

.....
 論 文

구상흑연주철의 내마모성에 미치는 Sb 및 Sn 의 영향에 관한 연구

권 영 훈* , 김 창 규** , 김 복 석***
 김 성 한****, 천 병 옥****, 최 창 옥****

The Effects of Antimony and Tin Addition on the wear resistance properties of ductile cast iron

Young-Hoon Kwon*, Chang-Gyu Kim**, Buk-Suk Kim***
 Sung-Han Kim****, Byung-Wook Cheon****, Chang-Ock Choi****

Abstract

The effect of 0.01~0.10% Sb and Sn on the wear resistance of ductile cast iron was investigated. The hardness was increased with Sb to 0.10%, but the elongation and the impact value were decreased. The tensile strength was increased with up to 0.05% Sb, however decreased with 0.05~0.10% Sb. The hardness and the tensile strength were increased and the elongation was decreased with up to 0.10% Sn. The nodularity of graphite was decreased with above 0.08% Sb however Sn had no effect on that. When the maximum compressive stress was low (42kg.f/mm²), the weight loss was decreased with increased hardness and when that was high (54kg.f/mm² and 65kg.f/mm²), the weight loss did not depend upon the hardness. The pearlite stabilization with Sb and Sn increased with the wear resistance of ductile cast iron.

1. 서 론

주철은 재질의 고급화와 함께 보다 다양한 조건 하에서 사용가능한 재료가 요구되어 내마모, 내열, 내부식 및 고강도 등 보다 우수한 재료로 개발, 사용되고 있다. 공업용 재료로서 다양하게 요구되는 성질은 합금원소의 첨가, 응고, 열처리 등 여러가지 방법에 의하여 흑연의 형상 및 분포상태와 기지조직등을 변화시켜 사용되고 있다.¹⁻⁴⁾

특히 주철은 내마모성이 요구되는 분야에 사용

되고 있으나 강이나 기타의 재료와는 달리 비금속인 흑연이 기지내에 불규칙한 형태로 존재하기 때문에 그 마모양상이 복잡하여 주철의 종류에 따라서 마모특성이 각각 다르게 나타나고 있다. 주철의 내마모성은 주로 기지조직과 흑연조직 및 공정조직에 의하여 좌우되므로 적당한 합금원소를 첨가하여 기지조직을 개선시키고자 주철에 퍼얼라이트 안정화원소로 알려진 Sb 또는 Sn을 첨가하여 재질을 개선하고자 하는 연구가 수행되고 있다.⁵⁻¹⁰⁾

* 세신금속공업사 (SEISHIN FOUNDRY CO.)

** 부산공업대학 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Eng., Pusan National University of Technology)

*** 태주실업(주) (TAEJOO IND. CO. LTD)

**** 동아대학교 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Eng., Dong-A University)

따라서 본 연구에서는 구상흑연주철에 Sb 및 Sn을 각각 0.01~0.10% 범위로 첨가하여 기조직, 기계적 성질과 내마모성에 미치는 영향을 조사, 비교하였다.

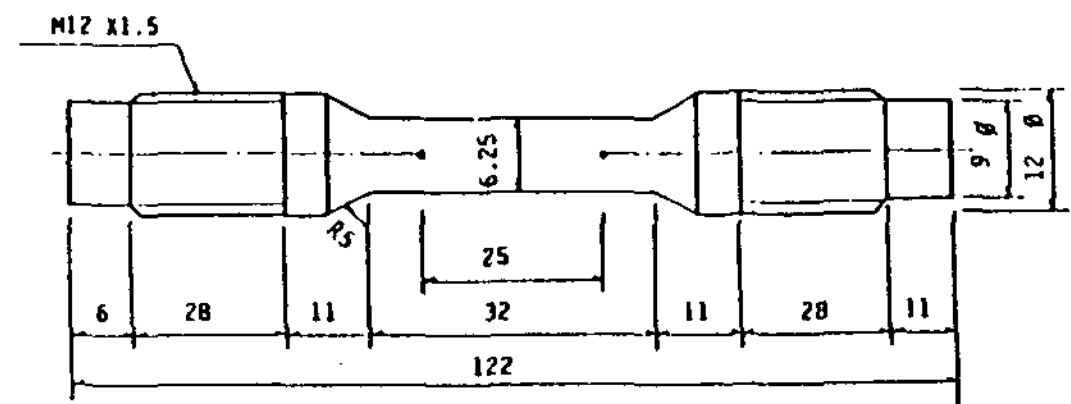
2. 실험방법

2.1 시편제작

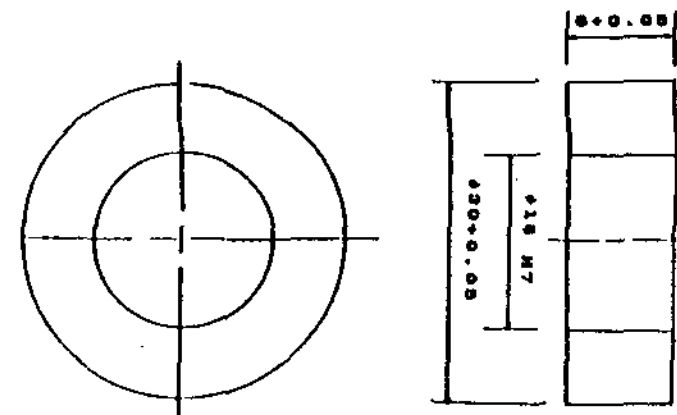
본 실험에 사용된 재료는 구상흑연주철용인 저 Mn 주철 및 강고철을 고주파유도로(용량 100kg)에 장입, 목표조성으로 용해, 샌드위치법으로 구상화처리 후, 후접종 시 Sb 및 Sn의 합금원소를 0.01~0.10% 범위로 각각 레들 첨가하여, Y-block형 CO₂주형에 주입하였다.

주조한 시료의 화학조성은 분광분석기(Spectrometer) 및 원자 흡광분석기(A.A)로 분석하였으며 분석결과는 Table 1 과 같다.

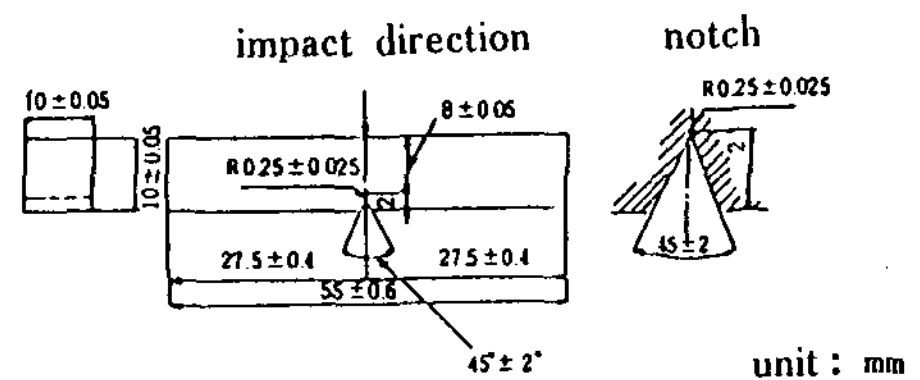
주조한 Y-block형 시료를 Fig.1.에 표시한 형상 및 크기의 인장시험편(ASTM A-370), 마모 시험편(Amsler type) 및 충격시험편(ASTM E-23)으로 각각 가공하였으며, 마모시험의 상대 시험편은 시판하는 탄소강(S45C)을 동일 형상의 크기로 가공하여 침질탄화 처리 후 표면경도를 HRC60 이상이 되도록 제작하였다.



(a) Tensile test specimen



(b) Wear test specimen



(c) Impact test specimen

Fig. 1. Schematic diagram of various test specimens.

Table 1. Chemical composition of specimens.

specimen	composition								
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Sb	Sn	C.E.
Sb, Sn 0.00	3.82	2.39	0.137	0.049	0.012	0.39	-	-	4.61
Sb 0.01	3.81	2.36	0.135	0.039	0.014	0.38	0.010	-	4.59
Sb 0.03	3.79	2.35	0.133	0.036	0.013	0.39	0.031	-	4.57
Sb 0.05	3.79	2.40	0.134	0.036	0.012	0.37	0.048	-	4.59
Sb 0.08	3.68	2.41	0.135	0.031	0.012	0.35	0.086	-	4.48
Sb 0.10	3.75	2.37	0.138	0.049	0.013	0.37	0.110	-	4.54
Sb 0.01	3.80	2.30	0.130	0.035	0.012	0.39	-	0.012	4.56
Sb 0.03	3.76	2.25	0.137	0.032	0.012	0.38	-	0.033	4.51
Sb 0.05	3.75	2.36	0.140	0.035	0.010	0.41	-	0.051	4.53
Sb 0.08	3.78	2.35	0.139	0.040	0.013	0.38	-	0.087	4.56
Sb 0.10	3.73	2.38	0.136	0.045	0.012	0.34	-	0.108	4.52

2.2 실험방법

주조한 시료의 마모시험편 가공시 중심부를 절단하여 Sb 및 Sn 첨가량에 따른 조직변화와 마모 시험 후 마모특성을 고찰하기 위하여 광학현미경 및 주사전자현미경을 사용하였다.

인장시험은 인스트론 인장시험기에 의하여 최대하중 10ton 및 cross head speed를 2mm/min 로 실시하였으며 경도는 브리넬 경도시험기와 미소 비커스경도시험기에 의하여 측정하였다.

충격시험은 상온에서 샤피 충격시험을 이용하여 해머인상각을 141.2°로 실시하였으며 이때 충격속도는 5.52m/sec로 하였다.

마모시험은 Amsler-type로링 마모시험기로 실시하였다. 마모시험방법은 대기중에서 무윤활 건식상태로 Fig.2 와 같이 상하 시험편의 회전수를 727rpm 및 800rpm으로 상이하게 하여 sliding ratio를 9.09%로 하였다.

또한 회전수를 $1 \times 10^4 \sim 11 \times 10^4$ 으로 변화시키면서 30kg, 50kg 및 70kg 의 압축하중으로 상부에서 가하였다. 가해진 압축하중 P를 접촉면내의 최대압축응력 $42kg \cdot f/mm^2$, $54kg \cdot f/mm^2$ 및 $65kg \cdot f/mm^2$ 으로 하였다.

한편 화학천칭을 사용하여 각 시험편의 마모시험 전 후 무게 감량을 10^3gr 까지 측정하여 마모량으로 나타내었다.

