

論文

고규소 내열 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 주조 변수의 영향

조웅제 * · 권해욱 † · 서갑성 **

Effect of Casting Variable on the Fluidity of High-Silicon Heat-Resistant Ductile Cast Iron Melt

Woong-Che Cho*, Hae-Wook Kwon[†] and Gap-Sung Seo**

Abstract

The effect of casting variable on the fluidity of high silicon, especially hypereutectic, heat-resistant ductile cast iron melt was investigated. When pouring temperature and silicon content were constant, that was increased with carbon content. When the pouring temperature and carbon content were constant, that also increased with the silicon content. Even though these results were thought to be caused by the high heat of fusion evolved during the crystallization of proeutectic graphite nodules, further research seemed to be needed. The fluidity for taller sprue was higher than that for smaller one.

Key words : Fluidity, Fluidity of cast iron melt, High silicon cast iron, Ductile cast iron

(Received April 9, 2004; Accepted August 5, 2004)

1. 서 론

고합금 흑연 주철은 내식성 또는 강도 및 고온 내산화성 등이 요구되는 특별한 경우에 사용된다. 특히 4~6%의 규소를 함유하고 있는 흑연 주철은 값이 싸고 고온에서 사용할 수 있는 좋은 재료이다. 이와 같은 주철은, 회주철이든 구상 흑연 주철이든, 내산화성이 좋고 900°C 의 온도에 이르기까지 안정한 폐라이트 기지가 잘 유지된다. 규소는 표면에 규산염 형태의 치밀한 산화막을 형성하기 때문에 고온에서 산화 속도를 크게 감소시킨다. 이 산화물 층은 산소의 침투에 대한 저항이 매우 크다[1].

구상 흑연 주철이 개발된 후, 고규소 구상 흑연 주철이 개발되어 그 생산량은 크게 증가하였다. 공정 편상 흑연 네트워크를 고립된 구상 흑연으로 변화시켜 내

산화성을 더욱 증가시켰다. 고규소 구상 흑연 주철은 강도가 더 높고 연성이 더 커서 더욱 사용 조건이 가혹한 경우에도 사용할 수 있다. 규소의 함량은 4%까지 증가시키면 Al 온도가 815°C까지 증가한다[1]. 특히 3.0%C, 4.0%Si 및 0.04%Mg 조성의 고규소 내열 구상 흑연 주철은 배기부 매니폴더, 터보 차저 및 배기부 파이프 등의 자동차 부품, 밸브 및 플랜지의 재료로 많이 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 제품을 주조한 경우에 고규소 내열 구상 흑연 주철 용탕의 유동도가 문제가 되어 미쓰런이나 콜드샥과 같은 주조 불량이 자주 발생한다.

미쓰런은 용탕이 주형 공간내에서 도달하지 못하여 주조품의 일부분이 없는 주조 결함으로 인게이트로부터 멀리 떨어진 부분이나 상형의 표면에서 주로 발생한다[2,3]. 특히 주입 온도가 부적절하고 용탕의 유동

영남대학교 재료금속공학부(School of Mat. Sci. & Eng. Yeungnam University, Kyungsangbukdo 712-160, Korea)

*영남대학교 대학원(Graduate School, Yeungnam University, Kyungsangbukdo 712-160, Korea)

**대한특수금속주식회사(Daehan Special Metal Co., Ltd., Kyungsangbukdo 717-702, Korea)

[†]E-mail : hwkwon@yumail.ac.kr

도가 불충분하거나 주조품의 두께나 형상을 고려할 때 상대적으로 주입구의 치수나 위치가 부적절한 경우에 나타난다. 콜드셋은 둥근 모서리를 가진 갈라진 틈 형태의 주조 결함으로 모양이 독특하고 깊이가 다양하며 주조품 벽의 일부 또는 전체에 걸쳐서 나타난다[3]. 이 경우에도 벽 두께가 얕아서 용탕 충진이 어려운, 두께에 비하여 표면적이 비교적 큰 주조품의 표면에 나타나며 용탕이 주형 공간의 양쪽에서 주입될 때 형성한다. 유동도가 불충분하거나 주입 속도가 느려서 용탕 주입이 일시적으로 끊어지거나 하여 용탕 표면이 산화되었을 때 나타난다. 이와 같은 결함의 경우 유동도를 증가시켜 해결할 수 있을 것이다.

초정상이 수지상으로 형성하여 성장하는 일반적인 주조용 합금 용탕의 유동도는 응고 범위(freezing range)가 감소할수록 그리고 과열(super heat)이 증가할수록 유동도는 증가한다는 사실은 잘 알려져 있다. 과공정 조성의 구상 흑연 주철은 초정상이 수지상이 아닌 구상 흑연이며 이 용탕의 유동도 특히 4~6%의 규소를 함유하고 있는 과공정 조성의 고규소 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 주조 변수의 영향에 관한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 2.80~3.40%C, 3.60~4.50%Si, 0.40~0.70%Mn 및 0.03~0.07%Mg 조성의 고규소 내열 구상 흑연 주철, 특히 과공정 조성 영역에서의, 용탕의 유동도에 미치는 화학적 조성 및 탕구의 높이 등 주조 변수의 영향을 조사하여 주조 결함에 의한 불량 발생을 방지하기 위한 기초 자료를 얻었다.

2. 실험 방법

2.1 용해 및 용탕 처리

마그네시아 내화물을 라이닝한 유도 코일을 장착시킨 75 kW 용량의 유도 용해로를 이용하여 용해하였다. 주물선과 강고철을 사용하여 장입량을 결정하였으며 사

용한 주물선과 강고철의 화학적 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 고규소 구상 흑연 주철의 유동도에 미치는 탄소 함량의 영향을 조사하기 위한 두 번째 용해의 경우를 제외하면, 탄소의 목표 조성을 3.20%로 일정하게 하였다. 두 번째 용해에서는 Table 2에서 보이는 바와 같은 사양상 허용 범위인 2.80~3.40%C의 범위에서 0.2% 간격으로 변화시켰다.

