

|||||  
**論 文**  
 |||||

## 구상흑연주철의 피질삭성과 내마모성에 미치는 Boron 첨가의 효과에 관한 연구

최양진\*, 이병엽\*, 권혁무\*\*, 백상한\*\*\*, 박용진\*\*\*

### A Study for the Effects of Boron Addition on Machinability and Wear Resistance of Ductile Cast Iron

Yang-Jin Choi,\* Byung-Yehp Lee\*, Hyuk-Mu Kwon\*\*,  
 Sang-Han Baek and Yong-Jin Park\*\*\*

#### Abstract

It is very important to obtain high performance ductile iron by addition a small amount of alloying elements.

In this study, to improve the characteristics of small piston ring casted from ductile iron melt a small amount of boron(0~0.008wt.%) that is powerful carbide stabilizer was added in ductile iron, and inspected it's effects on the microstructure, wear resistance, machinability and mechanical properties.

The results obtained from this study are as follows.

1. As the amount of boron increased to 0.04wt.%, the machinability of ductile iron is increased, and if the amount is in excess of 0.04wt.% the machinability is decreased conversely.
2. The wear resistance of ductile iron is improved by boron addition.
3. The recommended ladle addition of boron amount ranges from 0.04wt.% to 0.06wt.% for the use of small piston ring.

(Received January 31, 1994)

#### 1. 서 론

주철은 근본적으로 철과 흑연의 복합체로서 그 성질은 흑연(흑연량, 크기, 형상) 및 기지조직에 좌우된다[1]. 따라서 적당한 합금원소를 첨가하여 기지조직의 강화와 동시에 흑연의 석출량, 형상, 크기 및 분포상태를 개량하여 기계적 성질을 개선시키고 경제적이고도 간편한 방법으로 제조하고자 노력하고 있다.

현재 마모성이 요구되는 구상흑연주철의 제조에는 기지조직의 퍼얼라이트화, 공정세포의 미세화, 스테다이트의 형성 등으로 그 경도를 향상시

키는 방법을 이용하고 있다.

B(Boron)은  $Fe_3C$ 에 상당하는  $Fe_2B$  화합물로 존재하여,  $\alpha$ -Fe 및  $\gamma$ -Fe에 소량 고용되고,  $Fe_3C$ 에도 고용되어  $Fe_3(CB)$ 가 형성되며  $Fe-Fe_2B-Fe_3(CB)$ 의 삼원공정합금[2]을 만든다. B는 탄화물 조장 또는 안정화 원소로 내마모성이 요구되는 회주철 제조시에 소량 사용되어 왔으나 구상흑연주철의 경우에는 연신율이 저하되므로 B 함유량을 억제하는 것이 보통이었다[3]. 그러나 최근 자동차의 고속화에 따라 내마모성과 항절력이 보다 우수한 피스톤링 재료가 요구되게 되었으며, 이에 적합한 성능의 재료를 경제적이고도 간편한

\*대전산업대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Daejeon National University of Technology)

\*\*충남대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Chungnam National University)

\*\*\*홍익대학교 금속·재료공학과(Dept. of Metallurgical Eng., & Materials Sci., Hong-Ik University)

방법으로 특수처리한 구상흑연주철로 대체하고자 하는 연구도 매우 중요하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 구상흑연주철 용탕에 B를 0~0.08wt.%까지 여러가지 조성으로 첨가하고 이것이 기조직 및 물리적 성질에 미치는 영향을 조사하여 자동차 피스틴링 재료의 제조에 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시료의 제조

본 실험에 사용한 시료는 2000kg 용량의 저주파 유도로에서 표준 조성이 3.6%C, 2.6%S, 0.4%Mn이 되도록 선철, 강철, Fe-Si를 배합용해하고 흑연구상화제(OGCR#30)를 플러저법으로 첨가하여 구상화한 후 용탕을 소형레들에 이동시

키면서 B를 0~0.08wt.% 범위의 각종 조성으로 첨가시킴과 동시에 8mesh 정도의 Fe-Si로 후접종(용탕 중량의 0.3%) 처리하여 CO<sub>2</sub> 주형의 Y-block(Fig. 1) 및 98(D)×4.8(B)×4.36(T) 크기의 피스틴링(Photo 1)으로 생형에 주조하여 제조하였다. 이때 용탕의 주입온도는 1350~1400°C 범위였고, 생형의 조건은 통기도 50, 전단강도 1.2kg/cm<sup>2</sup>, 경도 95, 수분 3.5%였다.

용해원료의 화학조성은 Table 1과 같으며, 제조된 각종 시료의 화학조성은 Table 2와 같다.

### 2.2 기계적 성질 및 현미경 조직시험

위의 방법으로 제조한 각종 시료중 Y-block으로부터는 절삭성 시험편 및 KS B 0801 4호 인장 시험편으로 가공하여 각각의 시험을 실시하고 인장시험편의 머리부분에서 시료를 채취하여 조