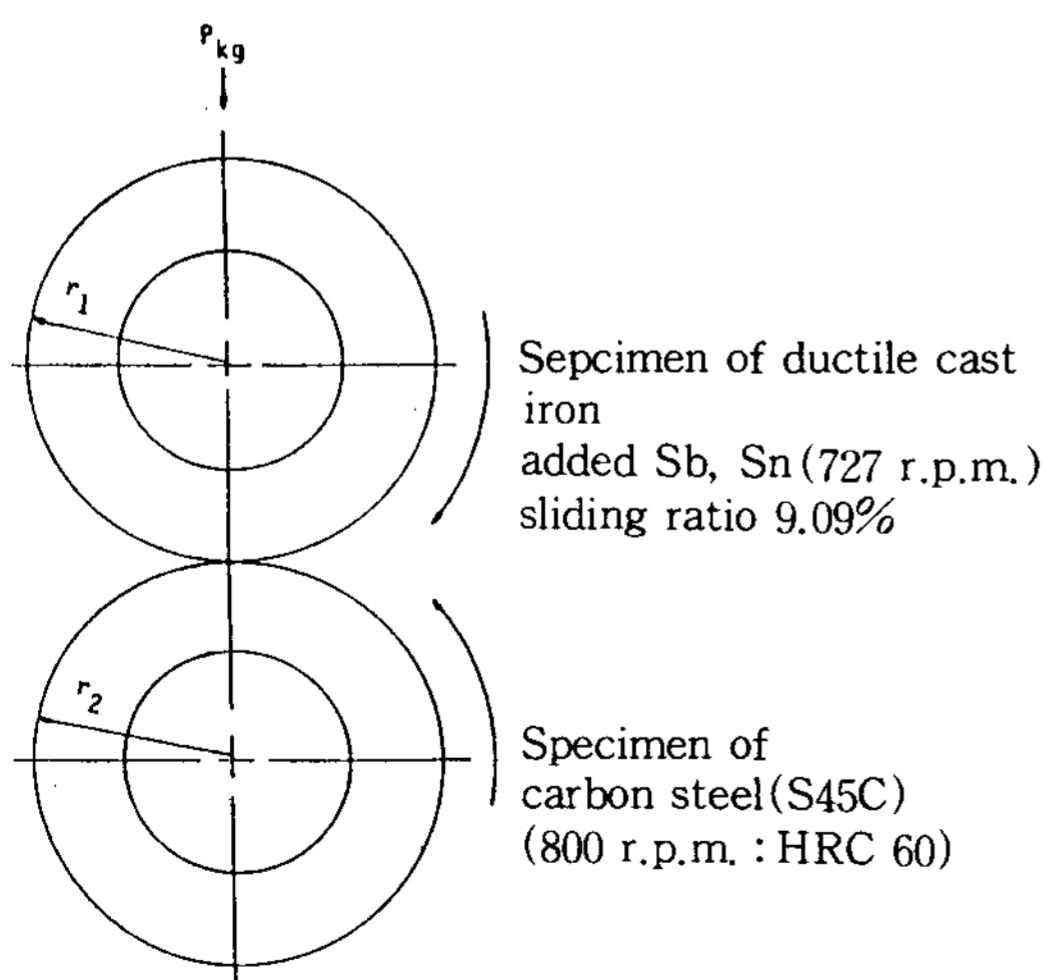


Fig. 2. Schematic representation of Amsler type wear test.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 합금원소에 의한 조직변화

Photo1 은 구상흑연주철의 기지조직에 미치는 Sb량의 영향을 나타낸 것으로서 Sb를 함유하지 않은 시료는 Bull's eye 조직으로서 흑연립이 다소 조대화 되었으나 0.08%Sb 까지는 페라이트량은 감소하고 퍼얼라이트량이 증가되었다. 또한 0.10%Sb 에서는 페라이트가 감소되어 완전 퍼얼라이트화 하였다. 따라서 주철의 조직에 미치는 Sb의 가장 큰 효과는 퍼얼라이트 안정화이며 퍼얼라이트가 형성되는 704~538°C 온도범위에서 오스테나이트 ⇒ 페라이트 변태를 지연시킬 뿐 만 아니라 퍼얼라이트 중의 페라이트에 고용되어 퍼얼라이트 미세화와 고용강화에 기여하는 것으로 보고^{11, 12)}되고 있다. 또한 Sb량이 많을수록 흑연립이 미세화되고 불균일한 분포상태를 나타내었다. 이는 구상흑연주철의 퍼얼라이트 안정화 원소인 Sb를 함유함으로써 흑연립인 탄소가 페라이트내로 확산되어 흑연립이 미세화되고 또한 불균일한 분포 상태는 Sb의 미세편석에 기인하는 것으로 사료되었다.^{5, 6)}

구상흑연주철의 조직에 미치는 Sn의 영향을 Photo2 에 나타내었다. Sn량이 증가할수록 Sb의 영향과 동일하게 Bull's eye 조직의 페라이트가 감소하면서 기지조직은 퍼얼라이트로 흑연립이 미세화 되었다.

Sn 함유량이 증가할수록 Sb와 같이 흑연립의 구상화를 저하현상은 나타나지 않고 오히려 미세 균일한 분포현상을 나타내었다. Sn의 퍼얼라이트 안정화작용이 Sb의 1/2정도로서 미세편석현상이 잘 나타나지 않으므로 흑연립 불균일분포나 구상화를 저하현상이 나타나지 않은 것으로 사료되었다. 특히 0.08%Sn에서 기지조직의 퍼얼라이트가 현저하게 나타나고 있으며 0.10%Sn 에서는 완전 퍼얼라이트화 하였다.^{13, 14)}

3.2 합금원소에 의한 기계적 성질변화

구상흑연주철의 인장강도, 연신율, 경도 및 충격치에 미치는 Sb의 영향을 Fig.3 에 나타내었다. Sb량이 증가하면 경도는 상승하나 인장강도는 0.08%Sb에서는 감소하는 경향을 나타내고 있으며 또한 연신율은 0.03%Sb 에서 급격히 감소하였다. 일반적으로 경도가 증가하면 인장강도는 상승하는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 Sb량

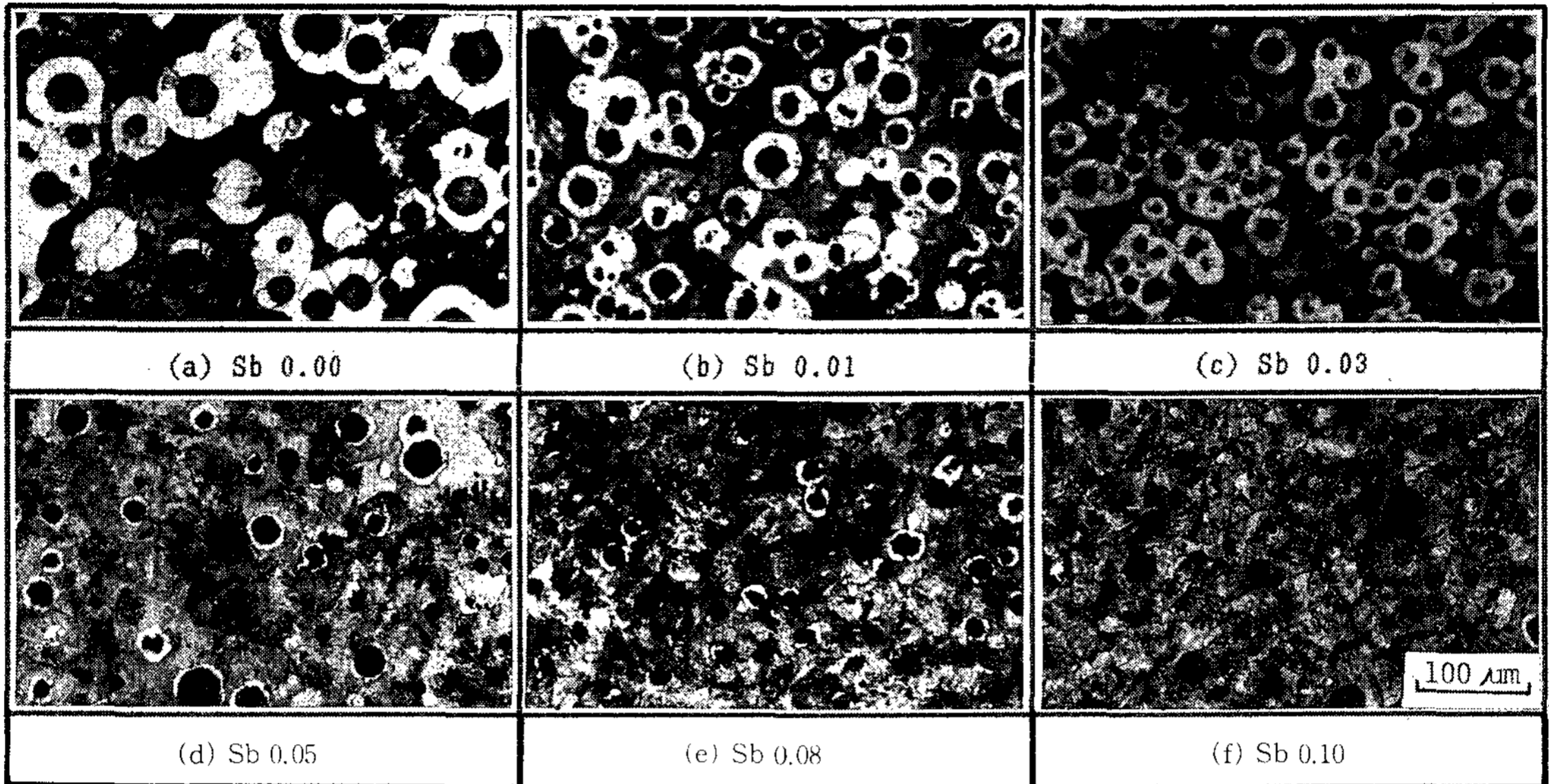


Photo 1. Optical microstructures of ductile cast iron with respect to Sb content.

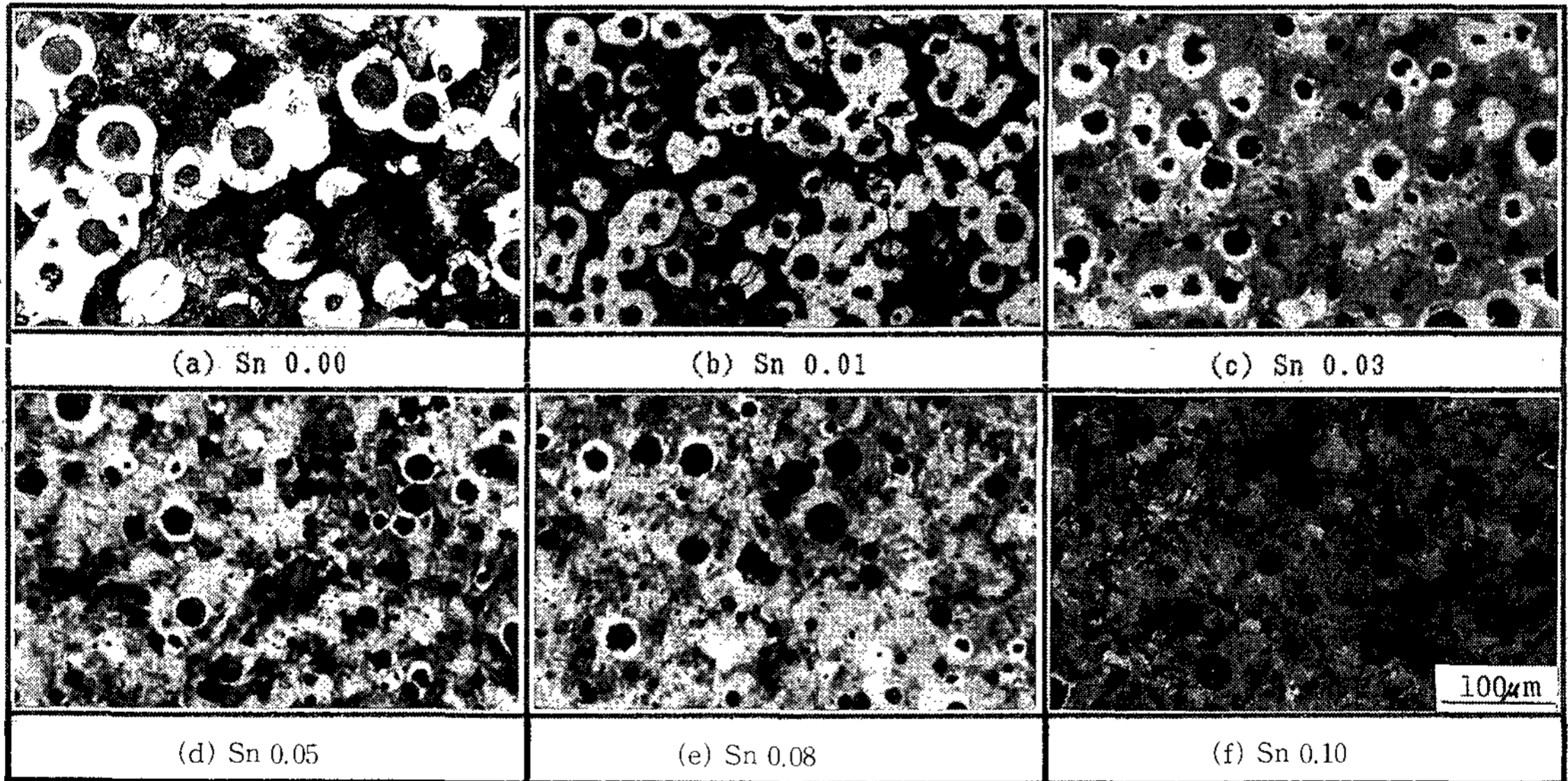


Photo 2. Optical microstructures of ductile cast iron with respect to Sn content.