용탕을 얻은 후 규소의 함량을 증가시키기 위하여 규소의 함량이 76.37%인 지름 2~4 mm 크기의 입자형 페로실리콘을 첨가하였으며 화학적 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 고규소 구상 흑연 주철의 유동도에 미치는 규소 함량의 영향을 조사하기 위한 세 번째 용해의 경우를 제외하면, 규소의 최종 목표 함량을 4.0%로 일정하게 하였다. 5%Mg-Fe-Si 구상화제를 첨가하여 용탕을 구상화 처리하였을 때의 규소의 함량 증가를 고려하여 구상화 처리하기 전의 규소 함량을 2.76%로 일정하게 하였다. 세 번째 용해시에는 Table 2에서 보이는 바와 같은 사양상 허용 범위인 3.60~4.50%의 범위 내에 포함되는 3.60~4.40%의 범위에서 0.4% 간격으로 변화시켰다. 최종 목표 규소 함량이 각각 3.60 및 4.40%인 두 가지 경우에 구상화 처리 전의 규소 함량이 각각 2.36 및 3.16%가 되게 페로실리콘을 첨가하였다.

규소 함량을 조절하기 위하여 페로실리콘을 첨가한 후 R-형태의 열전대를 사용한 침적식 온도계로 용탕의 온도를 측정하였다. 용탕의 온도가, 유동도에 미치는 주입 온도의 영향을 시험하기 위한 첫 번째 용해 시를 제외하고, 1,550°C에 도달하였을 때 5%Mg-Fe-Si 구상화제를 사용하여 용탕을 구상화 처리하였으며 구상

Table 2. Chemical analysis of specification for high silicon ductile cast iron.(wt%)

	C	Si	Mn	Mo	Mg	remark
	2.80	3.60	0.60	0.40	0.30	
	~3.40	~4.50	max.	~0.70	~0.07	

Table 1. Chemical analyses of raw materials.(wt%)

Material	Elements								remark
	C	Si	Mn	Mg	Mo	Ca	Al	P	
pig iron	4.38	1.62	0.32	-	-	-	-	0.10	0.02
steel scrap	0.01	0.005	0.72	-	-	-	-	0.01	0.006
Fe-75%Si	-	76.37	-	-	-	1.0 max.	1.0 max.	-	-
5%Mg-Fe-Si	-	44.38	-	5.18	-	1.69	0.92	-	-
Fe-62%Mo	-	0.72	-	-	62.7	-	-	0.034	0.10

화제의 화학적 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 직경이 2~4 mm 크기인 입자 형태의 구상화제를 알루미늄 포일로 쌈 다음 플런저에 장착시킨 후 유도로의 용탕 속으로 플런징하여 구상화 처리하였다. 첫 번째 용해에서는 주입 온도보다 50°C 높은 온도에서 구상화 처리하였으며 주입 온도를 1,400~1,550°C의 범위에서 50°C 간격으로 변화시켜 주입하였다.

용탕을 구상화 처리한 후 용탕의 규소 함량을 0.3% 증가시키는 방법으로 Table 1에서 보이는 바와 같은 화학적 조성의, 2~4 mm 크기의 입자형 Fe-75%Si 접종제를 사용하여 후접종 처리하였다. 그리고 용탕의 몰리브덴 함량을 0.50%로 증가시키기 위하여 Table 1에서 보이는 바와 같은 조성의 Fe-62%Mo 페로몰리브덴 함금철을 첨가한 후 용탕의 온도가 원하는 온도가 되었을 때 먼저 화학적 성분 분석용 칠 시편을 얻기 위한 금형에 용탕을 주입한 후 유동도 측정용 주형에 주입하였다.

2.2. 유동도 측정

고규소 구상 흑연 주철의 유동도를 측정하기 위하여 표준 유동도 스파이럴 금형(standard fluidity spiral pattern)을 이용하여 유동도 측정용 주형을 생형으로 조형하였으며 그 개략적인 모양을 Fig. 1에서 보이는 바와 같다[4,5]. 용해 및 용탕 처리한 후 용탕의 온도가 원하는 온도에 도달하였을 때 주입하였다. 각 조건에 대하여 3차례 주입하여 세 개의 유동도 시험 주조품을 얻어 탈사한 후 유동도 스파이럴 길이를 측정하여 얻은 세 값의 평균값을 얻었다.

첫 번째 용해에서는 고규소 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 주입 온도의 영향을 시험하였다. 주입 온도를 1,400~1,550°C의 범위에서 50°C 간격으로 변화시켰다. 이때 용탕의 탄소, 규소 및 잔류 마그네슘 함량은 각각 3.20, 4.00 및 0.04%로 일정하게 하였다.

두 번째 용해에서는 유동도에 미치는 탄소 함량의 영향을 시험하였다. 탄소의 함량을 2.80~3.40 범위에서 0.20% 간격으로 변화시켰으며 1,500°C의 온도에서 용탕을 주형에 주입하였다. 이때 용탕의 규소 및 마그네슘 함량을 각각 4.00 및 0.04%로 일정하게 하였다.

세 번째 용해에서는 유동도에 미치는 규소 함량의 영향을 시험하였다. 규소의 함량을 3.60~4.40% 범위에서 0.4% 간격으로 변화시켰으며 주입 온도는 1,500°C 였다. 이때 탄소의 함량을 3.20%로 일정하게 하였다.