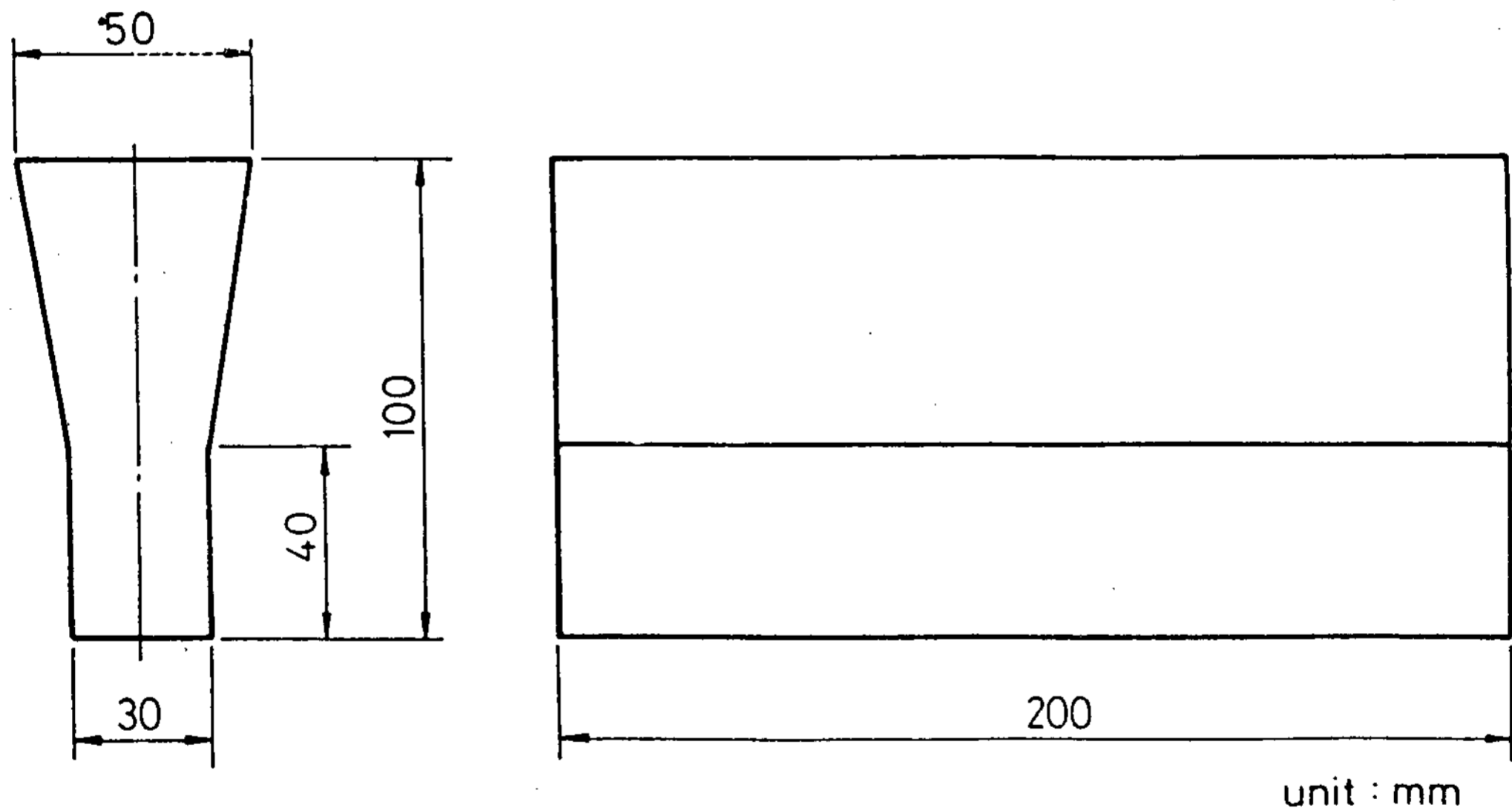


Fig. 1. Dimensions of Y-block.

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

Comp. Mat.	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe	B	Remark
Pig iron	4.10	1.41	0.30	0.18	0.04	—	Bal.	—	
steel scrap	0.18	0.32	0.50	0.07	0.01	—	Bal.	—	
Fe-Si	0.13	75.3	0.01	0.01	0.01	—	Bal.	—	
OGCR #30	—	45	—	—	—	3.5	Bal.	—	Cal. 5
Fe-B	—	—	—	—	—	—	Bal.	8	
Graphite	99.5	—	—	—	0.1	—	—	—	

직시험(Photo 2)을 하였으며, Photo 1의 생형주조한 피스톤링으로부터 시료를 채취하여 경도, 마모성 및 조직시험(Photo 3, 4, 5)을 실시하였다.

Table 2. Chemical composition of samples.

Comp. Samp.No	Composition(wt.%)						
	C	Si	Mn	P	S	Mg	B
1	3.650	2.640	0.360	0.090	0.020	0.060	-
2	3.540	2.560	0.370	0.090	0.020	0.050	0.025
3	3.530	2.510	0.370	0.090	0.020	0.040	0.049
4	3.520	2.580	0.370	0.090	0.020	0.046	0.058
5	3.620	2.670	0.370	0.090	0.190	0.053	0.092

