

論 文

CV흑연생성에 미치는 인(P) 및 보론(B) 첨가의 영향

박 흥 일*, 김 명 호**, 김 영 흥**

The Effects of Phosphorus and Boron Additions on the Formation
of Compacted Vermicular Graphite Structure

Heung-II Park*, Myung-Ho Kim**, Young-Hong Kim**

Abstract

The effects of phosphorus and boron additions and isothermal holding time on the residual magnesium and sulfur content, and on the resultant graphite structure of cast irons were investigated.

The effective recovery ratio of magnesium showed that adding phosphorus to the melt retarded the fading rate of magnesium but adding boron accelerated it. However, the residual sulfur content was found to be decreased with isothermal holding time at the begining, and then to be increased again with holding time by resulfurization. The Mg-Equivalent for producing compacted vermicular graphite structure was found to be increased with the addition of phosphorus, whereas to be decreased with the addition of boron.

1. 서 론

현재 널리 실용화 되고 있는 선박용 실린더 라이너 소재는 거의 대부분이 주철이며¹⁾, 주철이 충분한 기계적 성질을 갖지 못함에도 불구하고 실린더 라이너 소재로서 중요한 위치를 차지하고 있는 것을 P를 0.2-0.7% 정도 첨가하면 경질상인 공정인화물이 생성되므로 용이하게 내마모성을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라, 윤활성이 풍부한 흑연이 존재하기 때문에 불충분한 윤활조건하에서나 무윤활에 가까운 상황하에서도 자기윤활성을 발휘하기 때문이다²⁾. 그러나 공정인화물량이 많아지면 미세수축공(shrinkage porosity)의 발생율이 높아져^{3~5)} 강도적인 취약점이 나타나므로, 내마모성의 저하 없이 P의 첨가량을 낮추려는 연구가 널리 진행되고 있으며, 그 대표적인 예가 고인주철에 V, Ti, Cr, Mo, Cu, B 등을 첨가한 내마모용 합금주철의 개발이다^{2,6)}.

본 연구에서는 현재 실용화되고 있는 편상흑연주철제 실린더 라이너 소재보다 강도가 높으면서 내마모성도 우수한 새로운 CV흑연주철 소재의 개발 가능성을 조사하기 위하여 P 및 B가 첨가된 용탕을 Fe-45%Si-5%Mg계 흑연구상화제로 처리하고, 이들 각각의 용탕을 일정온도로 유지하면서 holding time에 따른 화학성분과 흑연조직의 변화를 고찰하여 CV흑연생성에 미치는 P 및 B 첨가의 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

목표성분의 용탕을 준비하기 위하여 원료선(sorel metal)과 합금철을 유도용해로(3KHz, 25kgs)에 장입하여 대기중에서 용해하였다. 이 때 사용한 내화물은 마그네시아 도가니이다.

각각의 용탕, 즉 base melt에 P가 0.2% 단독 첨가된 용탕, P와 B가 0.2% 및 0.035% 복합 첨가된 용탕, B가 0.035% 단독 첨가된 용탕들을 1500°C에

*창원기능대학 금속학과(Changwon Industrial Masters' College)

**울산대학교 공과대학 금속공학과(University of Ulsan)

Table 1. Chemical analysis of specimens, wt.%

Heat A (Base melt)

Holding time(min)	Chemical composition							Graphite morphology
	C	Si	Mn	P	S	B	Mg	
0	4.05	1.64	0.67	0.0319	0.0066	-	0.0327	N
1	4.00	1.64	0.66	0.0315	0.0054	-	0.0303	N
2	4.04	1.62	0.66	0.0323	0.0064	-	0.0315	N
3	3.96	1.61	0.65	0.0321	0.0040	-	0.0217	N
4	4.00	1.62	0.68	0.0327	0.0051	-	0.0265	N
5	4.00	1.61	0.65	0.0308	0.0032	-	0.0247	N
6	3.96	1.63	0.67	0.0327	0.0042	-	0.0242	N
7	3.94	1.60	0.63	0.0280	0.0009	-	0.0206	N
8	3.99	1.60	0.66	0.0319	0.0017	-	0.0208	N
9	3.99	1.61	0.66	0.0315	0.0017	-	0.0169	N
10	4.07	1.59	0.66	0.0327	0.0025	-	0.0179	N+CV
11	3.99	1.61	0.66	0.0330	0.0023	-	0.0179	N+CV
12	4.03	1.58	0.66	0.0317	0.0014	-	0.0135	N+CV
13	3.99	1.60	0.65	0.0312	0.0018	-	0.0144	N+CV
14	4.03	1.61	0.66	0.0334	0.0022	-	0.0126	CV
15	4.01	1.59	0.65	0.0318	0.0019	-	0.0123	CV
16	4.03	1.58	0.67	0.0326	0.0033	-	0.0124	CV
17	3.94	1.58	0.65	0.0315	0.0014	-	0.0102	CV
18	3.94	1.59	0.64	0.0308	0.0011	-	0.0097	CV
19	4.03	1.58	0.67	0.0342	0.0027	-	0.0092	CV
20	4.06	1.58	0.67	0.0346	0.0036	-	0.0084	CV

* N : nodular graphite

CV : compacted vermicular graphite

F : flake graphite

Heat B (Base melt containing 0.2%P)

Holding time(min)	Chemical composition							Graphite morphology
	C	Si	Mn	P	S	B	Mg	
0	3.74	1.61	0.70	0.1744	0.0110	-	0.0365	N
1	3.64	1.58	0.66	0.1588	0.0119	-	0.0336	N
2	3.68	1.59	0.68	0.1684	0.0105	-	0.0305	N
3	3.66	1.58	0.67	0.1626	0.0090	-	0.0265	N
4	3.70	1.57	0.67	0.1695	0.0085	-	0.0251	N
5	3.67	1.58	0.70	0.1610	0.0045	-	0.0198	N
6	3.68	1.57	0.68	0.1698	0.0035	-	0.0172	N
7	3.74	1.57	0.69	0.1694	0.0037	-	0.0167	N
8	3.71	1.58	0.68	0.1648	0.0023	-	0.0153	N
9	3.68	1.56	0.67	0.1678	0.0031	-	0.0154	N
10	-	-	-	-	-	-	-	N
11	3.61	1.55	0.66	0.1549	0.0012	-	0.0117	N
12	3.73	1.56	0.68	0.1618	0.0029	-	0.0110	N+CV
13	3.62	1.57	0.67	0.1625	0.0019	-	0.0096	CV
14	3.66	1.56	0.67	0.1683	0.0032	-	0.0096	CV
15	3.62	1.55	0.68	0.1624	0.0026	-	0.0078	CV
16	3.62	1.56	0.67	0.1661	0.0029	-	0.0076	CV
17	3.64	1.54	0.67	0.1633	0.0030	-	0.0066	CV
18	3.60	1.53	0.68	0.1658	0.0029	-	0.0054	CV
19	3.67	1.54	0.68	0.1623	0.0041	-	0.0050	CV
20	3.66	1.54	0.67	0.1695	0.0050	-	0.0048	CV

