 경우에는 오스테나이트 결정립 주변의 과냉된 지역에서 흑연 조장화 원소인 Si 역할의 한계로 인해 흑연의 생성 대신 펄라이트 (Fe₃C + 페라이트)의 생성이 촉진된다. 결론적으로 Si의 함량이 적게 되면, chunky 흑연의 발생은 효과적으로 억제하지만, 기지조직의 페라이트 분율은 감소하며 펄라이트 생성으로 기계적 성질이나 가공성 등을 해치게 된다. 실제로, Figs. 11-13에 정리한 제반 기계적 성질을 비교·평가해 보면 펄라이트 기지 구상흑연주철의 한계를 알 수 있다. 한편 주방 상태에서 생성된 펄라이트를 열처리로 분해하는 데에는 많은 어려움이 있으며 산업적으로도 추가 비용이 많이 발생하여 바람직하지 않다.

2) Si의 양이 많을 때: No. 4 조성 (Si: 2.60 wt.%, 50 ppm Sb 첨가, CE:4.3)

Fig. 8의 조직사진에서 알 수 있듯이, No.3 조성 과 No.4 조성처럼 Si의 양을 증가시키면, 기지조직은 페라이트로 안정화하여 잉고트 내부까지 역 철에 의한 백선화나 펄라이트의 생성을 억제할 수 있다. 따라서 고 Si 함량의 구상흑연주철의 기지조직은 페라이트의 분율이 높게 된다. 이 때 주의할 사항은 Si의 영향으로 흑연화는 조장되지만, 후속 주물일 경우에는 위에서 설명한 이유로 chunky 흑연의 발생이 쉽게 일어나기 때문에 Sb 등과 같은 미량 첨가원소를 투입하여 chunky 흑연을 제어하게 된다. 결론적으로 페라이트 기지 안정화를 위하여 Si의 함량은 일정치 이상이어야 하며, 이 때 발생하기 쉬운

chunky 흑연은 미량 첨가원소로 제어해야 한다는 것을 제안할 수 있다. Figs. 11-13에 정리된 각종 기계적 성질 평가내용을 보면, 페라이트 기지조직에 chunky 흑연이 제어된 No.3, No.4 조성의 경우에 기계적 성질이 향상된다는 것을 확인할 수 있다.

4.4 Bi 및 Sb 첨가의 영향

1) Bi 첨가 영향

50 ppm Bi가 첨가된 No.3 잉고트의 경우, 1/6 T 지점인 잉고트 표면 부위에서는 매우 미세한 흑연립이 잘 발달되어 있으나, 2/6, 3/6 T 등 잉고트의 중심부로 내려올수록 결정립 미세화 효과는 거의 없는 것으로 판단된다. (Fig. 8 조직사진 참조) 이는 냉각속도가 낮은 잉고트 중심부에서의 Bi 첨가의 결정립 미세화 효과가 현저히 떨어지는 것을 의미한다. 또한 미량 첨가원소 무첨가의 경우나 Sb 첨가의 경우에 비해 흑연립의 구상화율이 떨어지는 것으로 나타났다. (Fig. 8, Fig. 9 참조) Bi 등 각종 미량 첨가원소가 흑연립의 성장기구와 형상에 미치는 연구는 향후 진행되어야 할 사항이다.

2) Sb 첨가 영향

50 ppm Sb이 첨가된 No.4 잉고트를 Bi가 첨가된 No.3 잉고트와 비교해 보면, 조직의 균일성 (Fig. 8 참조), 흑연 결정립의 기하학적 특성 (Fig. 9 참조), 각종 기계적 성질 (Figs. 11-13 참조) 등에서 우위에 있음을 알 수 있다. 특히 50 ppm 정도의 소량 첨가로 chunky 흑연을 효과적으로 잘 억제하고 있으며, 우수한 기계적 성질을 확보하고 있다는 것을 알 수 있다. Sb의 chunky 흑연 방지 기구, Sb 조성 최적화 등에 관한 연구는 체계적으로 진행되어야 할 사항이다.