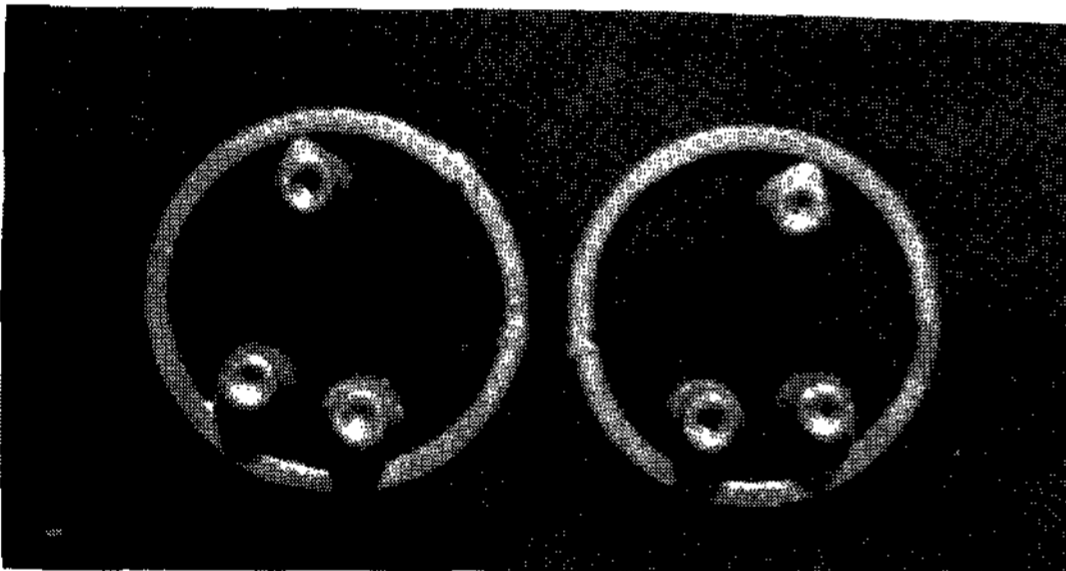
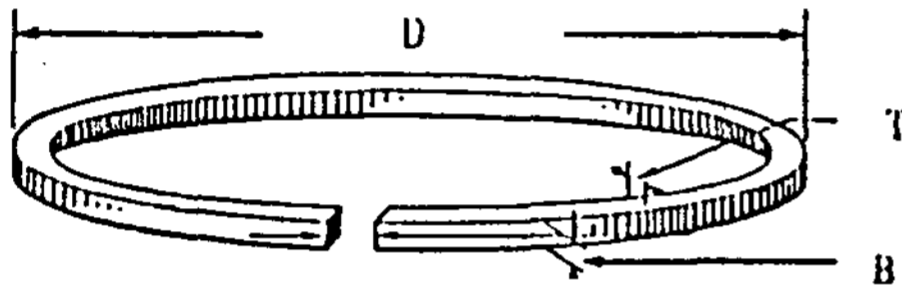


Photo 1. Dimensions and as casted products of piston ring.

2.3 마모시험

본 시험에는 Ogoshi, Model OAT-U형, high speed universal wear tester를 사용하였다.

Fig. 2는 마모시험기의 장착상태를 나타낸 것이다. B량을 변화시켜서 Photo 1과 같이 주조한 피스톤링을 가공하여 고정시료로 부착시켰으며, 상대재료는 회전 disc로서 S45C 재료를 880°C에서 수중 쿼칭한 다음 570°C로 템퍼링하여 소르바이트 조직으로 하였다.

고정시료 및 회전재료의 표면조도는  $R_{max} 1\mu m$  범위 이하로 표면을 연마하였고, 이물질 제거하기 위하여 아세톤으로 탈지, 세정한 후 시험기에 부착시켰으며, 건식상태에서 실험을 행하였다. Fig. 2에 고정 시험편의 마모량은 W로서 빗