Heat C (Base melt Containing 0.2%P and 0.035%B)

Holding time(min)	Chemical composition							Graphite morphology
	C	Si	Mn	P	S	B	Mg	
0	3.63	1.65	0.66	0.1618	0.0192	0.0324	0.0455	N
1	3.67	1.59	0.65	0.1600	0.0170	0.0319	0.0313	N
2	3.63	1.62	0.66	0.1651	0.0129	0.0322	0.0270	N
3	-	-	-	-	-	-	-	N
4	3.56	1.61	0.65	0.1623	0.0071	0.0318	0.0172	N+CV
5	3.51	1.59	0.63	0.1518	0.0054	0.0307	0.0148	CV
6	3.63	1.60	0.67	0.1632	0.0040	0.0318	0.0101	CV
7	3.62	1.58	0.66	0.1602	0.0044	0.0318	0.0099	CV
8	3.45	1.60	0.64	0.1528	0.0040	0.0310	0.0087	CV
9	3.70	1.56	0.68	0.1619	0.0048	0.0326	0.0072	CV
10	3.52	1.60	0.66	0.1649	0.0051	0.0318	0.0068	CV
11	3.58	1.59	0.66	0.1690	0.0045	0.0312	0.0057	CV
12	3.57	1.58	0.65	0.1620	0.0039	0.0317	0.0045	CV
13	3.55	1.59	0.65	0.1615	0.0044	0.0320	0.0041	F
14	3.59	1.60	0.66	0.1660	0.0057	0.0317	0.0036	F
15	3.54	1.59	0.66	0.1558	0.0056	0.0324	0.0032	F
16	3.55	1.58	0.67	0.1640	0.0067	0.0320	0.0029	F
17	3.51	1.59	0.66	0.1586	0.0074	0.0323	0.0026	F
18	3.49	1.57	0.65	0.1577	0.0078	0.0314	0.0024	F
19	3.32	1.55	0.62	0.1377	0.0050	0.0308	0.0022	F
20	3.52	1.58	0.65	0.1601	0.0104	0.0321	0.0021	F

* N : nodular graphite

CV : compacted vermicular graphite

F : flake graphite

Heat D (Base melt containing 0.035%B)

Holding time(min)	Chemical composition							Graphite morphology
	C	Si	Mn	P	S	B	Mg	
0	3.75	1.68	0.66	0.0377	0.0190	0.0323	0.0399	N
1	3.70	1.68	0.67	0.0391	0.0221	0.0324	0.0371	N+CV
2	3.70	1.68	0.66					

서 출탕하여 sandwich법으로 흑연구상화 처리를 하였으며, 이 때 사용된 흑연구상화제는 Fe-45%Si-4.5%Mg계 합금이었다.

흑연구상화제의 반응이 종료될 즈음 처리용탕의 중량비율로 Ca-Si을 0.2%씩 일정하게 후접종한 각각의 용탕을 유도용해로에 다시 장입하여 일정 온도(1350-1370°C)에서 20분까지 유지하면서 용탕 중의 마그네슘이 소실되도록 하였으며, 이 때 holding time에 따른 화학성분 및 흑연조직의 변화를 조사하기 위하여 1분 간격으로 흑연조직 관찰용 시편(지름 30mm, 길이 150mm)을 green sand 주형으로 주조하였다. 이를 각 시편들을 구분하기 위하여 흑연구상화 처리된 base melt를 Heat A, P가 0.2% 단독첨가된 용탕을 Heat B, P와 B가 각각 0.2% 및 0.035% 복합첨가된 용탕을 Heat C, 그리고 B가 0.035% 단독첨가된 용탕을 Heat D로 구분하였다.

화학성분은 chill 시편을 발광분광분석기(Emission spectrometer, GVM-514)로 분석하였으며, 흑연조직 관찰용 시편은 지름 30mm, 길이 150mm로 주조한 환봉의 하단부에서 25mm 높이가 되는 곳에서 채취하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 시편들의 화학성분 분석결과이다.

3. 실험 결과 및 고찰

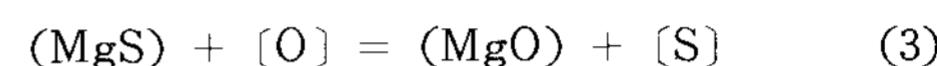
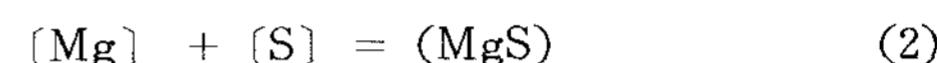
3-1. 잔류 마그네슘량과 유황량에 미치는 P 및 B의 영향

Fig. 1 및 Fig. 2는 P 또는 B가 첨가된 각각의 용탕들을 흑연구상화제로 처리한 후 일정시간 유지하였을 때, holding time의 경과에 따른 잔류 마그네슘량과 유황량의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 초기 마그네슘량에 대한 잔류 마그네슘량의 비, 즉 잔류 마그네슘의 회수율은 holding time의 경과와 함께 감소하고 있으며, holding time 초기의 잔류 마그네슘량의 소실속도는 Heat A, Heat B, Heat C, Heat D 순으로 빨라지며, 전 실험용탕에 있어 잔류 마그네슘량의 소실속도는 holding time의 경과와 함께 둔화되었다. 한편 Fig. 2에서 초기 유황량에 대한 잔류 유황량의 비, 즉 잔류 유황의 회수율은 holding time 초기에는 감소하다가 일정 시간이 경과한 후에는 다시 증가하였으며, 이와같이 잔류 유황량이 감소(탈황) 하다가 다시 증

가(복황)하는 추이는 P 또는 B가 첨가되어 있는 Heat B, Heat C 및 Heat D의 경우가 P와 B가 전혀 첨가되어 있지 않은 Heat A의 경우에 비하여 훨씬 심하게 나타났다.