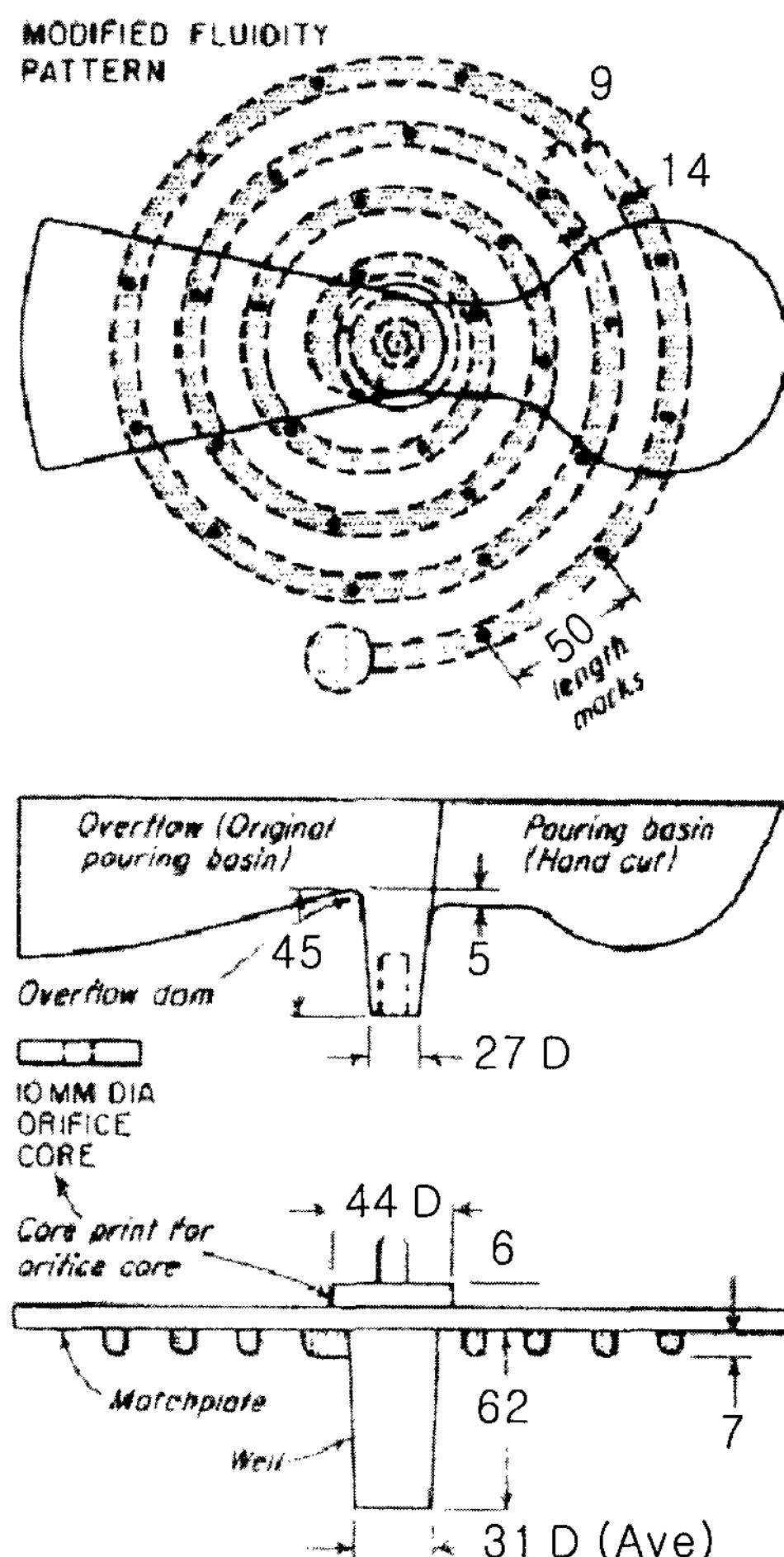


Fig. 1. Fluidity-spiral pattern.[4,5]

네 번째 용해에서는 탕구 높이의 영향을 시험하였다. 표준 유동도 스파이럴 시험용 주형의 경우 탕구의 높이는 55 mm였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같은 표준 유동도 스파이럴 금형을 이용하여 상형과 하형사이에 높이 85 mm의 주형 상자를 끼워 넣어 탕구 높이를 140 mm가 되게 하여 조형한 후 주입하여 얻은 유동도 시험 결과를 상형과 하형만으로 조형한 주형에 주입하여 얻은 결과와 비교하였다. 이때 용탕의 화학적 조성은 3.20%C, 4.00%Si 및 0.04%Mg로 그리고 주입 온도는 1,500°C로 하였다.

3.3 화학적 성분 분석 및 미세 조직 검사

모든 조건의 시험 주조품의 경우 화학적 조성이 고규소 구상 흑연 주철의 사양 범위와 목표 조성을 벗어

나지 않는지의 여부와 전형적인 미세 조직을 가지는지의 여부를 확인하기 위하여 화학적 성분 분석과 미세 조직 검사를 하였다. 각 시험 주조품의 주입시 얻은 화학적 성분 분석용 시편을 60번 등급의 연마지로 조연마한 후 방출 스펙트럼 분석 장치(emission spectrometer)로 분석하였다. 주입한 용탕이 응고되고 완전히 상온으로 냉각된 후 탈사하여 얻은 유동도 시험용 주조품으로부터 얻은 하부 직경과 높이가 각각 31.8 및 63.5 mm인 웰(well)부분의 가운데를 절단하여 미세 조직 검사용 시편을 얻었다. 가로, 세로 및 높이가 각각 20, 15 및 5 mm 크기의 시편을 마운팅하고 조연마한 후 1 μm 등급의 다이아몬드 페이스트로 세연마하여 광학 현미경으로 관찰하였다. 화상 분석 장치를 이용하여 부식시키지 않은 상태에서 구상화율과 단위 면적당 구상 흑연의 수를 측정하고 부식시킨 후 기지 조직의 페라이트와 펠라이트의 비율을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 화학적 조성과 미세 조직

각 시험 조건별로 주입하여 세 개의 주조품을 얻었으며 각 경우의 화학적 조성 분석용 시편을 얻어 분석하였다. 대표적인 화학적 조성 분석 결과는 Table 3에서 보이는 바와 같다. 탄소 함량의 경우, 2.80~3.40% 범위에서 0.2% 간격으로 변화시켜 고규소 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 탄소 함량의 영향을 시험한 두 번째 용해의 경우를 제외하면, 3.18~3.25%

범위인 것으로 나타났다. 3.20%인 목표 조성과 크게 차이가 나지 않았다. 두 번째 용해의 경우에는 목표 조성 2.80, 3.00, 3.20 및 3.40 인 네 가지 주조품에 대하여 각각 2.78, 3.06, 3.21 및 3.39%로 나타나 목표 조성과 차이가 그리 크지 않았다.

