

論 文

## 다합금 백주철의 미끄럼 마모특성에 미치는 코발트 첨가의 영향

이한영<sup>†</sup>

### The Effects of Cobalt Addition on Sliding Wear Properties of Multi-component White Cast Iron

Han-Young Lee<sup>†</sup>

#### Abstract

Effects of Co addition on sliding wear properties of multi-component white cast iron were investigated. The microstructures of multi-component white cast iron containing from 0%Co to 10%Co exhibited little difference. However, the hardness increased with an increase of the Co content. Increasing the Co content, wear properties were improved and the iron oxide on worn surface was increased in the low sliding speed range of the steady-state wear region. Hence, Co addition was effective to improve the wear properties of multi-component white cast iron by accelerating the corrosive wear as well as the enhancement effect of hardness.

**Key words :** Multi-component, White cast iron, Sliding wear properties, Cobalt, Oxides.

(Received February 6, 2004 ; Accepted April 23, 2004)

#### 1. 서 론

근년, 압연기술은 고정도화나 성력화의 경향으로 이에 따른 압연기는 대형화, 고속화, 고압화 등의 고성능화의 추세에 있다. 이러한 측면에서 열간 압연롤의 소재로써도 고온경도는 물론 내마모성, 내열성, 내소착성, 내peeling성 등을 겸비한 새로운 재료개발이 요구 되어지고 있다.

현재 철강계 열간 압연롤 재료로는 Ni-hard주철이나 고크롬주철이 널리 사용되고 있으나 근년에는 상기의 특성을 겸비한 재료로 다합금 백주철이 주목받고 있다 [1]. 이러한 다합금 백주철은 고속도공구강과는 함유량이 상이하나 동일하게 같은 효과를 얻기 위해 강한 탄화물 생성원소인 Cr, Mo, W, V 등의 합금원소를 다량으로 첨가하여, 주조시 고경도인 MC계 또는 M<sub>2</sub>C계의 탄화물을 다수 정출하도록 개발된 소재이다. 아울러 이 다합금 백주철은 이와 같이 주조시 생성되는 1차탄화물 외에 후열처리 과정을 통해 다량의 미세한 2

차탄화물이 석출, 분포하게 되므로 우수한 기계적 특성을 나타내게 된다[1].

그런데 고속도공구강의 경우는 상기의 합금원소 외에 고가이지만 내열성이나 내마모성 향상을 위해 Co 원소를 일부 첨가하는 경우가 있다. 이와 유사하게 다합금 백주철의 경우도 Co를 기지강화와 고온강도 향상을 위해 일부 첨가하고 있지만 기계적 성질에 많은 영향을 미치는 미세조직상 정출되는 탄화물의 종류나 형태 등에 영향이 없는 것[2,3]으로 알려져 기계적 성질에 미치는 Co첨가의 효과에 대해서는 불분명한 것이 사실이다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 2%C-5%Cr-5%Mo-5%W-5%V 계의 다합금 백주철을 기본으로 Co를 0~10%첨가한 4종류의 시험편을 제작하여 미끄럼 마모시험을 행하였다. 그리고 그 결과를 해석하여 Co가 다합금 백주철의 미끄럼 마모특성에 미치는 영향을 규명하였다.

계명대학교 공과대학 신소재공학과(Dept. of Advanced Materials Engineering, Keimyung University, Daegu 704-919, Korea)  
†E-mail : lhy@kmu.ac.kr

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시편제작

공시재로는 C을 2%, Cr, Mo, W 및 V을 각각 5%로 하고 Co를 각각 0, 2, 5, 10% 첨가한 4종류의 다합금 백주철(이하 0Co, 2Co, 5Co, 10Co)을 이용하였다. 이들의 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

시편제작을 위해 우선 각각의 목표 조성으로 조절한 30 kg의 원재료를 고주파 유도로로 용해하여 실체부가 55×55×195 mm인 Y-block으로 주조하였다. 이후 길이방향에 대해 수직방향으로 측면에서 10 mm 내측에서 55×55×20 mm의 판재로 절단한 뒤 1223 K에서 18 ks동안 어닐링하였다. 이후 방전가공기로 소정의 시편형상( $\phi 4 \times 20$  mm)으로 가공한 후, 1325 K에서

3.6 ks 유지하고 강제 공랭시켜 소입하였다. 그리고 773 K에서 12 ks 동안 템퍼링처리하였다.