이러한 holding time 경과에 따른 잔류 마그네슘량과 잔류 유황량의 변화에 대하여 고찰하여 보면 다음과 같다.

산소와 유황이 용존하는 주철용탕에 마그네슘이 첨가되면 잔류 마그네슘량은 다음의 산화물(oxides) 또는 황화물(sulfides)의 생성반응에 좌우된다⁷⁾.



잔류 마그네슘량의 소실속도는 용탕중에 용존하고 있는 [O]와 [S]의 전체 용존량에 따라 크게 좌우될 것이다. 일정량의 산소와 유황이 용존하고 있는 용탕에 마그네슘이 첨가되면 위의 식(1) 및 식(2)의 (MgO) 및 (MgS) 생성반응에 따라 주어진 온도·압력하에서의 반응평형에 도달하기 위하여 용탕중의 [Mg], [O], [S] 등은 감소되며, 그 결과 용탕에 처리된 상당한 양의 [Mg]은 (MgS)와 (MgO)의 slag(또는 dross) 형태로 변화될 것이다. 여기서 P와 B가 첨가된 용탕중의 [O] 및 [S]의 거동을 살펴보면, B₂O₃의 산화물 생성능은 P₂O₅의 산화물 생성능보다 크며⁸⁾, 유황의 활동도(fs)에 미치는 영향 역시 B가 P보다 크다⁹⁾. 그러나 본 실험에서 P는 B보다 첨가 mole수에 있어 약 23배 정도 많이 첨가되어 있으므로 마그네슘 첨가 직전의

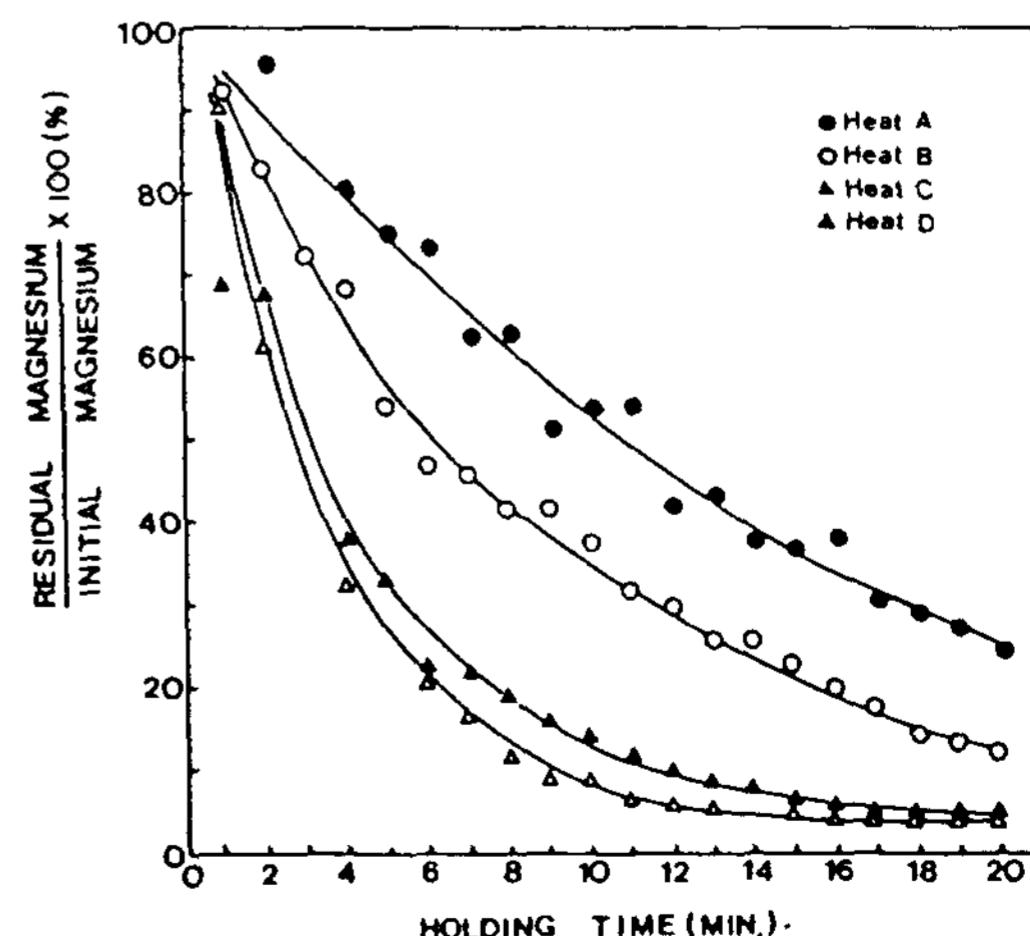


Fig. 1 Effect of isothermal holding time on the recovery ratio of magnesium content.

용존산소량은 P가 첨가된 경우가 B가 첨가된 경우보다 오히려 적어져 마그네슘이 후속 첨가될 경우의 초기반응은 P가 첨가된 겨우에는 식(2)의 (MgS) 생성반응에, B가 첨가된 경우에는 식(1)의 (MgO) 생성반응에 의하여 크게 좌우될 것이다. 그 결과 holding time 초기의 잔류 마그네슘의 소실속도는 B가 첨가된 경우가 P가 첨가된 경우 보다 빨라지고, 한편 탈황율은 P가 첨가된 경우가 B가 첨가된 경우 보다 높아진 것으로 보이며, P와 B가 복합첨가된 경우에는 유황의 활동도에 미치는 이들 원소의 영향이 상승적으로 작용하여 초기반응에서의 탈황율이 실험용탕중에서 가장 높아진 것으로 여겨진다.