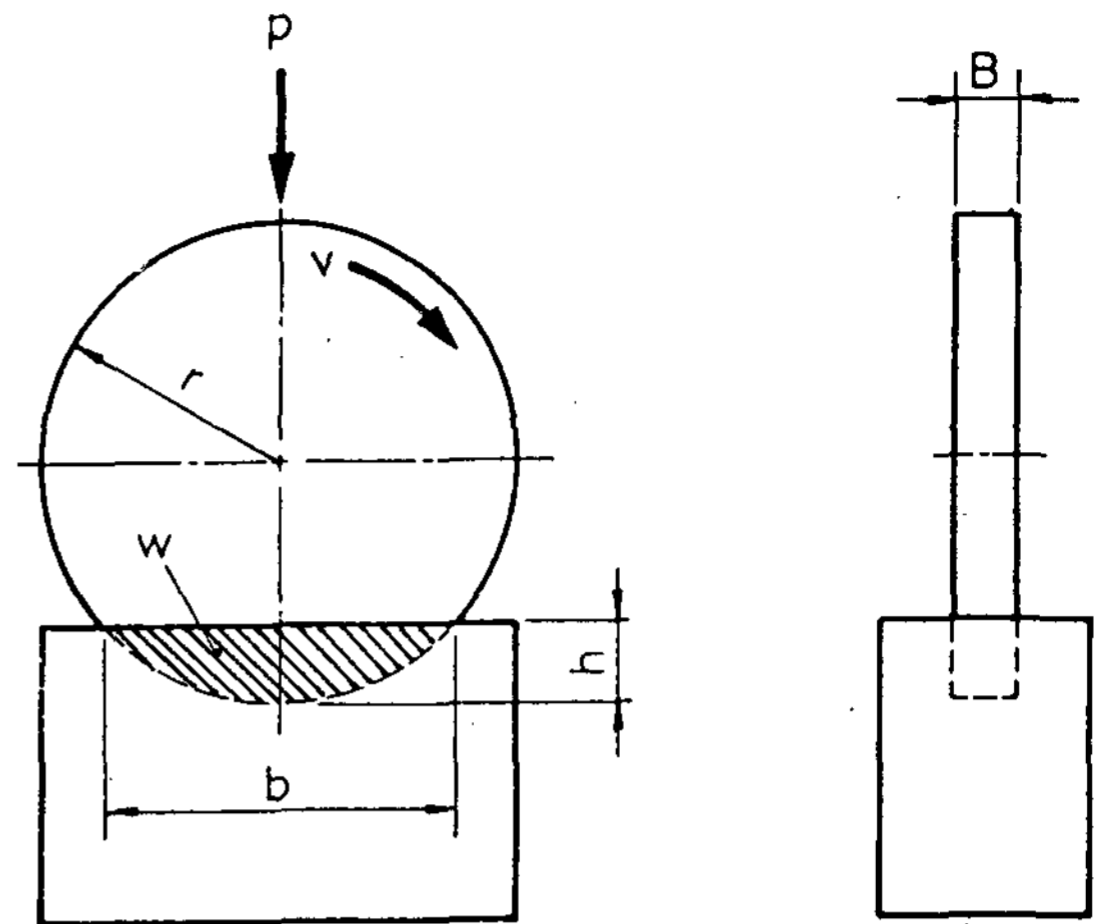


Fig. 2. Apparatus for abrasion testing with revolving disc.

금친 부분의 체적이 되며, 이는 회전 disc의 반경 r에 반비례하고, 회전 disc의 폭 B와 마모면의 현의 길이 b에 비례하므로 변수인 마모면의 현의 길이를 투영기 및 금속현미경으로 측정하여 마모량을 계산하였다.

고정시험편의 마모량은 Fig. 2에서 현의 길이가 b인 호가 이루는 단면적에 회전 disc의 폭 B를 곱한 체적이며 이 마모량 W는 다음과 같이 계산된다[15].

$$W = B \left[ r^2 \sin^{-1} \left( \frac{b}{2r} \right) - \left( \frac{b}{2} \right) \sqrt{r^2 - \left( \frac{b^2}{4} \right)} \right] = Bb^3/12r \quad (1)$$

2.4 절삭성 시험

본 실험에 사용된 시험장치는 Tokyo testing Co. Model TSM-TM1104형 절삭공구 동력계로

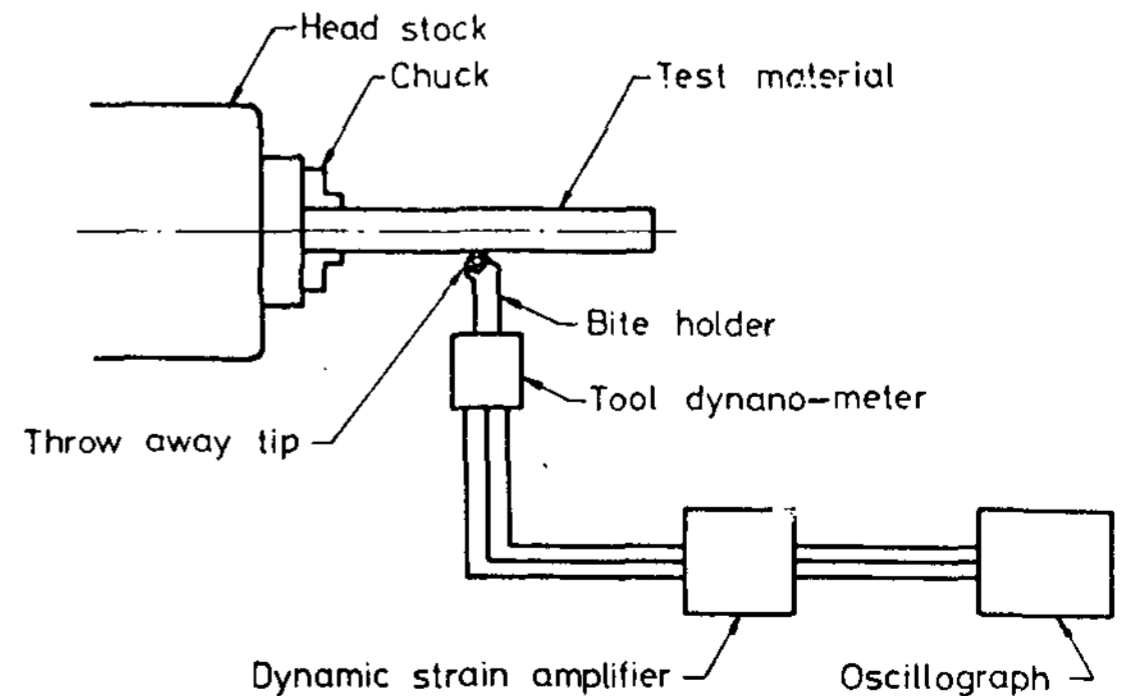


Fig. 3. Apparatus of tool dynamometer.

서 그 개요를 Fig. 3에 나타냈다. Y-block으로 주조한 시료를  $\phi 20 \times 20\text{mm}$ 로 가공하여 선반 척에 고정시키고 스트레인 게이지에 의한 공구 동력계를 사용하여 주분력(main force)을 측정하였다. 절삭조건은 절삭속도( $v$ )=40m/min, 절삭깊이=1mm, 이송속도=0.207mm/rev.로 하였고 [4] 절삭용 팁으로는 대한 중석재 SNPA423 M10을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 흑연 및 기지조직에 미치는 B의 영향

B는 Mn 못지 않은 탄화물 조장 또는 안정화 원소로 알려져 있는데[3], Photo 2에서 알 수 있는 바와 같이 그 함유량을 증가시킴에 따라 흑연의 석출량이 감소하였고, nodule의 크기가 작아지고 그 수가 많아졌으며, 흑연구의 크기가 균일