규소 함량은 3.60~4.40% 범위에서 0.4% 간격으로 변화시킨 세 번째 용해의 경우를 제외하면, 3.91~4.13%의 범위 내에 있어 목표 조성인 4.0%와 크게 차이가 나지 않았다. 세 번째 용해시 목표 조성이 3.60~4.40% 범위에서 0.40%간격인 세 가지 주조품에 대하여 3.66, 4.08 및 4.37%로 나타나 목표 조성과 차이가 크지 않았다. 그리고 몰리브덴과 마그네슘 함량은 각각 0.42~0.54% 및 0.04~0.05% 범위내에 있어 사양상 허용 범위 내에 있다. 따라서 모든 경우에 목표 조성과 차이가 크지 않으며 유동도에 미치는 화학적 조성 및 다른 변수의 영향을 분석하는데 문제가 없는 것으로 판단되었다.

모든 시험 주조품의 미세 조직이 고규소 구상 흑연 주철의 전형적인 미세 조직인지의 여부와 유동도에 미치는 다른 변수의 영향을 시험하기 위하여 얻은 자료의 신뢰성을 확인하기 위하여 모든 시험 주조품의 미세 조직을 관찰하였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같은 모양의 유동도 스파이럴 주조품 중 웰(well)부분의 가운데의 조직을 광학현미경으로 관찰하였으며 그 결과 얻은 구상화율과 단위 면적당 구상 흑연의 수는 각 시험 조건별로 Table 4~7에서 각각 보이는 바와 같다. 구상화율, 단위 면적당 구상 흑연의 수 그리고 기지조

Table 3. Chemical analyses and pouring temperatures of test castings.

Heat No. (variable)	C	Si	Mn	Mo	Mg	P	S	C. E.	pouring temperature(°C)	remark
I (pouring temp., °C)	1,400	3.18	4.04	0.33	0.47	0.05	0.09	0.02	4.52	1,406
	1,450	3.19	3.91	0.34	0.50	0.04	0.09	0.02	4.49	1,447
	1,500*	3.21	4.08	0.34	0.54	0.04	0.09	0.02	4.57	1,499
	1,550	3.21	4.07	0.30	0.55	0.04	0.09	0.02	4.56	1,550
II (%C)	2.80	2.78	4.03	0.28	0.51	0.04	0.07	0.02	4.12	1,502
	3.00	3.06	4.13	0.30	0.49	0.05	0.09	0.02	4.43	1,500
	3.40	3.39	4.01	0.31	0.49	0.04	0.09	0.02	4.72	1,498
III (%Si)	3.60	3.25	3.66	0.31	0.52	0.04	0.09	0.02	4.47	1,503
	4.40	3.18	4.37	0.31	0.42	0.05	0.08	0.02	4.63	1,501
IV (sprue ht., mm)	140	3.19	4.00	0.34	0.54	0.04	0.09	0.02	4.52	1,497

*The result of this casting was used for the conditions of 3.20%C, 4.00%Si and 55 mm of carbon, silicon contents and sprue height, respectively, to compose with those in next three heats.

Table 4. Effect of pouring temperature on the fluidity of the high silicon ductile cast iron melt and microstructural analysis result.

Pouring Temperature(°C)		Fluidity Spiral Length (mm)	Graphite		Matrix (% ferrite*)	Remark
aim	actual		Nodularity (%)	Nodule Count (/mm ²)		
1,400	1,406	787	96.0	150	95.7	
1,450	1,447	880	95.0	150	96.5	
1,500	1,499	939	90.0	130	92.2	
1,550	1,550	1,242	93.0	145	98.7	

*The remainder is pearlite.

Table 5. Effect of carbon content on the fluidity of the high silicon ductile cast iron melt and microstructural analysis result.

Carbon Content (°C)		Fluidity Spiral Length (mm)	Graphite		Matrix (% ferrite*)	Remark
aim	actual		Nodularity (%)	Nodule Count (/mm ²)		
2.80	2.78	787	90.0	150	95.6	
3.00	3.06	931	85.0	150	98.9	
3.20	3.21	939	90.0	130	92.2	
3.40	3.39	1,131	90.0	160	98.9	

*The remainder is pearlite.

Table 6. Effect of silicon content on the fluidity of the high silicon ductile cast iron melt and microstructural analysis result.

Silicon Content (°C)		Fluidity Spiral Length (mm)	Graphite		Matrix (% ferrite*)	Remark
aim	actual		Nodularity (%)	Nodule Count (/mm ²)		
3.60	3.66	787	96.0	150	95.6	
4.00	4.08	939	90.0	130	92.2	
4.40	4.37	1,104	89.0	152	93.3	

*The remainder is pearlite.

Table 7. Effect of sprue height on the fluidity of the high silicon ductile cast iron melt and microstructural analysis result.

Sprue Height (mm)	Fluidity Spiral Length (mm)	Graphite		Matrix (% ferrite*)	Remark
		Nodularity (%)	Nodule Count (/mm ²)		
55	939	90.0	130	92.2	
140	1,383	90.0	155	98.9	

*The remainder is pearlite.

직의 페라이트 분률은 각각 85.0~96.0%, 130~160/mm² 그리고 92.2~98.9%의 범위로 나타나 페라이트 기지의 구상 흑연 주철 조직으로 전형적인 고규소 구상 흑연 주철의 조직이었다.

3.2. 유동도에 미치는 주입 온도의 영향

최적 주입 온도를 결정하기 위한 자료를 얻기 위하여 고규소 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 주입 온도의 영향을 시험하였다. 1,400~1,550°C의 범위에서 50°C 간격으로 주입 온도를 변화시켰으며 그 결과는 Table 4 및 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 실제 주입 온도가 1,406, 1,447, 1,499 및 1,550°C로 증가함에 따라 유동도 스파이럴 길이는 787, 880, 939 및