또한 본 실험에서는 마그네슘이 처리된 용탕이 대기중에 노출된 상태에서 장시간 유지되므로 holding time의 경과에 따라 대기로부터 산소가 계속

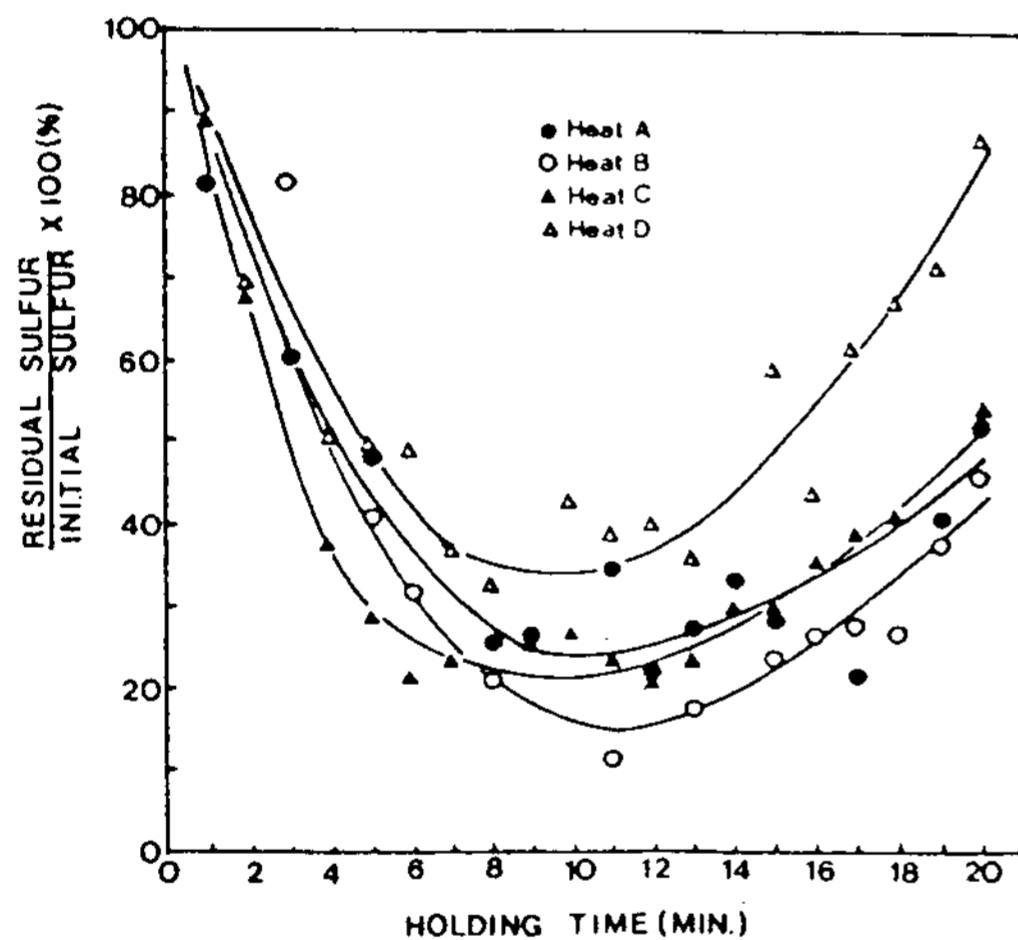


Fig. 2 Effect of isothermal holding time on the recovery ratio of sulfur content.

공급될 수 있다($\frac{1}{2} O_2 = [O]$). 이에 따라 용탕의 반응초기에 생성된 slag(또는 dross)중의 (MgS)는 이때 계속 용입되고 있는 산소와 반응하여 식(3)에 따라 (MgO)로 변화하고 용탕중의 [S]를 증가시키게 된다. 이와 같은 현상은 (MgO)의 생성능이(MgS)의 생성능 보다 크기 때문이며⁷⁾, Fig. 2에서와 같이 holding time 후반부의 복황현상은 이러한 까닭으로 일어난 것으로 여겨진다. 그리고 P가 첨가된 경우의 복황율이 B가 첨가된 경우의 복황율 보다 낮은 것은 P_2O_5 가 slag중의 sulfide capacity(C_s)를 증가시킴¹⁰⁾에 기인한 것으로 여겨진다.

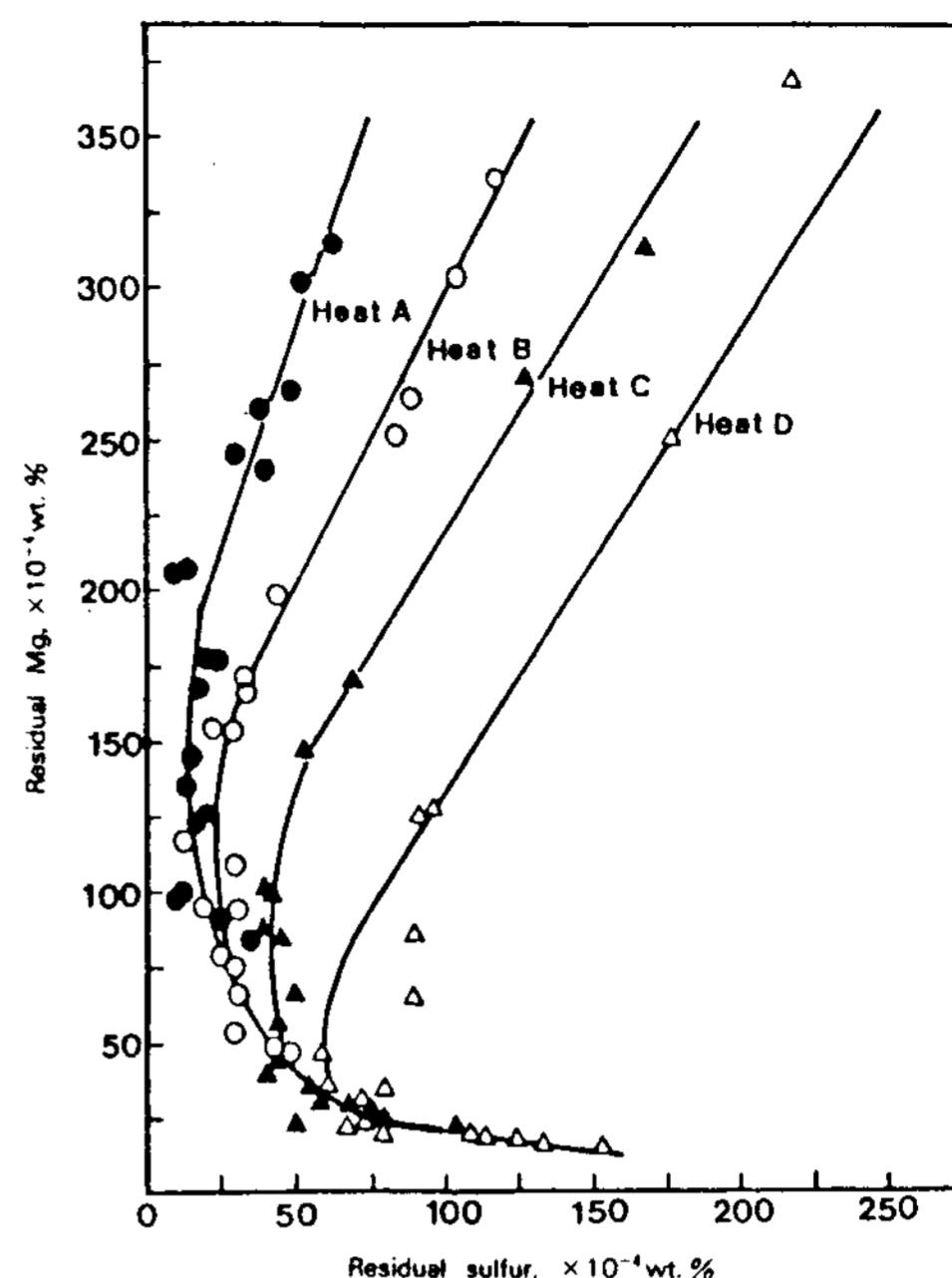


Fig. 3 Relation between the variation of magnesium and sulfur content during isothermal holding time.