4.5 250 mm급 후속 주철의 주조변수 최적화

냉금 사용, 적정 Si 함량, Sb 첨가가 후속 구상흑연주철의 기계적 성질에 미치는 영향을 종합적으로 Fig. 15에 정리하였다. 냉금을 사용하지 않은 잉고트 (No.1)에 비해 인장강도와 항복강도의 향상 정도는 크지 않으나, 연신율과 충격치는 획기적으로 개선되는 것으로 나타난다. 본 논문에서 알 수 있듯이 우수한 특성의 후속 구상흑연주철 주조를 위해서는 1) 무압탕 방안 등 적정 주조방안 설정, 2) 후속 주물의 냉각방안 확보, 3) Si 조성 최적화, 4) 미량 원소 첨가 최적화 등이 중요 고려 대상이다. 또한 선철, 강고철 등 장입재의 조성 안정성 및 불순물 제어, 접종제와 구상화제의 올바른 분석 및 바른 사용, 주입온도 및 공정응고 시간 제어 등도 필수적으로 연구·개발되어야 하는 사항이다. 본 연구에서 검토한 4종의 조성에 대한 250 mm급 후속 구상흑연주철 주조 실험의 개요 및 주요 결과를 요약하여 Table 4에 나타내었다. 이러한 실험을 통하여 획득한 기초 자료는 향후 후속 구상흑연주철의 상업적 생산 기술을 정립하는데 사용될 수 있다.

5. 결 론

한 번의 길이가 250 mm인 정용면체 괴상의 후속 구상흑연주철을 시험 주조하였고, 수축공 결함이나 이상 흑연의 생성을

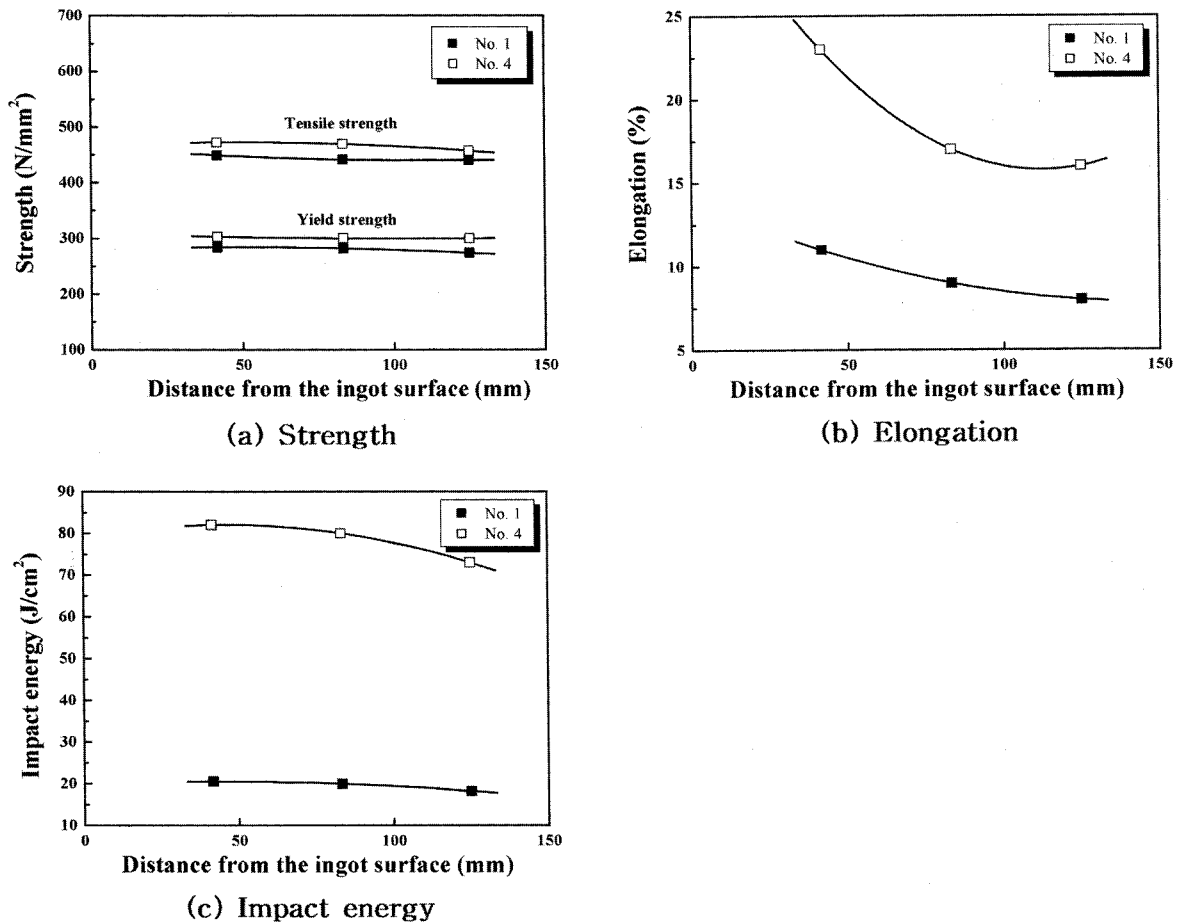


Fig. 15. Improvement of various mechanical properties of heavy walled ductile cast iron with the addition of Sb.