의 증가에 의하여 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Sb량이 증가하면 퍼얼라이트는 미세화하나 0.08%Sb 이상에서는 흑연화저해원소로 작용하여 구상화율을 급격히 저하시키므로 인장강도가 감소하는 것으로 사료되었다. 구상화율을 저해하는 Sb에 대하여 많은 연구결과가 보고^{15, 16)} 되고 있지만 그 적정량에 대해서는 연구자에 따라서 다소

다른 견해를 나타내고 있다.

또한 0.03%Sb 에서는 Sb의 미세편석 현상에 의해 퍼얼라이트 경도값의 편차가 크게 나타나며 0.01%Sb에 비하여 페라이트량이 감소하는 경향이 크게 나타나므로 연신율이 급격히 감소되는 것으로 사료되었다. 충격치에 미치는 Sb의 영향은 Sb량이 증가하면 충격치는 감소하는 것으로 연신

율과 거의 유사한 경향성을 나타내었다.

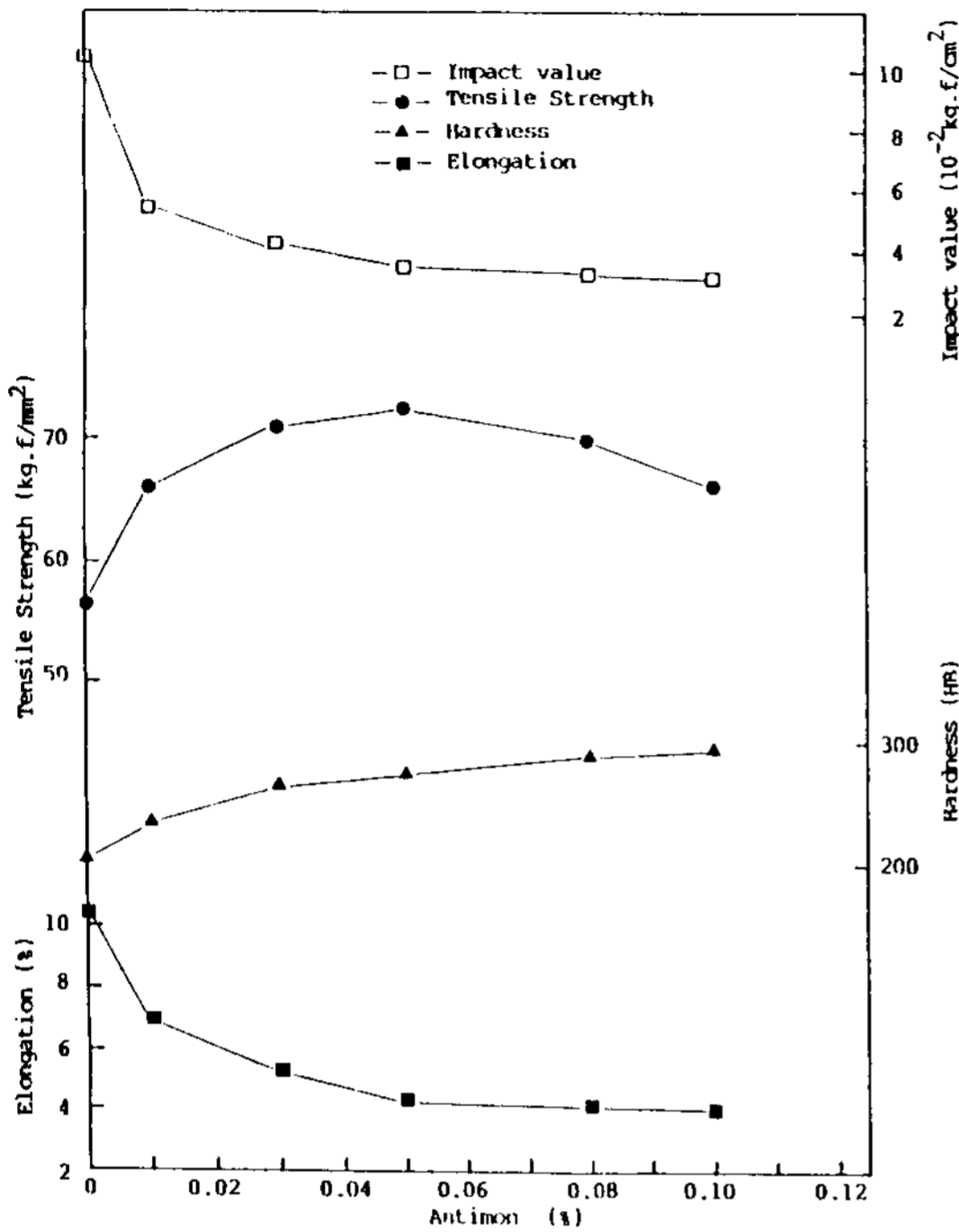


Fig. 3. Effect of Sb content on the impact value, tensile strength, hardness, and elongation of ductile cast iron.

Fig. 4 는 구상흑연주철의 인장강도, 경도, 연신을 및 충격치에 미치는 Sn의 영향으로서 Sn량이 증가하면 인장강도 및 경도는 증가하고 연신율은 감소경향을 나타내었다. 한편 Sb보다 경도가 다소 낮게 나타내었으나 Sn량의 증가에 따라 인장강도의 저하현상은 거의 나타나지 않았으며 경도값의 편차도 작게 나타내었다.

이는 0.01~0.10%Sn에서 구상화율 저하현상이 나타나지 않고 Sn량에 의하여 퍼얼라이트 조직이 미세화되는 것에 기인한다고 사료되었다. 또한 Sb에 비하여 연신율은 다소 높은 값으로 0.01%Sn에서 가장 높게 나타 내었다. Sn량이 증가 하면 흑연립은 미세화 되며 Bull's eye 조직의 페라이트량이 많이 잔존하므로 연신율이 높게 나타나는 것으로 사료되었다.

충격치는 Sn량의 증가에 따라서 감소하며 연신율과 유사한 경향을 나타내었으나 Sb의 영향 보다 다소 높은 값을 나타내었다. Sb의 영향과 비교하여 퍼얼라이트 경도값의 편차가 작기 때문이

라고 사료되었다.

Sb 및 Sn 의 함유량에 의한 구상흑연주철의 경도변화는 Sb 및 Sn량이 증가할수록 경도는 대체로 상승하였다. Sb의 퍼얼라이트 안정화작용에 의해 초기 Bull's eye 조직의 페라이트가 퍼얼라이트변태에 의한 것으로 사료되어지며 0.01~0.03%Sb 범위에서 경도의 급상승은 흑연립의 미세화 및 페라이트의 감소현상이 많고 0.03~0.10%Sb 범위에서는 페라이트 감소현상이 작게 나타나는 것으로 사료되었다.

또한 Sn에 비하여 Sb가 높은 경도를 나타내고 있는 것은 퍼얼라이트 안정화에 미치는 Sn의 영향보다는 Sb의 영향이 크게 작용하는 것으로, 퍼얼라이트 안정화에 미치는 Sb의 영향은 Sn의 2배, Cu의 약 50배로 보고 되고 있다.¹⁷⁾

퍼얼라이트의 정도에 미치는 Sb 및 Sn량의 영향을 Fig.5 에 나타내었다. Sb 및 Sn 량이 증가할수록 퍼얼라이트 정도는 증가하고 있으며 Sn에 비하여 Sb의 경우 퍼얼라이트 정도는 다소 높게

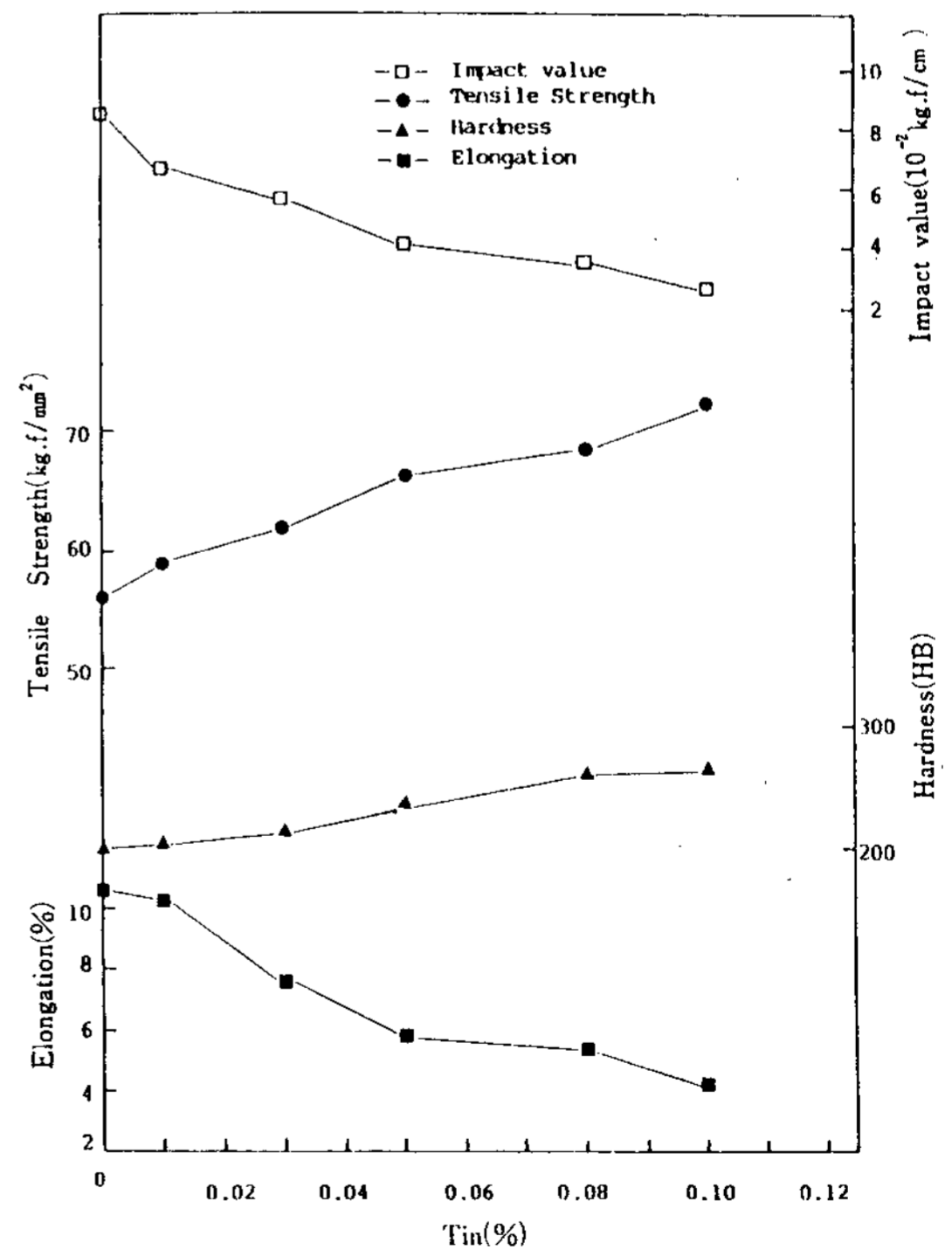


Fig. 4. Effect of Sn content on the impact value, tensile strength, hardness, and elongation of ductile cast iron.