3-2. 흑연조직에 미치는 P 및 B의 영향

holding time 경과에 따라 잔류 마그네슘량의 분석값은 계속 감소하고, 잔류 유황량의 분석값은 반응초기에는 감소하다가 일정한 시간이 경과한 후 다시 복황되는 추이를 동시에 나타내어 보면 Fig. 3과 같이 C 곡선형을 나타낸다. 이에 의하면 base melt에 P와 B가 각각 단독으로 또는 복합적으로 첨가되면 C 곡선의 nose 중심부는 잔류 마그네슘량이 낮아지면서 동시에 잔류 유황량이 증가하는 방향으로 이동한다. 이는 앞에서 고찰한 바와 같이 P 또는 B가 첨가된 용탕에 마그네슘이 처리될 때, 일정한 holding time의 경과에 따른 잔류 마그네슘의 회수율과 잔류 유황량의 회수율에 미치는 P 및 B의 영향이 각기 다르기 때문으로 여겨진다.

Photo. 1은 base melt(Heat A)의 holding time에 따른 잔류 마그네슘량 및 잔류 유황량의 변화를 나타내는 C 곡선과 이 때 형성되는 흑연조직의 변화를 대비한 것이다. 이 경우 CV흑연조직이 나타나기 시작하는 C 곡선상의 위치는 holding time이 12분이 경과된 C 곡선의 nose 중심부이고(0.0135 % Mg, 0.0014% S), 이러한 C 곡선의 중심부를 기

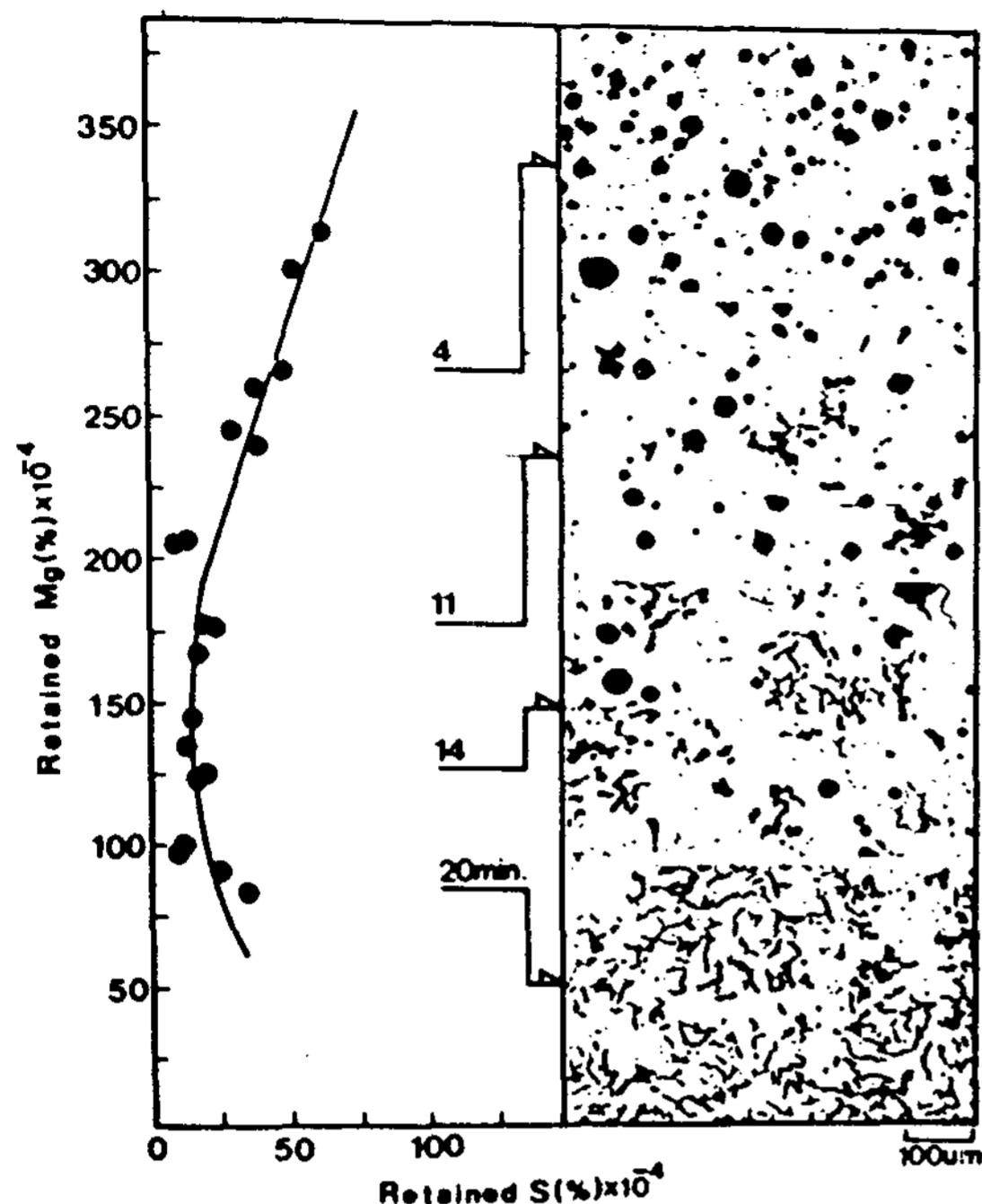


Photo. 1 Changes of the graphite structure with the isothermal holding time for the base melt(Heat A).

점으로 하여 잔류 유황량이 다시 증가하는 범위에서 양호한 CV흑연조직이 관찰되었다.