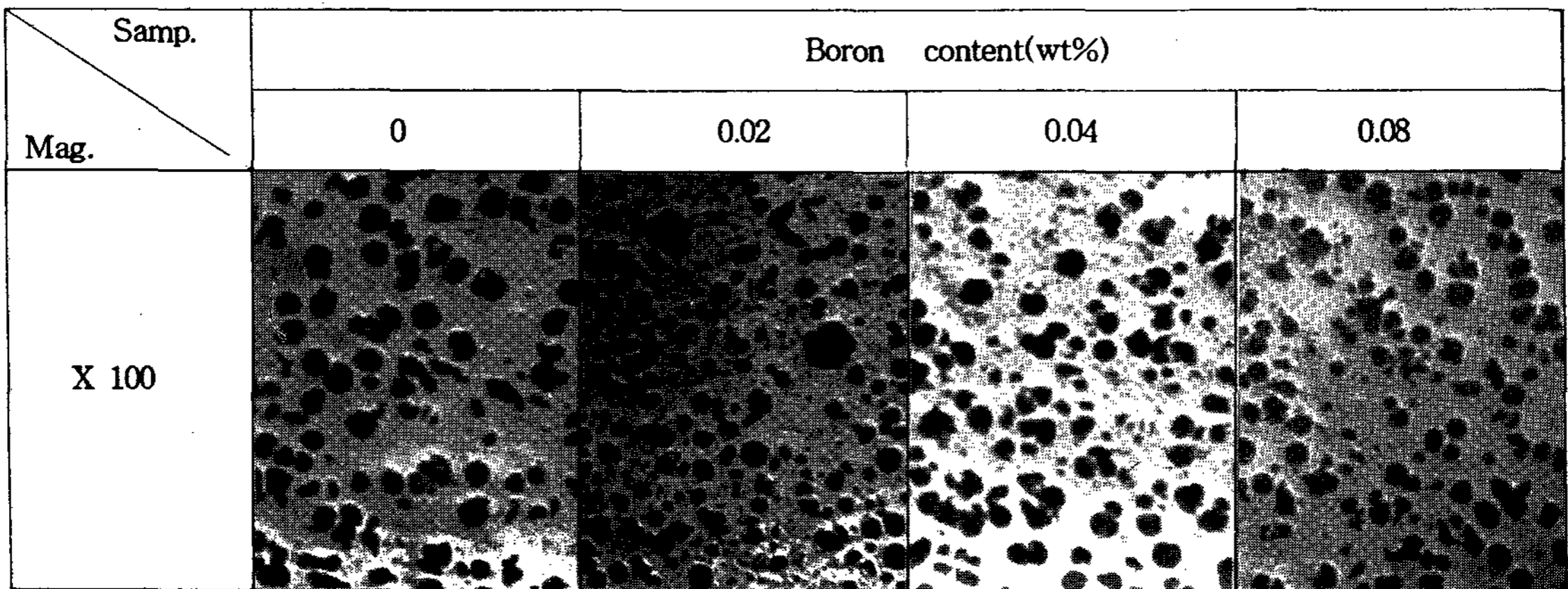


Photo 2. Effect of Boron addition on nodule count, shape and size of spheroidal graphite in ductile cast iron (as cast Y-block, Non-Etched).