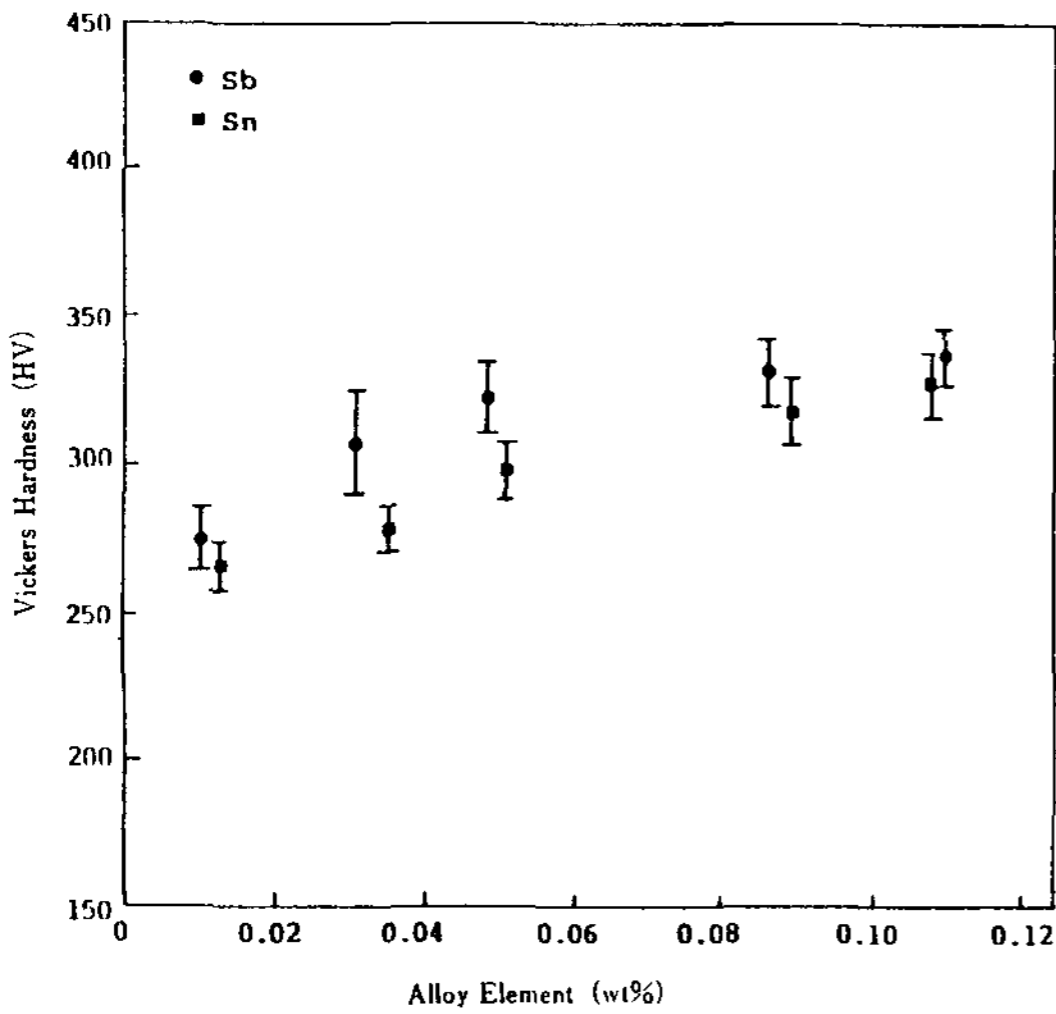


Fig. 5. Effect of Sb and Sn content on the hardness of pearlite of ductile cast iron.

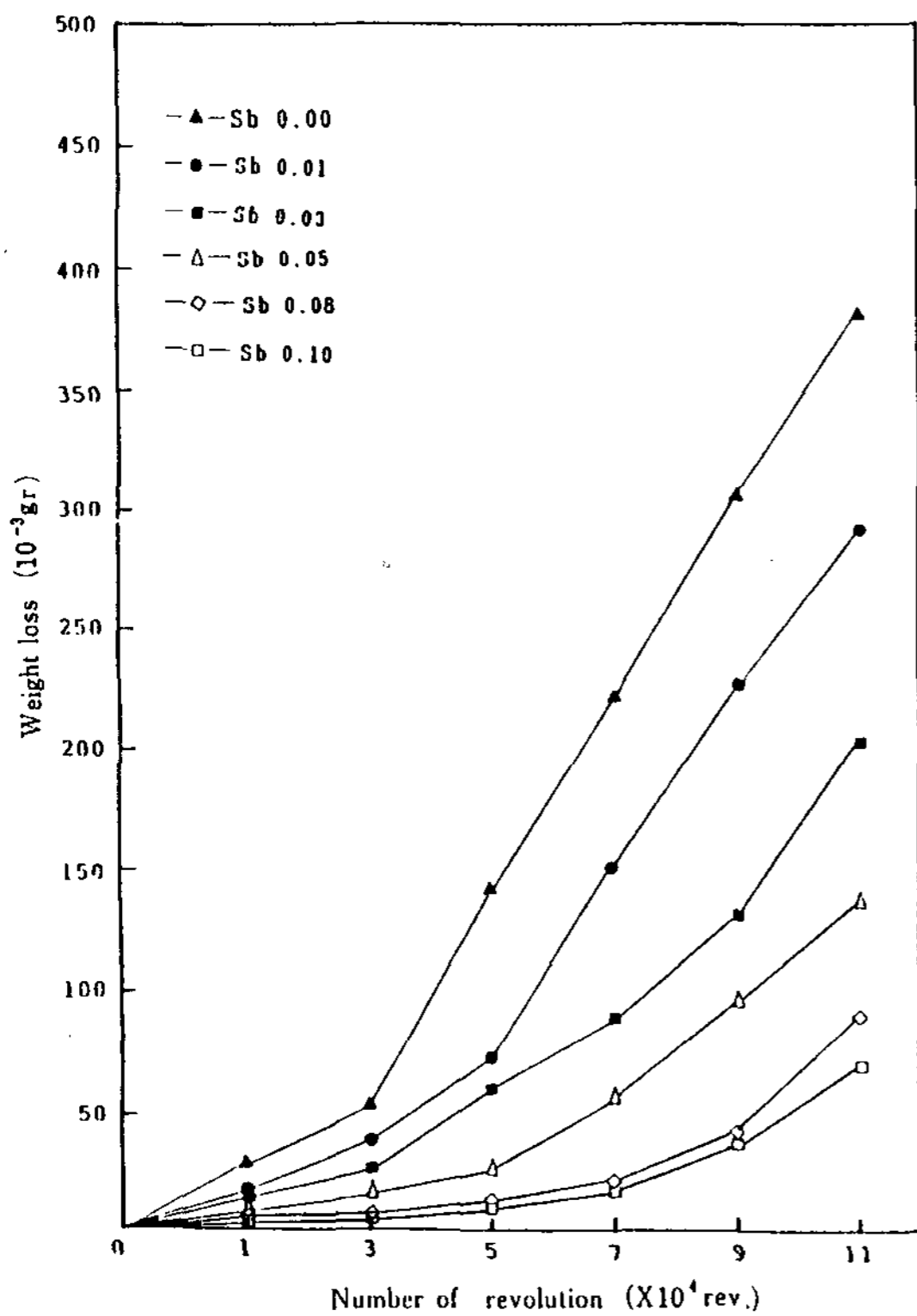


Fig. 6. Relation between weight loss and the number of revolution for ductile cast iron with respect to Sb content under the condition of maximum compressive stress 42kg.f/mm², sliding ratio 9.09%.

나타내었다. Sn에 비하여 Sb가 더 강력한 퍼얼라이트 안정화제로 작용하므로 퍼얼라이트 중의 페라이트에 Sb가 고용되어 강화되므로 경도가 높게 나타나는 것으로 추정되었다.

3.3 마모량에 미치는 최대압축응력의 영향

Fig.6 에서 Fig.11 까지는 Sb 및 Sn량에 의한 회전수 및 최대압축응력¹⁸⁾ 과 마모량의 관계를 나타내었다. 회전수와 최대압축응력이 증가할수록 마모량은 증가하였다. 이는 로링 마모이론곡선¹⁹⁾ 과 유사한 경향을 나타내고 있으며 마모량과 회전수(시간)에 대한 Holm의 이론과 거의 일치하였다.^{20, 21, 22)}

Fig.6 에서 Fig.9 까지는 최대압축응력 42kg.f/mm² 및 54kg.f/mm² 로 마모시험한 결과로서 초기 1×10⁴~3×10⁴ 회전까지는 마모량이 작게 나타나고 5×10⁴~11×10⁴ 회전범위에서는 급