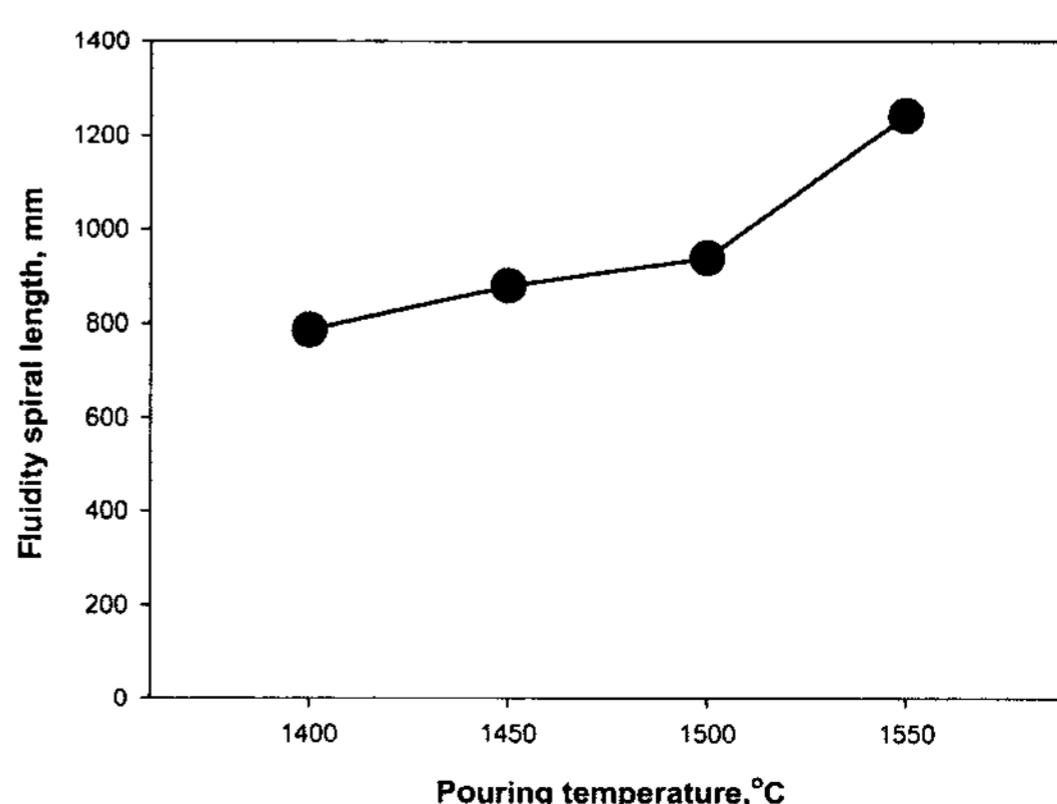


Fig. 2. Effect of pouring temperature on the fluidity of high silicon ductile cast iron melt.

1,242 mm로 각각 나타났으며 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 주입 온도가 증가함에 따라 유동도는 증가하였다.

유동도 시험용 주형에 용탕을 주입하는 동안 용탕은 좁은 채널을 따라 훌러 들어가고 온도가 낮은 주형의 굽냉 효과로 인하여 흐르는 용탕의 끝부분의 온도가 가장 낮을 것이다. 따라서 이 끝부분에서 고체 결정이 핵생성하며 대부분의 고체 결정은 용탕의 흐름을 따라 이동될 것이다. 액상선 온도 이상으로 과열되지 않은 용탕은 주입되자마자 용탕의 끝부분에서 고체상이 핵생성한다. 그러나 용탕의 주입 온도가 높아 액상선 온도 이상으로 과열되면 이와 같은 핵생성은 자연되고 유동도는 증가할 것이다[6,7]. 따라서 주입 온도가 증가함에 따라 유동도는 증가하였을 것이다.

3.3. 유동도에 미치는 탄소 함량의 영향

고규소 구상 흑연 주철 용탕은 유동도에 미치는 탄소 함량의 영향을 시험하기 위하여 탄소 함량을 2.80~3.40% 범위에서 0.2% 간격으로 변화시켰다. 규소 함량은 4.0% 일정하고 각 조건별로 1,500°C에서 주입하였으며 그 결과는 Table 4 및 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 탄소 함량이 2.78, 3.06, 3.21 및 3.39%로 증가함에 따라 유동도 스파이럴 길이는 787, 931, 939 및 1,131 mm로 증가하였다.

이와 같은 결과는 철-탄소-규소 3 원계 합금의 상태도를 고려하여 과열, 응고 범위 및 초정상의 정출 거동 등의 상대적인 영향으로 나타났을 것으로 생각된다 [8,9]. 응고 범위가 작을수록 유동도는 증가한다는 사실은 잘 알려져 있다. 3원계 상태도의 규소 함량이

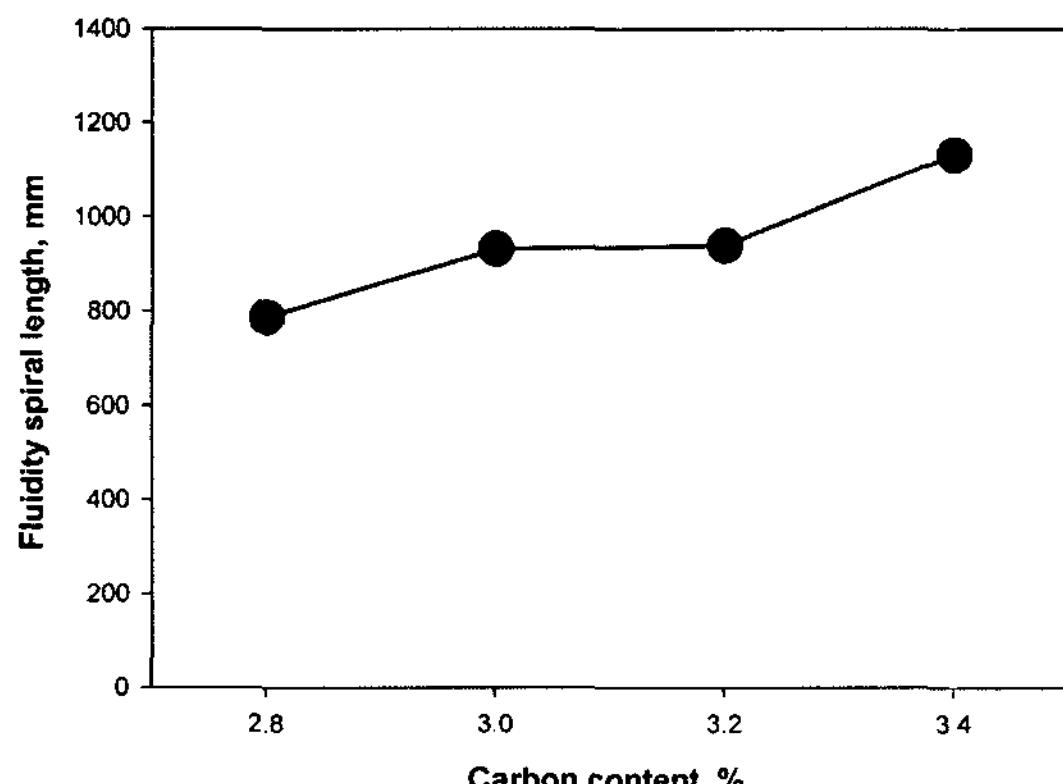


Fig. 3. Effect of carbon content on the fluidity of high silicon ductile cast iron melt.