Fig. 1은 열처리 후 관찰한 조직사진이다. 전반적으로 Co함유량에 따른 조직차이가 없다는 것을 알 수 있다. 또한 고배율에서 탄화물을 관찰한 결과에서도 유사한 양의 편상 또는 입상인 MC탄화물과 침상 또는 판상인 M<sub>2</sub>C 탄화물이 혼재되어 있는 것으로 확인되어 차이를 관찰할 수 없었다. 이러한 사실은 Co가 탄화물에 고용되지 않고 기지에 고용되기 때문에 정출되는 탄화물의 종류나 형태, 양에 무관하다는 지금까지의 연구결과와 일치한다[2,3].

### 2.2. 마모시험

본 연구의 마모시험은 Fig. 2에 나타낸 pin-on-disc

Table 1. Composition of testpieces

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	Co
0Co	1.99	0.48	0.45	0.033	0.022	0.06	5.05	5.05	5.05	4.93	0.20
2Co	1.94	0.48	0.46	0.037	0.018	0.15	4.99	4.97	5.00	5.14	2.01
5Co	1.96	0.50	0.49	0.044	0.020	0.16	4.95	4.96	4.96	4.92	5.01
10Co	1.98	0.52	0.47	0.051	0.022	0.17	4.89	5.08	4.96	5.08	9.80

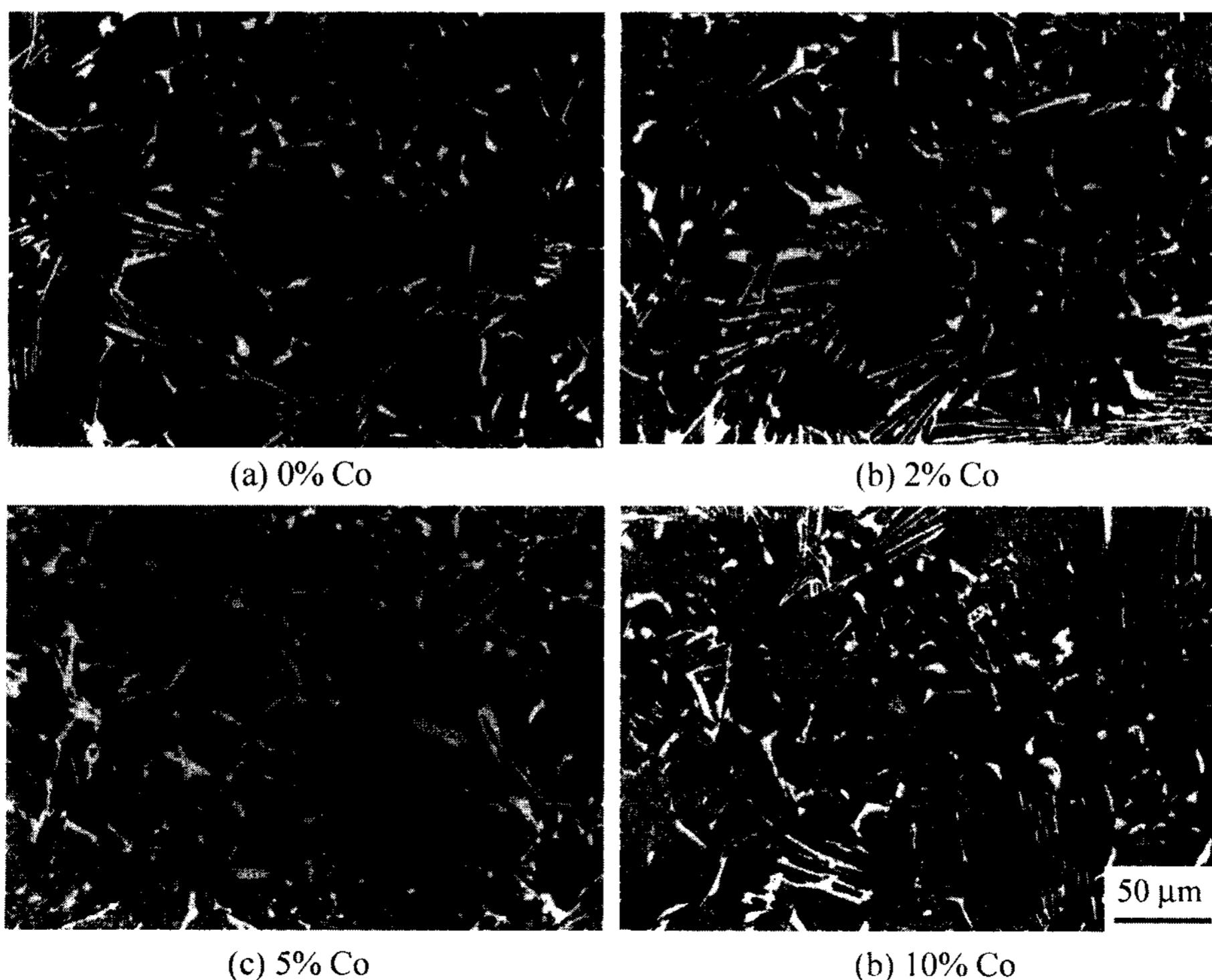


Fig. 1. Microstructures of multi-component white cast iron containing from 0%Co to 10%Co.