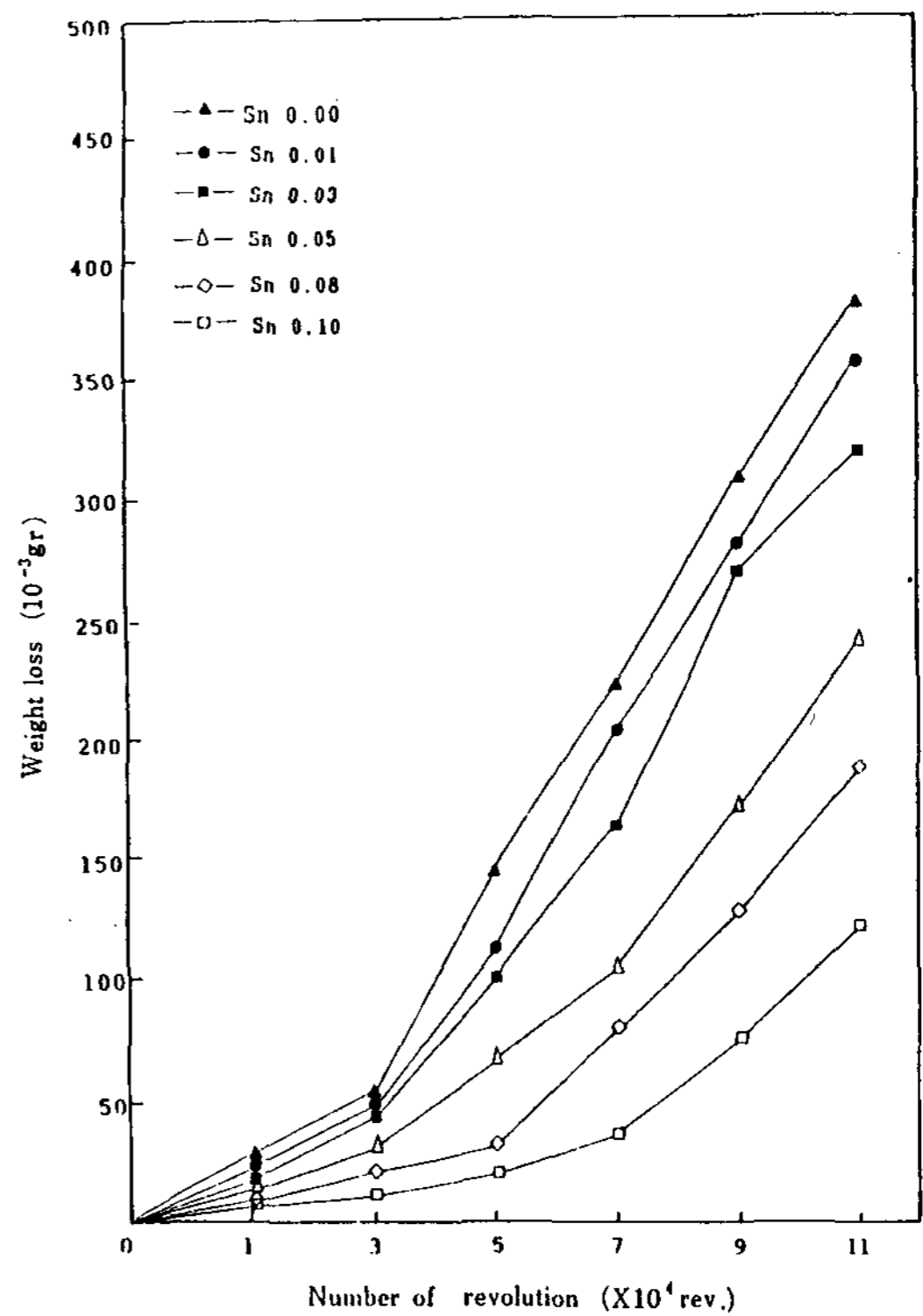


Fig. 7. Relation between weight loss and the number of revolution for ductile cast iron with respect to Sn content under the condition of maximum compressive stress 42kg.f/mm², sliding ratio 9.09%.

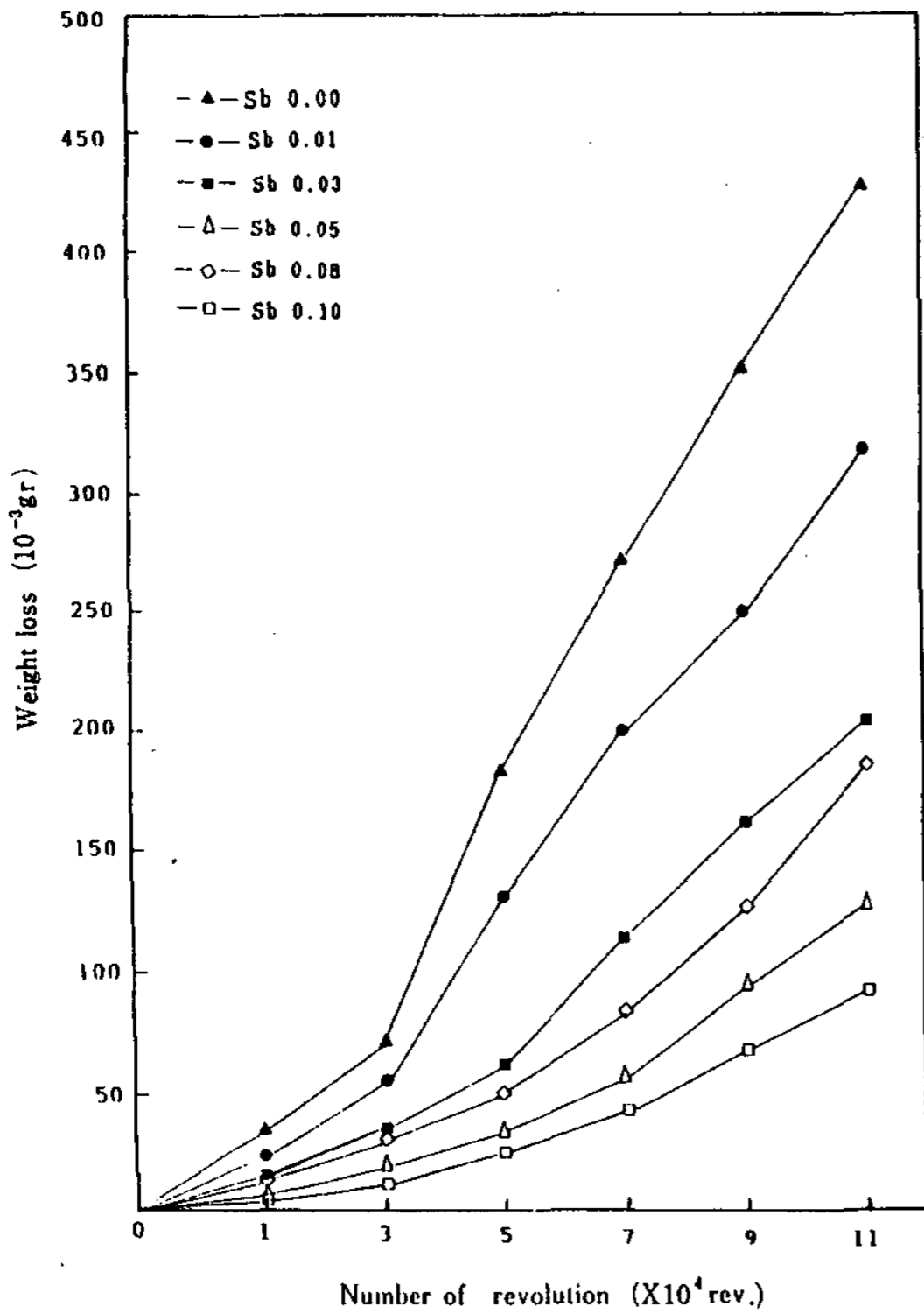


Fig. 8. Relation between weight loss and the number of revolution for ductile cast iron with respect to Sb content under the condition of maximum compressive stress 54kg.f/mm², sliding ratio 9.09%.

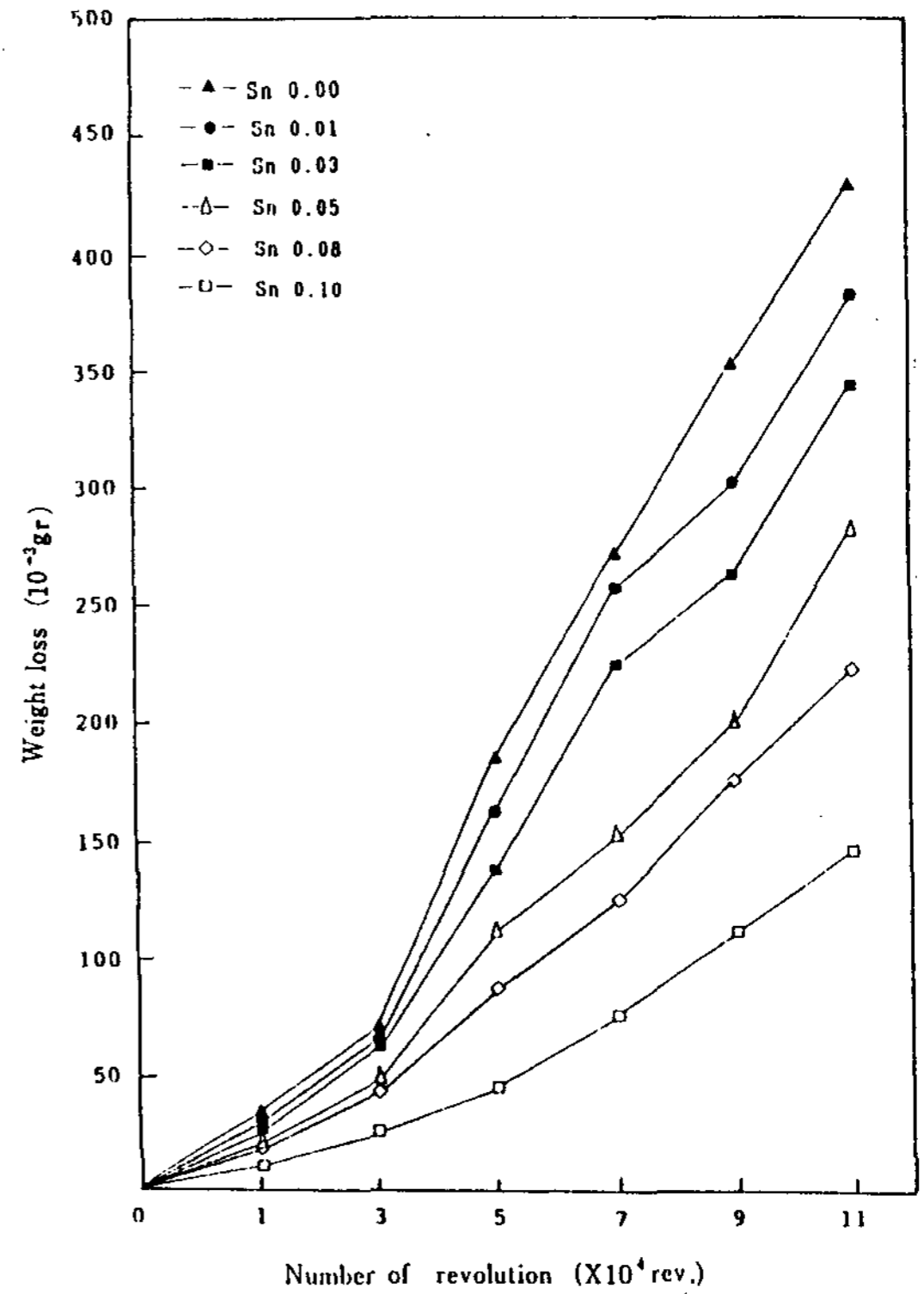


Fig. 9. Relation between weight loss and the number of revolution for ductile cast iron with respect to Sn content under the condition of maximum compressive stress 54kg.f/mm², sliding ratio 9.09%.

증하였다. 이는 초기 미끌림마모에 의한 응착마모 및 마모에 미치는 인자가 복합적으로 작용하여 정상 마모현상이 나타나지 않기 때문에 마모량이 작게 나타나며 회전수가 증가함에 따라 마모면에 작용하는 반복피로응력에 의해서 발생하는 균열에 의한 pitting 마모현상으로 마모량이 급증하는 것으로 사료되었다.

Fig.10 및 Fig.11.는 최대압축응력 65kg.f/mm²으로 마모시험한 결과로서 초기마모량이 작게 나타나는 현상은 거의 찾아 볼 수 없으며 1×10⁴ 회전부터 마모량은 크게 나타내었다. 이는 마모시험시 최대압축응력 65kg.f/mm²의 고하중으로 실시함으로 초기 미끌림 마모 및 복합마모 현상의 단계가 짧아지고 거의 모든 구간에 로링마모의 정상마모현상이 나타나므로 마모량이 크게 나타나는 것으로 사료되었다.²³⁾

3.4 마모량에 미치는 합금원소의 영향

금속의 경도는 금속의 마모에 미치는 가장 중요한 인자로서 내마모성에 미치는 영향에 대하여 제시하고 있다. 일반적으로 윤활의 유무에 관계없이 마모량은 경도의 상승과 함께 감소하지만 로링마모에서는 이러한 이론에 완전일치하지 않는 것으로 보고되고 있다.²³⁾

Fig.12는 최대압축응력과 11×10⁴ 회전마모시험시 마모량에 미치는 합금원소와 경도의 영향을 나타낸 것으로서 합금원소량이 증가할수록 경도는 증가하며 마모량은 감소함을 나타내었다.