4.00%일 때의 단면은 Fig. 4에서 보이는 바와 같다 [5]. 탄소 함량이 2.78%일 때에는 탄소 당량이 4.12%로 아공정 조성이고 탄소 함량이 3.06, 3.21 및 3.39%로 증가함에 따라 탄소 당량이 각각 4.43, 4.57 및 4.72%로 과공정 조성 범위에서 증가한다. 주입 온도가 1,500°C 부근에서 거의 일정할 때 탄소 함량이 2.78%에서 3.06%로 증가함에 따라 과열이 증가하고 응고 범위도 감소하였으며 따라서 유동도는 증가하였을 것으로 생각된다.

주입 온도가 1,500°C로 일정할 때 과공정 조성 범위에서는 탄소 당량이 증가함에 따라 액상선 온도도 증가할 것이며 따라서 과열(superheat)의 양은 오히려 감소하고 응고 범위는 증가한다. 응고 범위, 액상선-고상선 온도 차이, 가 졉을수록 유동도는 증가한다는 사실은 잘 알려져 있다. 초정상이 수지상을 형성하여 성장하는 일반적인 경우에는 이 이론으로 잘 설명되나 초정상이 구상의 흑연 입자인, 본 연구에서 얻은 실험 결과는 이 이론으로 설명되지 않는다. 또한, 이들의 영향은 이 정도로 작은 조성의 차이에 의해서는 그리 크

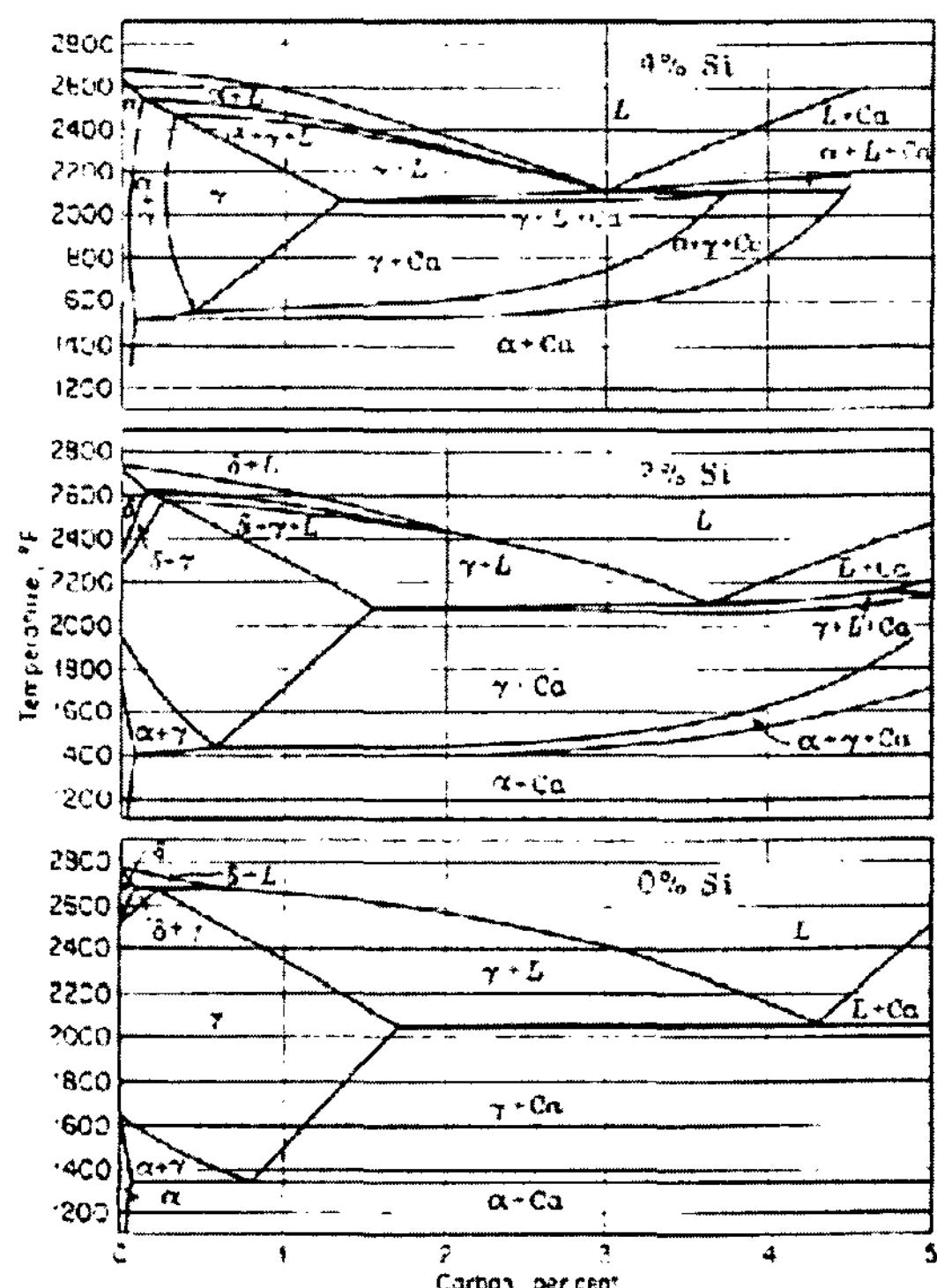


Fig. 4. Sections of the Fe-C-Si ternary equilibrium systems at 0, 2 and 4% Si.[4,5]

지 않을 것으로 생각된다. 과공정 조성의 경우 초정상이 구상 흑연이며 구상 흑연이 정출할 때에 응고 잠열이 방출되어 국부적으로 용탕을 가열하였을 것을 판단된다[9]. 따라서 유동도가 증가하였을 것이며 이 탄소 당량의 범위에서는 과열이나 응고 범위의 영향에 비하여 초정 구상 흑연에 의한 영향이 더 커울 것으로 생각되며 이와 같은 결과에 대하여는 더 연구 검토할 필요가 있다.