그리고 Photo. 2는 P가 0.2% 첨가된 경우(Heat B)의 C 곡선과 이 때 형성되는 흑연조직의 변화를 대비한 것이다. 이 경우 C 곡선의 nose 중심부는 holding time이 11분 경과된 지점(0.0117% Mg, 0.0012% S)이고, CV흑연조직은 C 곡선의 nose 중심부를 아래쪽으로 약간 벗어난, 즉 잔류 유황량이 다시 증가하고 있는 범위에서 관찰되었다.

Photo. 3은 P와 B가 각각 0.2% 및 0.035% 복합적으로 첨가된 경우(Heat C)의 C 곡선과 이 때 형성되는 흑연조직의 변화를 대비한 것이다. C 곡선의 nose 중심은 holding time이 8분인 지점(0.0087 % Mg, 0.0040 % S)이고, CV흑연조직은 C 곡선의 nose 중심의 상하범위(holding time 4-12분, 0.0172 -0.0045 % Mg, 0.0071-0.0040 % S), 즉 잔류 유황량이 감소하다가 다시 증가하고 있는 곡선범위에서 관찰되었다. 그리고 Photo. 4는 B가 0.035% 단독첨가된 경우(Heat D)의 C 곡선과 이 때 형성되는 흑연조직의 변화를 대비한 것이다. C 곡선의 nose 중심은 holding time이 8분인 지점(0.0061 % Mg, 0.0061 % S)이고, 잔류 마그네슘량 및 잔류 유황량이 동시에 감소하는 범위에서 CV흑연조직이 관찰

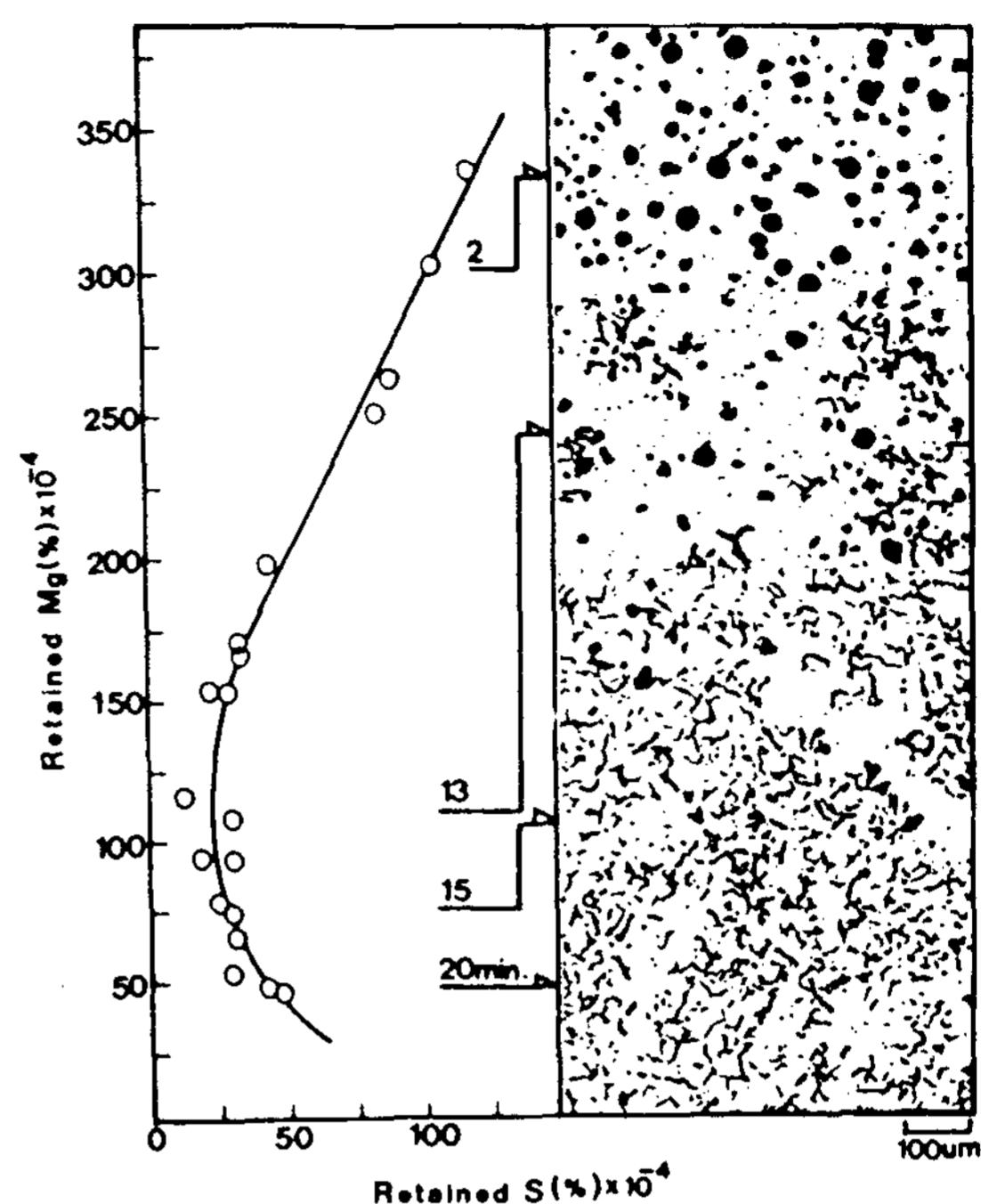


Photo. 2 Changes of the graphite structure with the isothermal holding time for the base melt containing 0.2% phosphorus (Heat B).