최대압축응력 42kg.f/mm²에 있어서 Sn에 비하여 Sb의 경우 마모량이 낮은값을 나타내었다. 이는 퍼얼라이트 조직 미세화에 따른 경도의 상승에 기인하며 구상화울 저하에 의해 기계적 성질이 감소하는 0.08~0.10%Sb에서 마모량이 작게 나

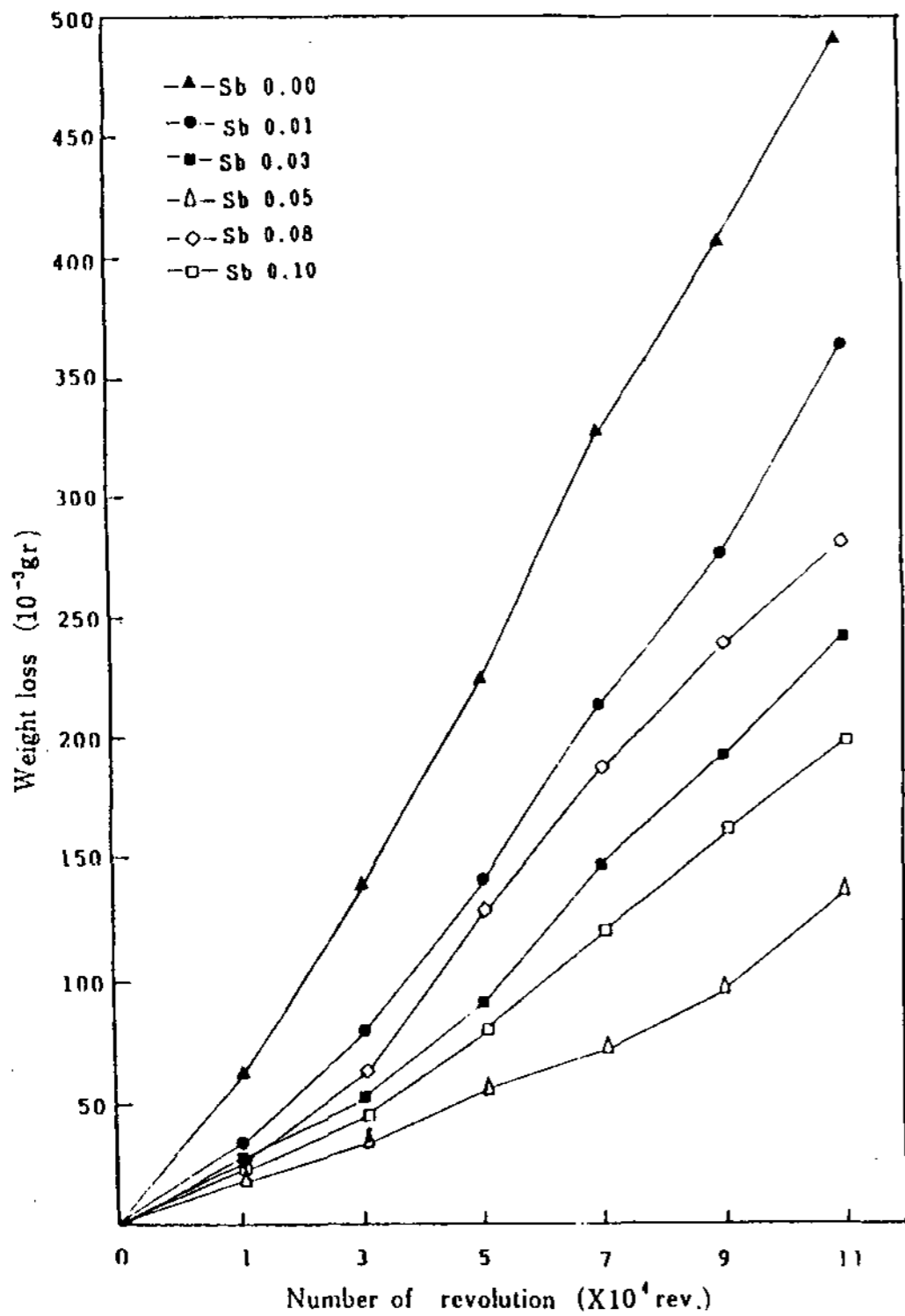


Fig. 10. Relation between weight loss and the number of revolution for ductile cast iron with respect to Sb content under the condition of maximum compressive stress 65kg.f/mm², sliding ratio 9.09%.

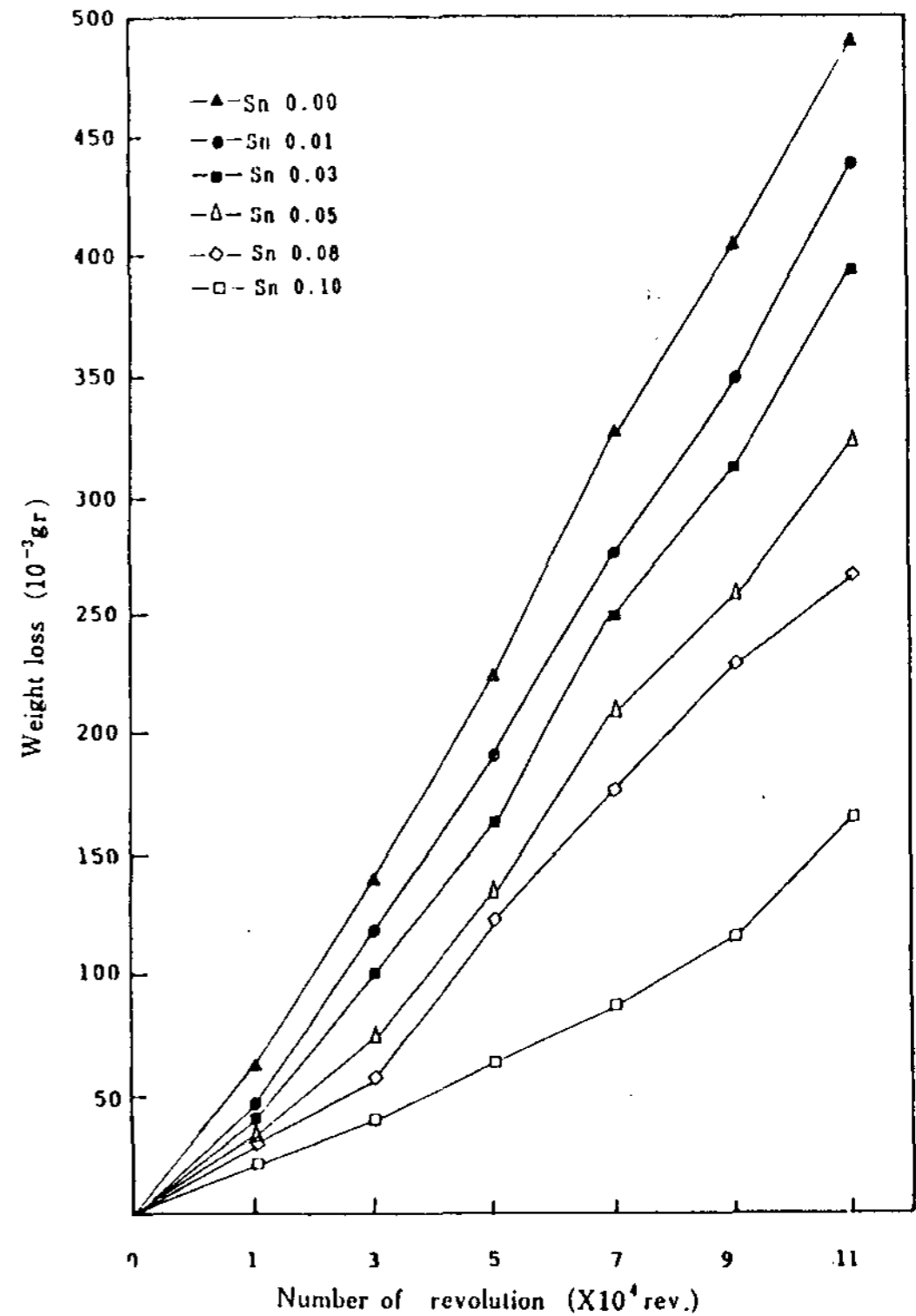


Fig. 11. Relation between weight loss and the number of revolution for ductile cast iron with respect to Sn content under the condition of maximum compressive stress 65kg.f/mm², sliding ratio 9.09%.

타내는 것으로 흑연의 형상이 마모량에는 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료되었다.

최대압축응력 54kg.f/mm²에서는 Sn량이 증가하면 마모량은 감소하나 Sb는 0.05%Sb까지는 마모량이 감소하지만 0.08%Sb에서는 오히려 크게 증가하였다. 금속의 마모에 미치는 인자중 경도의 영향이 크게 작용하지만 로링 마모는 마모면에 작용하는 반복피로응력에 의하여 균열이 발생되어 pitting 마모현상이 나타나므로 고하중, 고회전수 일수록 취성을 갖고 있는 재료는 경도가 높다하여도 마모면에 발생하는 균열의 전파속도가 빨라 심한 pitting 현상이 나타나는 것으로 사료되었다. 한편 0.10%Sb에서 마모량이 다시 감소하는 것은 기계적 성질이 다소 저하되지만 고경도이면서 퍼얼라이트 정도값의 분포도가 균일하게 기지조직이 완전 퍼얼라이트화 하였으므로 경

도값의 편차가 심한 재질에 비하여 pitting 마모 현상이 늦게 발생될 것으로 추정되었다.

또한, 최대압축응력 65kg.f/mm²에서 마모량은 Sn의 경우 최대압축응력 54kg.f/mm²와 동일한 경향을 나타내고 있지만 Sb는 0.05%Sb에서 최소값을 나타내며 0.08%Sb에서 급증하다가 0.10%Sb에서 오히려 감소하였다. 또한 0.08~0.10%Sb는 동일량의 Sn에 비하여 마모량을 크게 나타내었다. 이는 Sb보다 Sn을 함유한 시편의 경도가 작게 낮지만 인장강도, 연신율 및 충격치는 높게 나타내고 있으며 또한 퍼얼라이트 정도값의 분포가 더 균일하므로 고하중, 고회전수에서 발생하는 pitting 마모현상이 다소 완화된 것으로 사료되었다.