3.4. 유동도에 미치는 규소 함량의 영향

고규소 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 규소 함량의 영향을 시험하기 위하여 규소 함량을 3.60~4.40% 범위에서 0.4% 간격으로 변화시켰다. 탄소 함량과 주입 온도는 각각 3.20%와 1,500°C로 일정하게 하였으며 그 결과는 Table 5 및 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 실제 규소 함량이 3.66, 4.08 및 4.37%로 증가함에 따라 유동도 스파이럴 길이는 787, 939 및 1,104 mm로 증가하였다.

규소 함량의 영향을 시험하기 위하여 얻은 세 가지 주조품의 규소 함량이 3.66, 4.08 및 4.37%로 증가함에 따라 탄소 당량은 4.47, 4.57 및 4.63%로 과공정 조성 범위에서 증가하였다. 이 경우에도 규소 함량의 증가에 따른 3원계 상태도의 단면의 변화를 고려하여 과열, 응고 범위 및 초정상인 구상 흑연 등의 상대적인 영향으로 설명할 수 있을 것이다. 규소 함량이 0.00에서 4.00%로 증가함에 따른 3원계 상태도의 단면의 변화는 Fig. 4에서 보이는 바와 같다[4,5]. 규소 함량이 증가함에 따라 공정점의 탄소 함량은 크게 감소

한다. 또한 공정 온도는 증가하나 그 정도는 그리 크지 않다. 따라서 규소 함량이 3.66~4.37% 범위에서 증가함에 따라 주입 온도가 일정할 때 과열은 감소하고 응고 범위는 증가할 것이다. 이 경우에도, 일정한 주입 온도와 규소 함량의 조건에서 탄소 함량의 영향을 시험한 결과에 대한, 앞 절에서 언급한 바와 같이 과열과 응고 범위의 영향으로는 실험 결과가 설명되지 않는다. 이 정도의 범위에서는 그 영향은 그리 크지 않을 것이며 초정 구상 흑연의 정출에 따른 응고 잠열 방출의 영향이 더 커울 것으로 생각된다. 규소 함량이 증가함에 따라 초정 구상 흑연의 수가 증가하고 방출하는 응고 잠열이 증가하여 유동도가 증가하였을 것으로 생각된다. 그러나 이 결과 또한 그 근거를 더 연구 검토할 필요가 있다.

3.5. 유동도에 미치는 탕구 높이의 영향

고규소 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 탕구 높이의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 1에서 보이는 바와 같은 유동도 스파이럴 금형을 사용하고 상형과 하형 사이에 85 mm 높이의 생형사를 다져 넣은 주형 상자를 끼워 넣어 탕구의 높이를 140 mm로 증가시켜 용탕을 주입하였다. 용탕의 탄소 및 규소 함량은 각각 3.20 및 4.00%였으며 주입 온도는 1,500°C였다. 이 경우와 상형과 하형만으로 조형한 주형에 주입하여 얻은 경우와 비교하였으며 그 결과는 Table 6 및 Fig. 6에서 보이는 바와 같다. 탕구 높이가 55에서 140 mm로 증가함에 따라 유동도 스파이럴 길이는 939에서 1,383 mm로 크게 증가하였다.

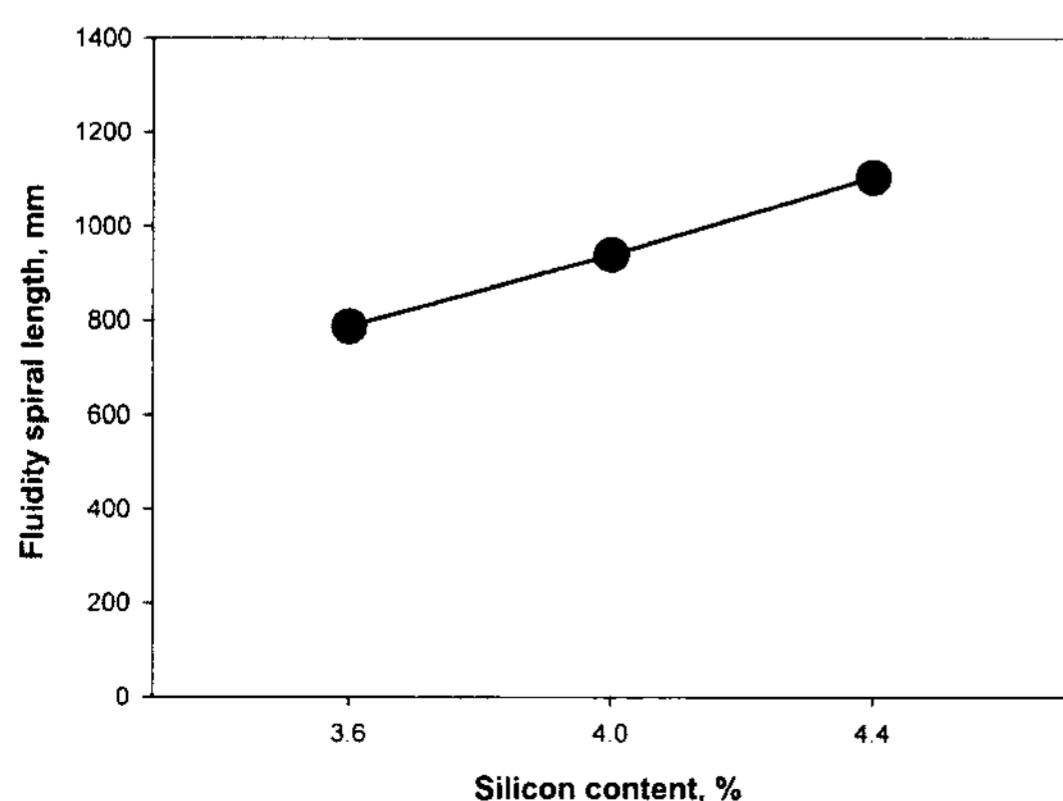


Fig. 5. Effect of silicon content on the fluidity of high silicon ductile cast iron melt.