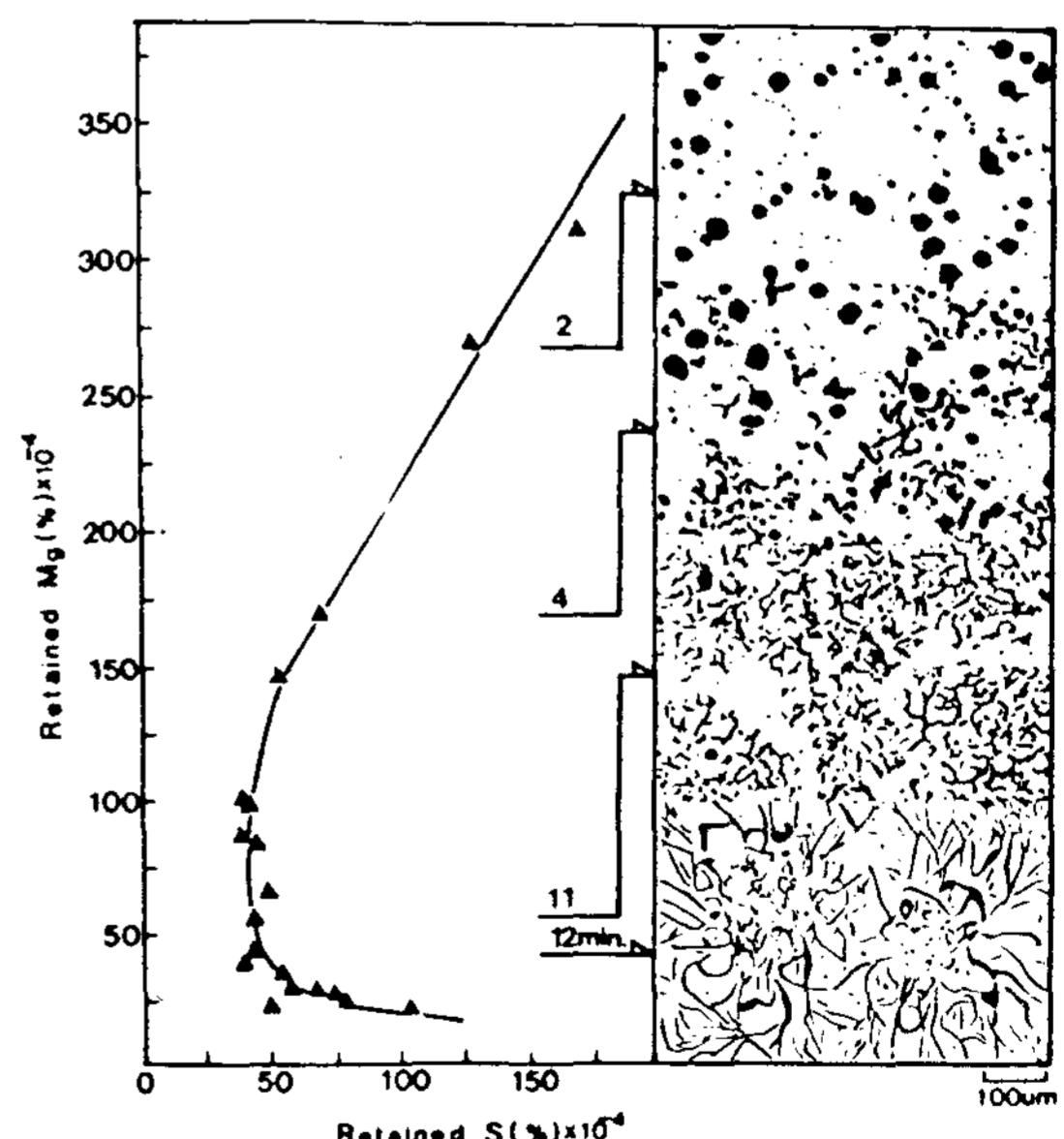


Photo. 3 Changes of the graphite structure with the isothermal holding time for the base melt containing 0.2% phosphorus and 0.035% boron(Heat C)

되었다.

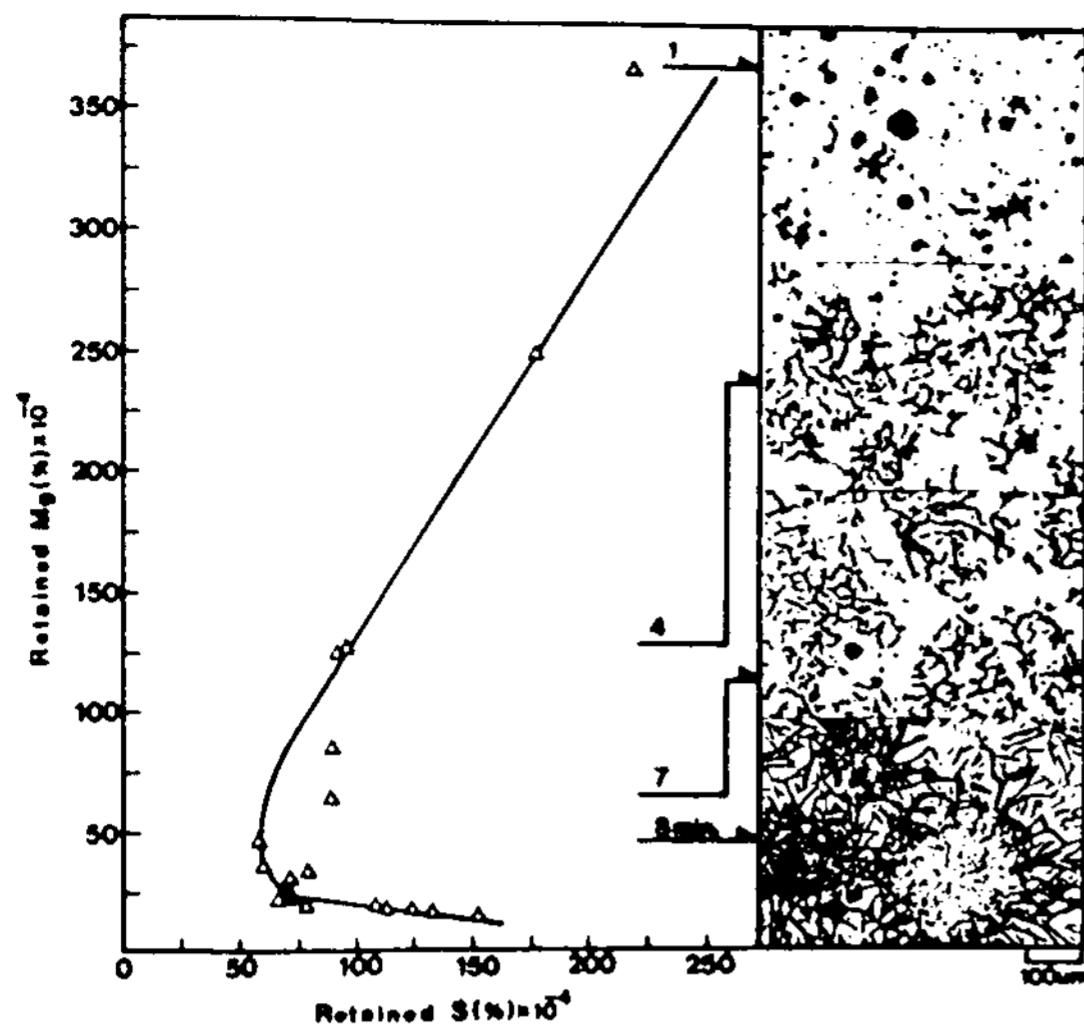


Photo. 4 Changes of the graphite structure with the isothermal holding time for the base melt containing 0.035% boron (Heat D).