3.5 마모면의 관찰

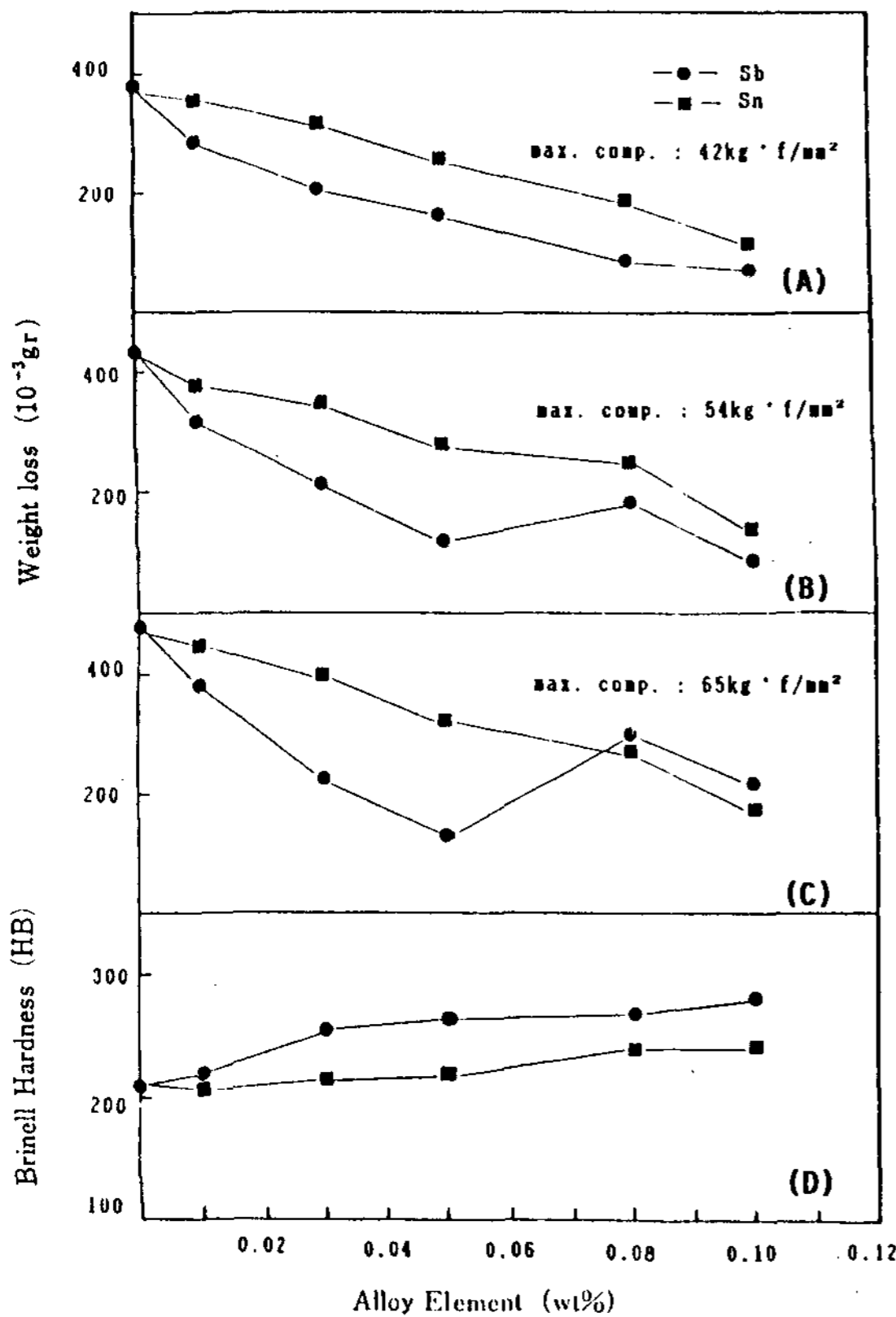


Fig. 12. Relation between weight loss and hardness for ductile cast iron with respect to Sb and Sn content under the condition of sliding ratio 9.09%, 11×10^4 revolution.

Photo3 및 Photo4 는 최대압축응력 42kg. f/mm² 에서 11×10^4 회전으로 마모시험 한 마모면을 나타내었다. 저하중에서의 마모량은 경도값에 의존하여, 경도가 높은 시험편일수록 마모량은 작고 pitting 마모현상에 의한 마모면의 손실정도도 작게 나타내었다. Sb 및 Sn를 함유하지 않은 시험편인 Photo3 (a) 및 Photo4 (a)는 마모면이 깊게 패인 부분을 많이 나타내고 있으나, 경도가 높은 시험편일수록 pitting 마모현상보다는 휘면 마모면을 많이 나타내었다. Photo5 및 Photo6 은 마모면을 SEM 관찰한 것으로 Sb 및 Sn을 함유하지 않은 Photo5 (a) 및 Photo6 (a)는 마모면에 심한 pitting 현상이 발생하여 마모면이 많이 떨어져 나갔음을 알 수 있으나 경도가 높은 시험편일수록 마모면에 발생하는 균열 정도를 작게

나타내었다.

4. 결 론

구상흑연주철에 Sb 또는 Sn 합금원소를 0.01~0.10% 범위로 각각 첨가한 경우 내마모성에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구상흑연주철에 Sb량이 증가하면 경도는 상승하고 연신율과 충격치는 감소하며, 인장강도는 0.05%Sb까지는 증가하나 그 이후는 감소경향을 나타내며 또한 Sn량이 증가하면 경도 및 인장강도는 상승하나 연신율과 충격치는 감소하였다.
2. 0.08%Sb 이상에서는 흑연의 구상화율이 저하하나 Sn는 흑연의 구상화율에 영향을 미치지 않았다.
3. 최대압축응력이 저하중(42kg.f/mm²) 일 때 마모량은 경도가 높으면 감소하나 고하중(54kg.f/mm², 65kg.f/mm²)일 때는 경도값에 의존하지 않는 경향을 나타내었다.
4. Sb 및 Sn에 의한 기지조직의 퍼얼라이트화는 내마모성 향상을 기대할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1990년도 산학협동재단 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H.Fredriksson and M.Hillert : The British Foundryman, 64(1970), 54
2. H.T.Angus : Cast Iron, Butter Worth Co. (1976), 172
3. 日本鑄物協會 : 鑄物便覽(1978), 981
4. Ch.Viswanadham, A.K.Patwardham and M.L.Mehta : Giesserei, 73(1986), 238~239
5. 田中, 材松, 早川 : 鑄物, 23(1951), 1, 1
6. H.Morrogh : AFS Transaction, 60(1952), 439
7. E.Campomanes : AFS Transaction, 79(1971), 57
8. P.Pelleg : AFS Transaction, 70(1962), 666
9. E.Voros : 36th International Foundry Con-

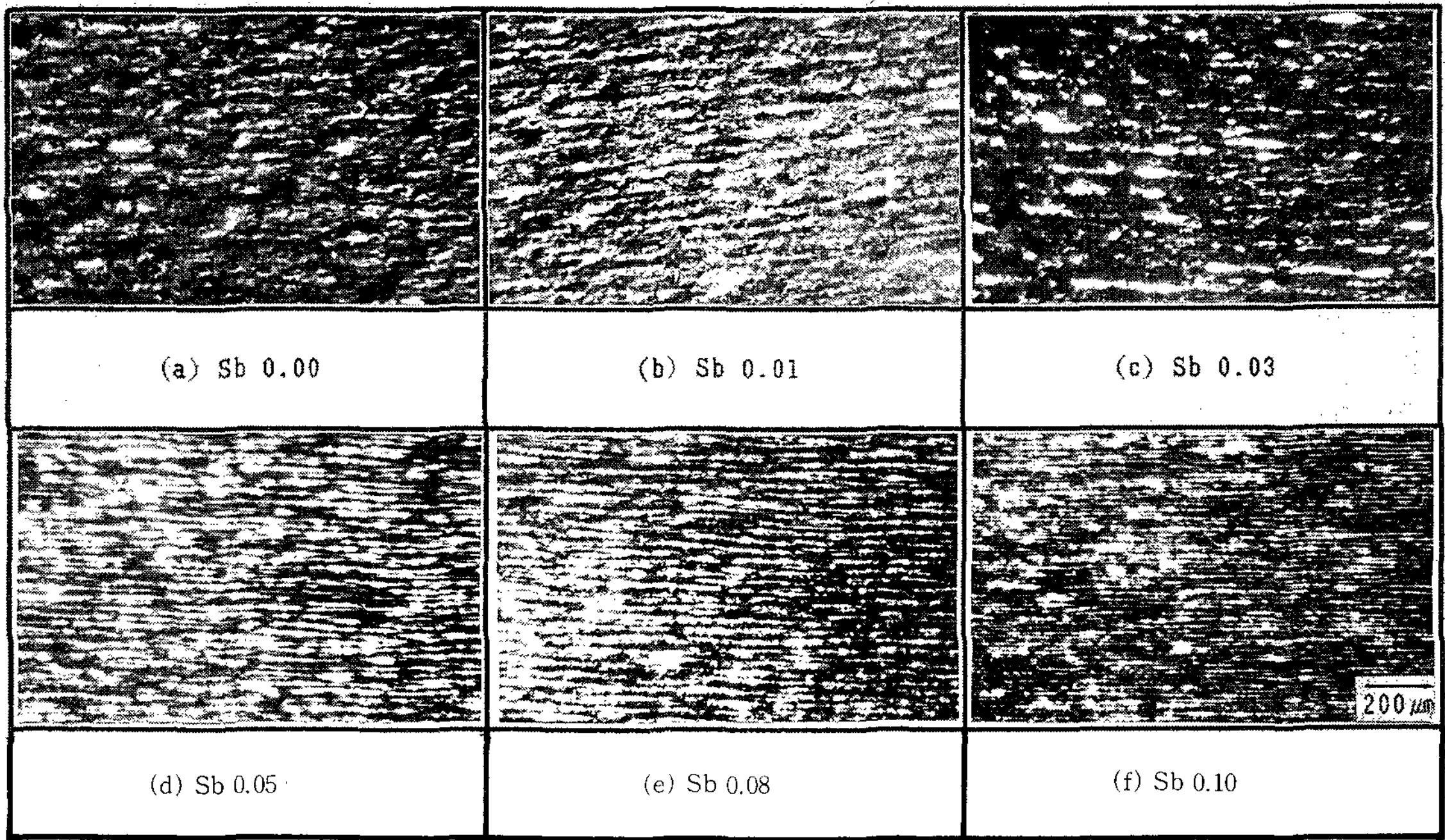


Photo 3. Macrostructures of wear surface with respect to Sb content under the condition of maximum compressive stress 42kg.f/mm², sliding ratio 9.09%, 11×10⁴ revolution.