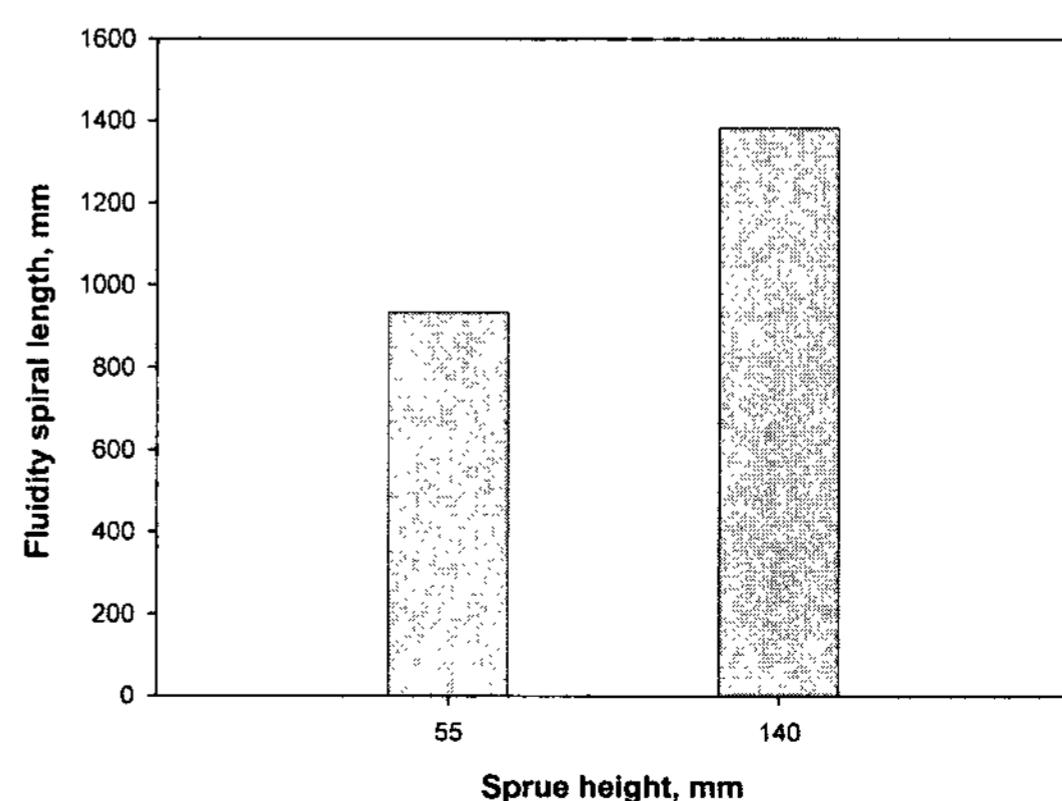


Fig. 6. Effect of sprue height on the fluidity of high silicon ductile cast iron melt.

주형 내의 용탕의 흐름은 베르누이의 정리를 따른다. 이 정리는 위치에너지, 운동에너지, 압력에너지 그리고 마찰에 의한 에너지 손실의 네 가지의 합은 일정하다는 이론이다[10,12]. 탕구의 높이가 증가하면 위치 에너지가 증가하고 따라서 유동도 채널 내에서 용탕 흐름의 속도가 증가하여 유동도가 증가하였을 것이다.

4. 결 론

고규소 내열 구상 흑연 주철 용탕의 유동도에 미치는 여러가지 주조 변수의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 주입 온도와 규소 함량이 $1,500^{\circ}\text{C}$ 와 4.00%로 일정할 때 탄소 함량이 2.80~3.40% 범위에서 증가함에 따라 유동도는 증가하였다.

2) 주입 온도와 탄소 함량이 $1,500^{\circ}\text{C}$ 와 3.20%로 일정할 때 규소 함량이 3.66~4.37% 범위에서 증가함에 따라 유동도는 증가하였다.

3) 다른 주조 변수가 일정할 때 유동도에 미치는 탄소 및 규소 함량의 영향에 관한 결과는 응고 범위 (freezing range 또는 mushy zone)의 영향에 관한 이론으로는 설명되지 않았으며 초정 흑연 입자의 정출시 방출되는 응고 잠열의 영향으로 생각되나 그 근거는 더 연구 검토할 필요가 있다.

4) 탕구의 높이가 140 mm로 큰 경우의 유동도가 55 mm로 작은 경우보다 훨씬 더 컸다

감사의 글

본 연구는 주물기술 산학연 공동연구 기반구축사업 중 2002년도 중소기업 현장 애로기술 지원으로 이루어 졌으면 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Davis et al. ed. : ASM International, "Cast Irons", (1996), 123.
- [2] M. T. Rowley ed. : AFS, "International Atlas of Casting Defects", (1993), 154-161.
- [3] G. W. Anselman et al. ed. : AFS, "Analysis of Casting Defects", 4th ed., (1974), 74-79.
- [4] L. F. Porter and P. C. Rosenthal : Trans. AFS, vol. 60, (1952).
- [5] R. W. Heine, C. R. Loper, Jr. and P. C. Rosenthal : McGraw-Hill, "Principles of Metal Casting", 2nd. ed., (1967).
- [6] M. C. Flemings, E. Niyama and H. F. Taylor : Trans. AFS, vol. 69, (1961) 625-635.
- [7] C. J. Cooksey, V. Kondic and J. Wilcock : The British Foundryman, Sep. (1959) 381.
- [8] C. R. Loper, Jr. : Trans. AFS, vol. 100, (1992) 533-538.
- [9] J. M. Kim : M. S. Thesis, University of Wisconsin-Madison, "Effects of Solidification Mechanism on the Fluidity of Al-Si Casting Alloys", (1994).
- [10] M. J. Berger and C. Locke : Foundry, vol. 79, Feb.(1951) 112.
- [11] J. F. Wallace and E. B. Evans : Trans. AFS, vol. 65, (1957) 267.