Table 4. Summary of microstructural and mechanical properties of 4 experimental casting runs

	Composition	Cooling Condition	Composition Feature	Ingot Feature	Estimate
No.1	CE=4.29 Si: 2.30	without chilling	standard composition	<ul style="list-style-type: none"> shrinkage defects formation chunky graphite formation ferritic matrix bad elongation and impact properties 	improper condition for heavy section ductile cast iron
No.2	CE=4.30 Si: 1.82	chilling	low Si composition	<ul style="list-style-type: none"> sound heavy section ingot nomal graphite nodule excellent nodularity pearlite volume fraction in central area = 31% degradation of mechanical properties of central area 	pearlitic matrix formation problem due to low Si content
No.3	CE=4.29 Si: 2.45 Bi addition (50 ppm)	chilling	high Si composition (evaluation of Bi effect)	<ul style="list-style-type: none"> sound heavy section ingot nomal graphite nodule slight deterioration of nodularity ferritic matrix large variation of mechanical properties with thickness 	difficulties of precise microstructural control owing to the grain coarsening and interior nodularity
No.4	C.E.=4.28 Si: 2.41 Sb addition (50 ppm)	chilling	high Si composition (evaluation of Sb effect)	<ul style="list-style-type: none"> sound heavy section ingot nomal graphite nodule nodularity excellence ferritic matrix good mechanical properties 	optimized casting condition within the present experimentation

억제할 수 있도록 주조 변수를 최적화 하였으며, 응고도중 냉각조건, Si 함량 변화, Bi와 Sb의 첨가 영향 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 250 mm급 후육 구상흑연주철을 무압탕 방안으로 주조시, 냉금을 사용하여 수축공 결함과 chunky 흑연의 발생을 억제할 수 있었다.

2) 적정 C.E하에서는 Si의 함량이 적을수록 chunky 흑연은 효과적으로 억제되나, 기지조직의 페라이트 분율이 떨어지기 때문에, Si함량을 증가시켜 페라이트 기지조직을 안정화시켜야 하는데, Si 함량이 증가하면 chunky 흑연화 경향이 증가한다.

3) Bi 첨가는 잉고트 표면부의 결정립 미세화에는 우수한 특성을 가지나 잉고트 내부에서는 흑연 결정립이 조대화 되며, 구상화를 저하 등의 문제가 있어 추천할 만하지 못 하다.

4) 고 Si 조성의 용탕에 소량의 Sb 첨가에 의해 페라이트 기지를 유지하면서도 효과적인 chunky 흑연 억제를 할 수 있었고, 흑연립의 기하학적 형상도 우수한 특성을 가질 수 있었으며, 기계적 특성도 우수한 것으로 평가되었다.

5) 공정응고 시간의 단축, Si 첨가량 적정화, Sb 첨가 등의 처방을 통하여 250 mm급 후육 구상흑연주철을 제조할 수 있었고, 우수한 미세조직과 기계적 성질을 확보할 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Kanno: J. JFS, "Abnormal Graphite in Spheroidal Graphite Cast Iron", 76 (2004) 130-134.
- [2] R. K. Buhr: AFS Transactions, "Vermiculite Graphite Formation in heavy Section Nodular Iron Castings", 76 (1968) 497-503.
- [3] R. Barton: Foundry Trade Journal, "Nodular Iron Possible Structural Defects and Their Prevention", 155 (1983) 40-53.
- [4] Y. Hidehira and T. Nishimura: IMONO "Abnormal Structure of the heavy Section Spheroidal Graphite Cast Iron", 57 (1985) 255-256.
- [5] A. Taio and Y. Tetsuya: Reports of the 142th JFS Meeting (1989) 55-62.
- [6] H. Nakae and H. Shin: Proc., SCaS, "Formation Mechanism of Chunky Graphite", (2001) 336-343.
- [7] H. Nakae, H. Shin, M. Hara, and Y. Harada: J. JFS, "Influence of Si and Cooling Rate on Chunky Graphite Formation", 75 (2003) 337-343.
- [8] E. Campomanes: Giesserei, "The Suppression of Graphite Deterioration in Heavy Ductile Iron Castings", 65 (1978) 535-540.
- [9] R. C. Vogit: Proc. 57th W.F.C "Fracture of Cast Irons" (1990) Paper No.5.
- [10] R. C. Vogit and L. Eldoky: Proc. 53th W.F.C "Fracture of Ductile Cast Irons", (1986) Paper No.17.