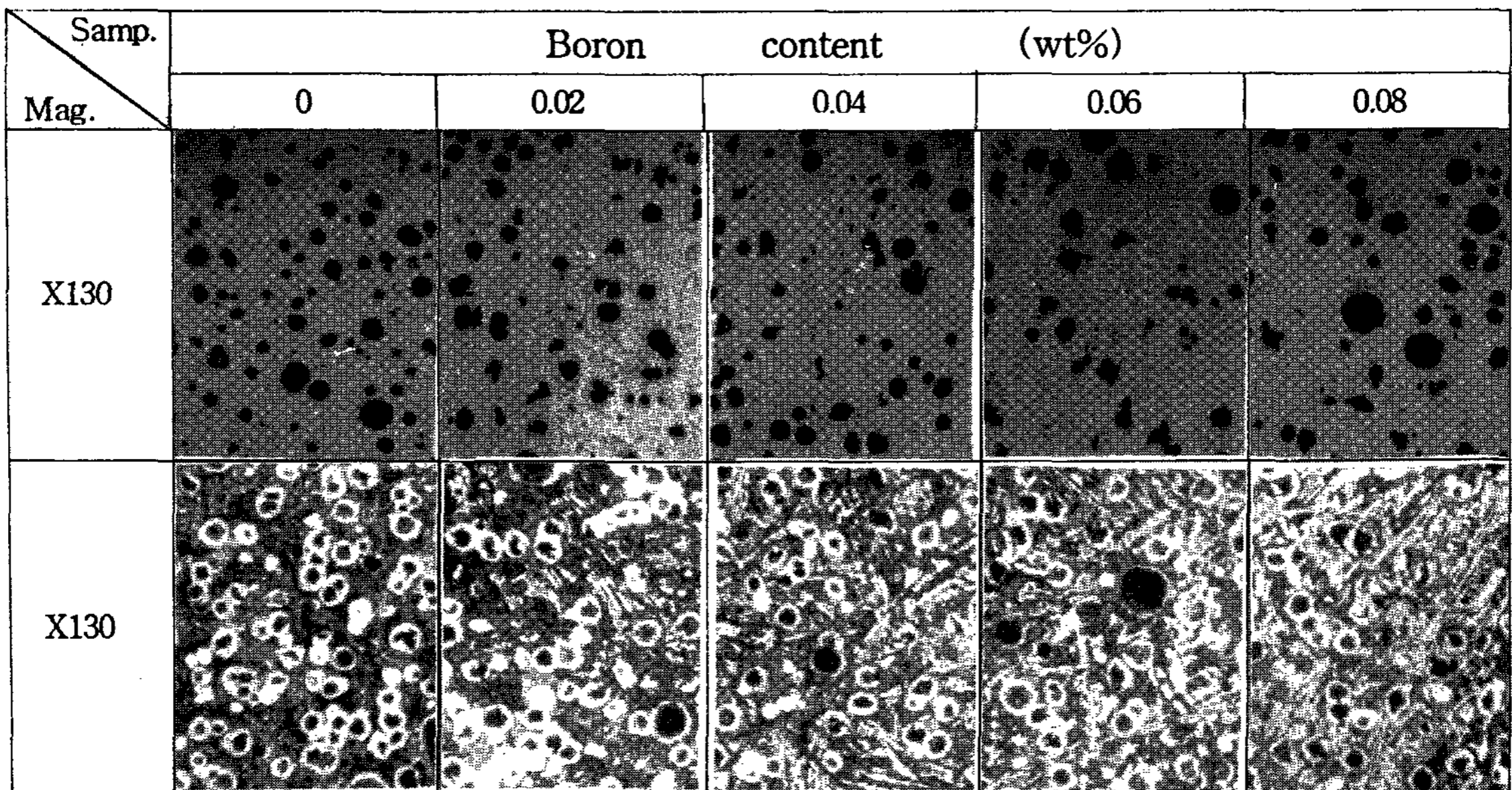


Photo 3. Microstructure of Ductile Cast Iron(as cast).

하게 되었다.

B가 이와 같은 효과를 나타내는 이유는, B이 C의 용해도를 높여주어 그 활량을 감소시켜 주고[5], 퍼얼라이트의 안정화로 흑연이 주로 심하게 과냉된 탄소 과포화용액과 오스테나이트로부터의 C에 의하여 성장하고 퍼얼라이트의 분해에 의한 성장이 억제되었기 때문이라 생각된다.

한편 기지조직은 Photo 3에서 보는 바와같이 B의 함유량이 증가함에 따라 유리탄화물이 형성되며 0.02wt.%B 이상으로 되면 탄화물은 조대한 판상으로 발달한다. 이 판상 탄화물은 주로 Fe-Fe<sub>2</sub>B-Fe<sub>3</sub>(CB)의 삼원공정으로 볼 수 있으며, 이 복합상은 경도는 높으나 취약하기 때문에 그 양이 증가할수록 강도와 내마모성은 증가될 것이나 경도와 기계 가공성은 저하되는 것으로 판단되는데, 이는 이후의 시험에서 확인되었다.

Fe<sub>3</sub>(CB) 및 Fe<sub>2</sub>B는 일반의 방법인 현미경 관

찰로는 구별하기가 곤란하지만 피크린산소오다 용액으로 부식시켜 관찰하면 Fe<sub>3</sub>(CB)는 갈색, 그리고 Fe<sub>2</sub>B는 자색으로 착색되므로 구별할 수 있다[6]. Photo 4는 이 방법으로 관찰한 각종 시료의 현미경조직 사진이다.

### 3.2 공정세포 조직에 미치는 B의 영향

공정세포 조직이 주철의 기계적 성질 등에 영향을 미친다는 것은 이미 알려진 사실이다[7-10]. Hughes[11]가 주창한 구상흑연주철의 공정응고이론에 의하면 한개씩의 구상흑연립이 각각 한개의 공정단위로 되어 응고하게 되므로 nodule의 수가 많아질수록 공정세포수가 많게 될 것이고 스테다이트는 그 경계에 분포될 것이다.

Photo 5는 공정세포조직과 스테다이트의 분포상태를 확인하기 위하여 B 함유량이 서로 다른 각종 시료를 stead's reagent[12](CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O :