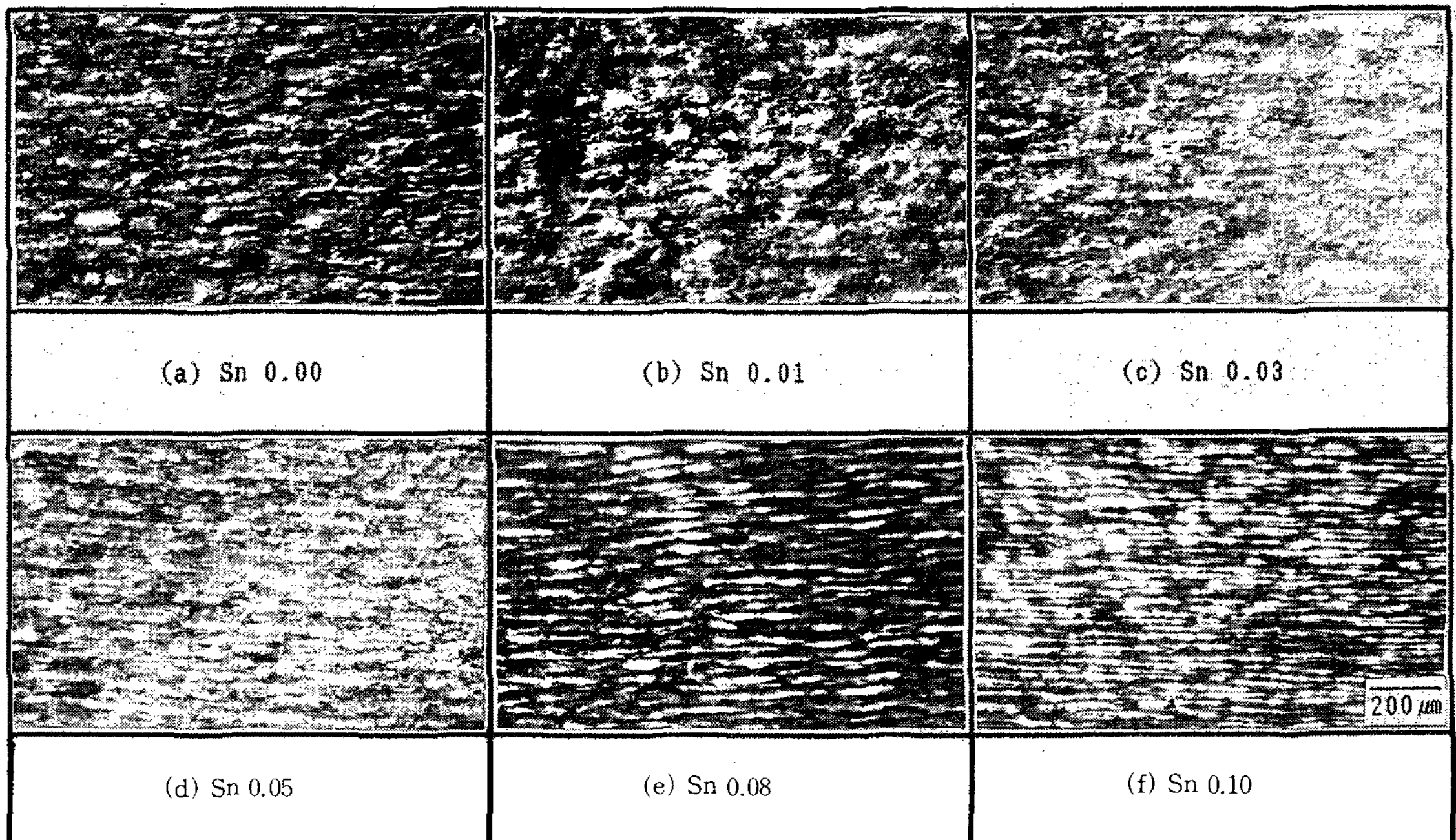


Photo 4. Macrostructures of wear surface with respect to Sn content under the condition of maximum compressive stress 42kg.f/mm², sliding ratio 9.09%, 11×10⁴ revolution.

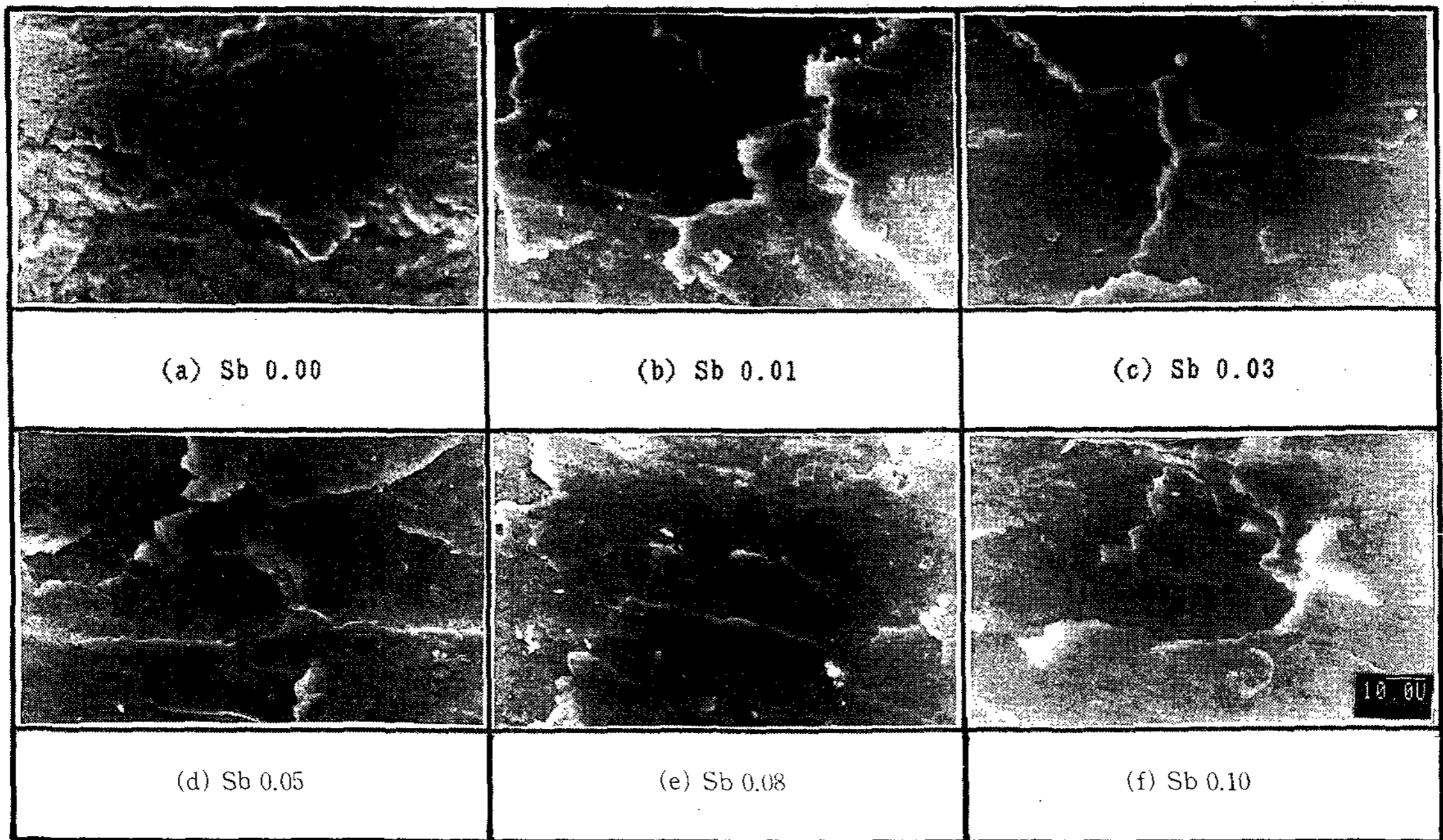


Photo 5. SEM microstructures of wear surface with respect to Sb content under the condition of maximum compressive stress 42kg.f/mm², sliding ratio 9.09%, 11×10⁴ revolution.

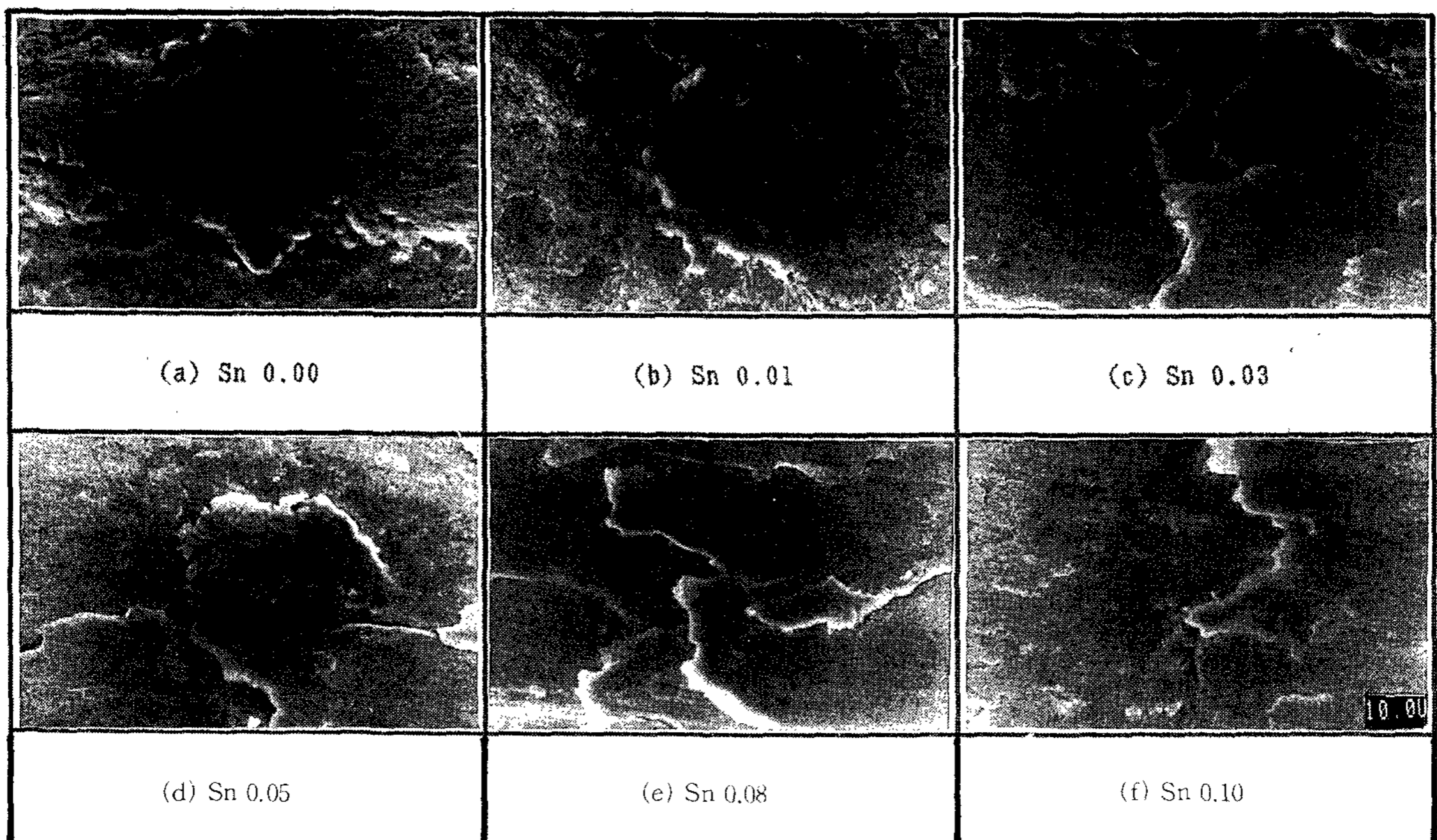


Photo 6. SEM microstructures of wear surface with respect to Sn content under the condition of maximum compressive stress 42kg.f/mm², sliding ratio 9.09%, 11×10⁴ revolution.

- gress(1969)
10. R.H.Aborm : AFS Transaction, 84(1976), 503
 11. 日本鑄物協會 : 鑄物分科委員會 報告書(1984), 5
 12. 山田, 葉山 : 鑄物, 48(1976), 4, 234~239
 13. BCIRA Broadsheet, 284(1988)
 14. BCIRA Broadsheet, 211~8(1987)
 15. C.Bates and J.F.Wallace : AFS Transaction, 82(1974), 571
 16. 李炳華, 李啓完 : 鑄造, 4(1984), 4, 266
 17. Oswald Kabaschewsk : Iron-Binary Diagrams, 128(1982)
 18. N.P.Suh : Wear, 25(1973), 111
 19. F.Hayama : Principle of Wear Phenomenon for Metal and Alloy(1978)
 20. J.F.Archard : Journal of Applied Physics (1953), 981
 21. G.L.Shelden : Journal of Engineering Material and Technology(1977), 4, 133
 22. R.E.Richardson : National Institute of Agriculture Engineering (1966), 18
 23. 日本鑄物協會 : 鑄鐵分科委員會 報告書(1984), 64