3-3. CV흑연조직에 미치는 Mg-Equivalent의 영향

Photo. 5는 각 실험용탕의 holding time에 따른 흑연조직변화를 광학현미경으로 관찰하고, Mg-Equivalent [=잔류 Mg(%) - 3/4 잔류 S(%)]¹¹⁾ 값에 따라 이들 각각의 흑연조직들을 비교한 것이다. base melt(Heat A)는 Mg-Equivalent가 0.0160 일 때부터 CV흑연조직이 나타나기 시작하여 0.0057 이 될 때 까지 CV흑연조직이 유지되었으며, P가 0.2% 첨가된 용탕(Heat B)은 Mg-Equivalent가 0.0087일 때부터 CV흑연조직이 나타나기 시작하여 0.0011이 될 때 까지 CV흑연조직을 유지하였다. 그러나 P와 B가 각각 0.2% 및 0.035% 복합 첨가된 용탕(Heat C)은 Mg-Equivalent가 0.0119에서부터 CV흑연조직이 나타나기 시작하여 CV흑연조직을 유지하다가, Mg-Equivalent가 0.0015 이하일 때 과냉상의 편상흑연을 보였다. 그리고 B가 0.035% 첨가된 용탕(Heat D)은 Mg-Equivalent가 0.0205에서부터 CV흑연조직이 나타나기 시작하여 CV흑연조직을 유지하다가, Mg-Equivalent가 0.0012 이하일 때 과냉상의 편상흑연조직을 보였다.

이상의 CV흑연조직이 나타나는 Mg-Equivalent 값에 미치는 P 및 B의 영향을 정리하여 보면, B가 첨가될 경우 CV흑연조직이 나타나는 Mg-Equivalent 값은 높아지나, P가 첨가될 경우에는 CV흑연조직이 나타나는 Mg-Equivalent 값은 낮아짐을



Photo. 5 Variation of graphite structure with the Mg-Equivalent.

알 수 있다. 이러한 현상을 고찰하여 보면 다음과 같다.

일반적으로 흑연의 구상화에 큰 영향을 미치는 마그네슘은 용탕중의 [S]와 결합하여 (MgS)를 생성시키는 탈황반응과, 그리고 용탕중의 [O]와 결합하여 (MgO)를 생성하는 탈산반응에 의하여 소모된다⁷⁾. 본 실험에서 사용한 발광분광분석장치로는 흑연의 구상화에 영향을 미칠 수 없는 마그네슘량, 즉 황화물(MgS) 및 산화물(MgO) 상태로 존재하는 마그네슘까지도 분석되어 나타난다. 그런데 이미 3-1절에서 고찰한 바와 같이 P가 첨가된 용탕의 경우에는 (MgS)의 생성반응이, 그리고 B가 첨가된 용탕의 경우에는 (MgO)의 생성반응이 우선적으로 일어난다. 따라서 B가 첨가된 용탕의 경우에는 P가 첨가된 용탕의 경우 보다 (MgO)

의 생성량이 많아질 것이므로, CV흑연조직이 나타나는 잔류 마그네슘량의 범위를 기존의 Mg-Equivalent¹¹⁾으로 나타내면, B가 첨가된 용탕이 P가 첨가된 용탕의 경우 보다 높아질 것이다. 이와같이 실제적으로 흑연구상화에 영향을 미칠 수 있는 잔류 마그네슘량을 Mg-Equivalent¹¹⁾으로 구할 경우에는 용탕중에 존재하는 황화물량 뿐만아니라 산화물량의 영향도 고려되어야할 것으로 여겨진다.

4. 결 론

P와 B가 첨가된 CV흑연주철의 안정적인 제법을 검토하기 위하여 P가 0.2% 첨가된 용탕, P와 B가 각각 0.2% 및 0.035% 복합첨가된 용탕, B가 0.035% 첨가된 용탕들을 Fe-45%Si-4.5%Mg계 흑연구상화제로 처리하고, 일정온도로 20분까지 유지하여 holding time에 따른 화학성분과 흑연조직의 변화를 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) B가 첨가된 용탕(Heat D)에 있어 잔류 마그네슘량의 소실속도는 P가 첨가된 용탕(Heat B)에 있어 잔류 마그네슘량의 소실속도 보다 훨씬 빨랐다.

(2) 흑연구상화 처리한 용탕을 장시간 동안 유지할 경우, 유황은 복황됨을 알 수 있었으며, 특히 P가 첨가된 용탕은 B가 첨가된 용탕의 경우 보다 복황율이 낮아짐을 알 수 있다.

(3) CV흑연조직이 나타나는 Mg-Equivalent¹¹⁾의 범위는 P가 0.2% 첨가될 경우 0.0087-0.0011이었으며, B가 0.035% 첨가될 경우는 0.0205-0.0014이었다. 또한 P가 B가 0.2% 및 0.035% 복합 첨가될

경우 CV흑연조직을 얻을 수 있는 Mg-Equivalent¹¹⁾값의 범위는 0.0119-0.0023이었다. 즉 CV흑연조직이 나타나는 Mg-Equivalent¹¹⁾값은 P가 첨가되면 낮아지고, B가 첨가되면 높아짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) B. J. Taylor and T. S. Eyre, TRIBOLOGY International, (Apr. 1979) 78-88
- 2) 鑄物編覽(改定 4版), 日本鑄物協會, 丸善, 東京 (1986) 754
- 3) R. B. Gundlach and W. G. Scholz, AFS trans., 81(1973) 395-402
- 4) K. E. L. Nicolas, BCIRA J., 10(1962) 166-172
- 5) J. C. Hamaker. Jr. and W. P. Wood, AFS trans., 60(1952) 411-426
- 6) 掘正, 鑄物, 59(1987) 491-495
- 7) J. Tartera, AFS International Cast Metal J., 5(1980) 7-14
- 8) C. E. Wick and F. E. Block, Thermodynamic Properties of 65 Elements, U. S. Goverment Printing Office, Washington(1963) 22, 70. 91
- 9) C. Bodsworth and H. B. Bell, Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture, Longman Group, London(1972) 442
- 10) F. D. Richardson, Physical Chemistry of Melts in Metallurgy 2, Academic Press, New York(1974) 295
- 11) J. F. Janowak and C. R. Loper, AFS trans., 44(1971) 594-599