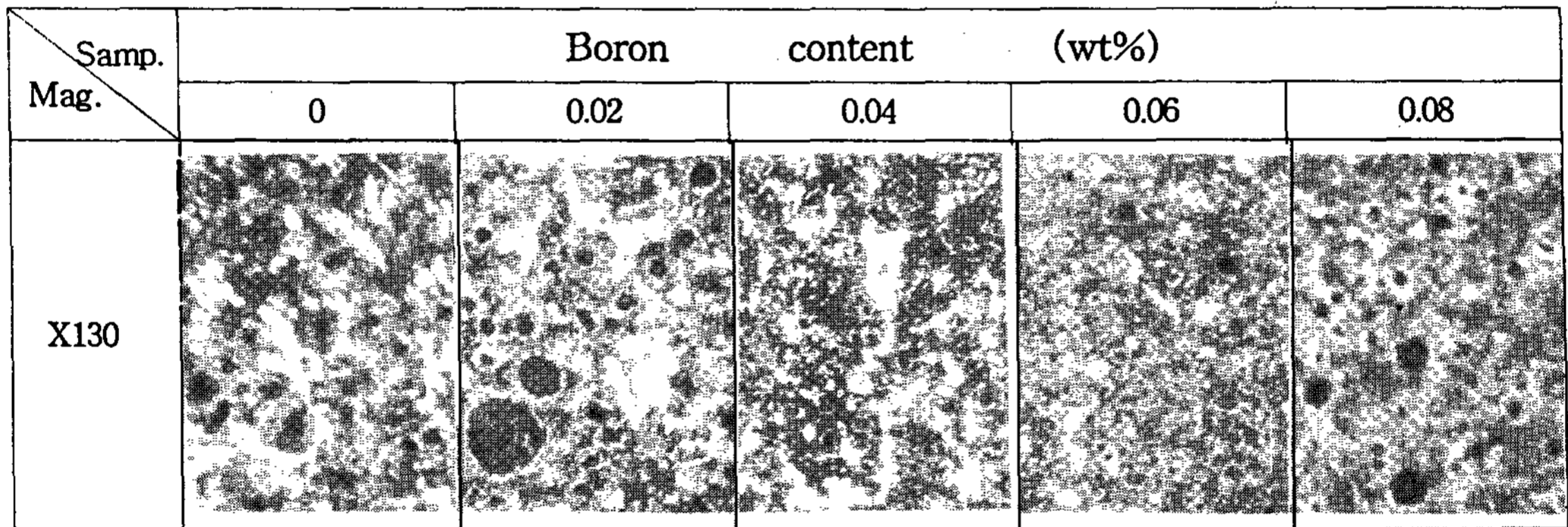


Photo 4. Microstructure of Ductile Cast Iron, (Solidum Picrate Etched).

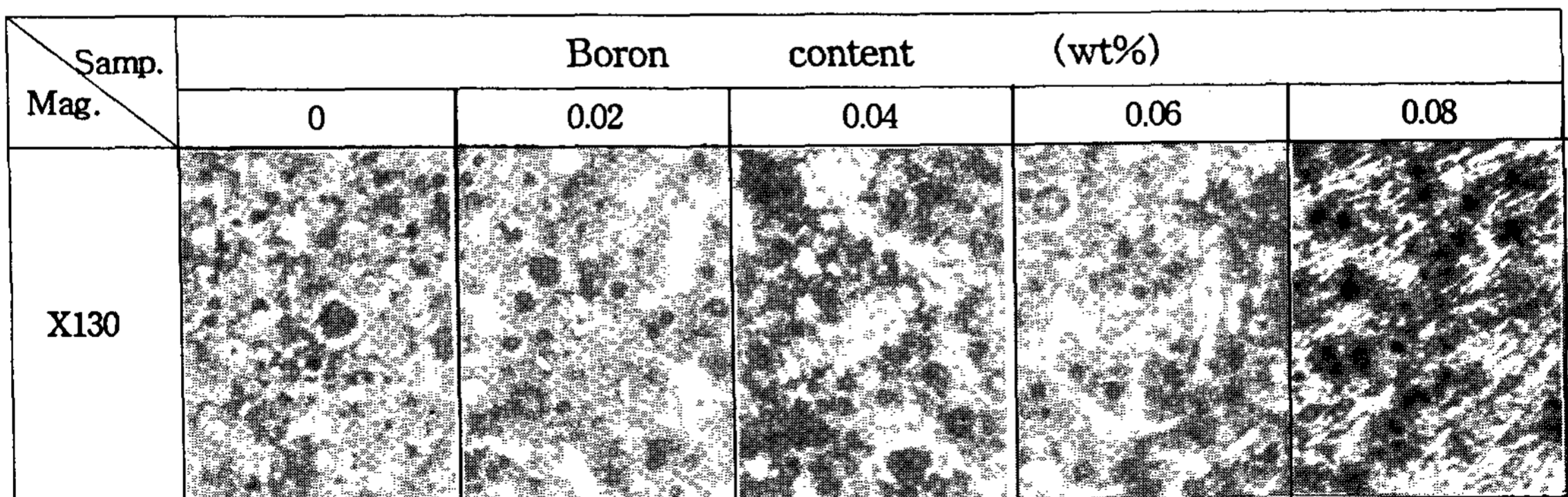


Photo 5. Effect of Boron addition on eutectic cell and steadite's distribution of Ductile Cast Iron (stead's reagent, Etched).

10gr, MgCl<sub>2</sub> : 40gr, 알코올 : 1000ml, 염산 : 20ml)에 3시간 동안 침지시킨 다음 촬영한 현미경 사진이다.

사진으로부터 확인되는 바와 같이 B 함유량이 증가함에 따라 공정세포의 수(nodule의 수)가 증가되고 스테다이트도 미세 분포되어 있음을 알 수 있다.

그런데 B는 전술한 바와 같이 Fe<sub>3</sub>C에 용해되어 Fe<sub>3</sub>(CB)를 형성하므로써 Fe<sub>3</sub>C의 분해를 억제하고, 따라서 스테다이트가 α-Fe<sub>3</sub>C-Fe<sub>3</sub>P의 삼원공정조직으로 되게하여 그 경도를 높여줄 뿐 아니라 공정세포를 미세하게 하고 그 경계에 스테다이트가 균일하게 분포되게 하는 작용을 한다고 생각된다. 그러나 B의 함유량이 어느 범위를 초과하게 되면 그 화합물들이 입계에 편석되는 것도 확인되었다.

### 3.3 기계적 성질에 대한 고찰

B 함유량에 따른 시료별 경도 및 인장강도, 연신율은 Table 3와 같다.

**Table 3.** Effect of boron addition on mechanical properties of ductile cast iron.

Samp.	Boron(wt.%)				
	0	0.02	0.04	0.06	0.08
Mach. pro.					
Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	56.2	58.3	54.1	52.5	50.2
Elongation(%)	14.0	10.5	5.0	4.5	3.0
HRB	89.0	92.8	94.6	96.8	98.2

경도는 B 함유량의 증가에 따라서 증가하였으나 인장강도 및 연신율은 감소되는 경향을 나타냈다.

공정세포의 수가 증가하여 그 크기가 감소함에 따라 인장강도가 증가될 것으로 생각되나 오히려 감소하는 경향을 나타낸 현상은 B가 주로 Fe<sub>3</sub>C에 고용되어 Fe<sub>3</sub>(CB)를 형성하고, 공정세포 입계에 편석[2, 6, 10, 13]되므로 재질을 취약하게 만든 결과라고 생각된다. 즉, 공정세포 경계에 편석된 Fe<sub>3</sub>(CB)는 Fe<sub>3</sub>C의 분해를 억제하고 스테다이트가 삼원공정으로 잔존시키므로 경도를 높여주고 반면에 인장강도와 연신율은 감소한다고 생각된다.

### 3.4 마모특성에 관한 고찰

Table 4는 B 함유량을 변화시킨 시료의 건식 마모시험 결과이다.

**Table 4.** Relationship between maximum abraded amount and boron content in ductile cast iron.

Sample	Boron(wt.%)				
	0	0.02	0.04	0.06	0.08
Max. Amount of abraded(mm <sup>3</sup> )	7.18	5.89	4.76	4.21	3.14

conditions : abrasion distance 66.6mm  
final load 3.2kg  
abrasion speed 1.97m/sec

B 함유량의 증가에 따라 마모량은 감소하는 현상을 나타내고 있다. 이것은 B이 Fig. 4 및 Fig. 5에 보여주는 바와 같이 Fe<sub>2</sub>B 화합물과 Fe<sub>3</sub>(CB)의 공정화합물을 형성하여 복합 보론 석출물이 오스테나이트 영역에서 입계편석을 일으켜 계면에너지가 감소시키며, 또한 입계의 높은 에너지 자리에서 미세한 Fe<sub>23</sub>(CB)<sub>6</sub>[14]가 석출하기 때문에 경도가 증가하고, 공정조직이 미세해지기 때문이라고 생각된다.

### 3.5 기계 절삭성에 대한 고찰

B 함유량에 따른 기계절삭성은 Table 5와 같다. B 함유량의 증가에 따라 Tangential force가 감소하는 현상을 보이나 B 함유량 0.04wt.% 이상에서는 다시 증가하는 추세이다. 주철은 철 이외에 여러 성분을 함유할 때 이들은 서로 다른 상을 형성하여 절삭성에 큰 영향을 미치게 된다.

**Table 5.** Machinability of the Various Specimens.

Samp.	Boron(wt.%)				
	0	0.02	0.04	0.06	0.08
Mach.					
Tangential Force (kg)	37.90	36.02	35.00	36.79	38.58

따라서 B 함유량의 변화에 따라 흑연의 형상 및 기지조직의 변화, 경도증가 등에 기인된 것으로 생각된다.

이들 요인 중 흑연은 강도 및 경도가 아주 낮으며 절삭시 발생하는 칩의 파괴를 돕고 절선으

로부터 쉽게 분리되는 작용을 함과 동시에 공구에 칩이 소착되는 것을 방지하는 역할을 하므로 흑연량이나 흑연의 형상은 주철의 절삭성과 긴밀한 관계를 갖는다. 따라서 B 함유량의 증가에 따라 흑연의 석출량이 감소하므로 이것이 절삭성을 해치는 원인이 된다.

B 함유량이 증가함에 따라 기지조직에 조대한 판상 탄화물이 형성되고 스테다이트를 안정화시키는 것도 정도의 증가와 더불어 기계 절삭성을 저하시키는 원인이 되는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

소량의 B(0~0.8wt.%) 첨가가 구상흑연주철의 현미경 조직, 내마모성, 기계가공성 및 기계적 성질 등에 미치는 영향을 검토한 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1) 절삭저항은 0.04wt.%B에서 최대값을 나타내며, 0.08wt.%B 이상에서는 약간 증가하는 경향을 나타낸다.

2) 마모량은 B량의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.

3) 연신율은 B량 0.04wt.%부터 현저히 감소하는 추세이다.

4) 소형 피스톤링의 제조에 권장되는 B량은 0.04~0.06wt.% 범위이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 염희택, 이계완 : 최신주조공학, (1986) 298~299
- [2] M. E. Nichol森 : Jou. of Metals, 9 (1959) 1
- [3] S. I. Karsay : 구상흑연주철 1편 생산, 한국주조공학회, (1980) 47
- [4] 新技術開發センター : 切削加工技術テイタ集, 68~69
- [5] 김수영, 강춘식, 나형용, 홍종휘 : 주철공학, (1977) 60~61, 53~70
- [6] 特殊鑄鐵鑄物 : 日刊工業社 (日本), 177
- [7] 田中, 林松, 早川 : 鑄物, 23 (1951) 1
- [8] 牧野, 川井 : 日立評論, 34 (1952) 1037
- [9] A. F. Spengler and H. K. Briggs : The Ductile Iron Processing, 4 (1972) 135~142
- [10] J. Charbonnier, J. C. Maegerie : Recent Reasearch in Vast Iron, H. D. Merchant (New York : Gordon and Breach), (1964) 389~415
- [11] I. C. H. Hughes : Foundry Trade Journal, 110 (1961) 491~563
- [12] Metals Handbook : American Society for Metals, 8 (1973) 938
- [13] 최양진, 강인찬 : 한국주조공학회지, 7 (1987) 53
- [14] Kazuo Yamanaka et al : Trans. ISIT, 17 (1977) 92
- [15] 송병우, 박용진 : 한국주조공학회지, 13 (1993) 184