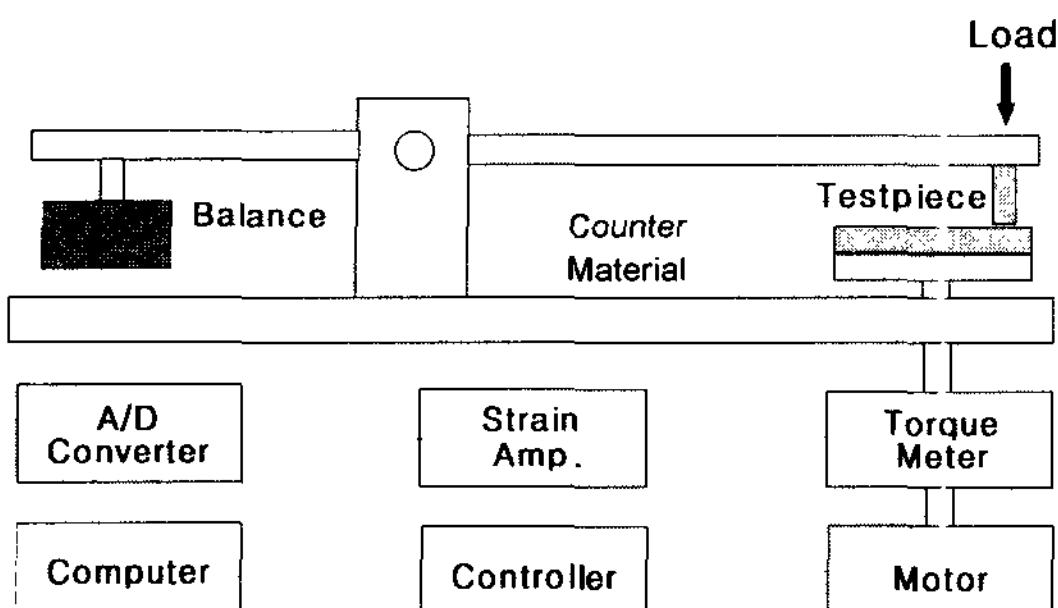


Fig. 2. Schematic diagram of pin-on-disc type wear test machine used in this study.

형 미끄럼 마찰마모시험기를 이용하였다. 이때 하중은 586 g으로 일정하게 하고 접촉부의 선속도를 2~8 m/s에서 7조건(2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 m/s)을 선정, 실온에서 전식으로 행하였다.

상대재는 시판되는 Mo계 고속도공구강인 M2 고속도공구강(SKH9에 상응)을 소정의 형상( $\phi 60 \times 10$  mm)으로 가공한 후 열처리를 행하였다. 열처리후 상대재의 경도는 HRC 64.1였다.

또한 시험전 시편 및 상대재의 마모면은 #600 연마지로 거칠기를 조정하였으며, 마모량은 소정의 거리마다 중량감소로 산출하였다. 그리고 모든 결과는 동일 조건에서 2~4회 시험한 결과의 평균값을 사용하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 마모시험결과

각 시편의 마모시험결과, 0Co, 5Co, 10Co의 미끄럼거리에 대한 마모량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 어느 것도 속도에 따라 정도는 상이하나 거리증대에 따라 마모량이 증대하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 그리고 Co함유량에 따라 동일 속도에서라도 마모정도가 상이함 알 수 있다. 이들 관계에서 초기마모영역과 정상마모영역으로 구분하여 각 속도에 따른 마모율을 Fig. 4에 나타내었다. 초기마모영역에서는 어느 것도 5~6 m/s 부근의 속도에서 마모율이 급변함을 알 수 있다. 그러나 이 영역에서는 Co의 영향이 없는 것으로 생각되어 진다. 정상마모영역의 경우, 3~4 m/s까지는 속도가 증가함에 따라 마모율은 감소하여 극소를 나타낸 후 속도가 증가할수록 마모율이 증가하는 형태인 것을 알 수 있다. 이러한 마모의 속도특성곡선을 일반적인 주철의 마모특성곡선[4]과 대비하면 본 연구의 미

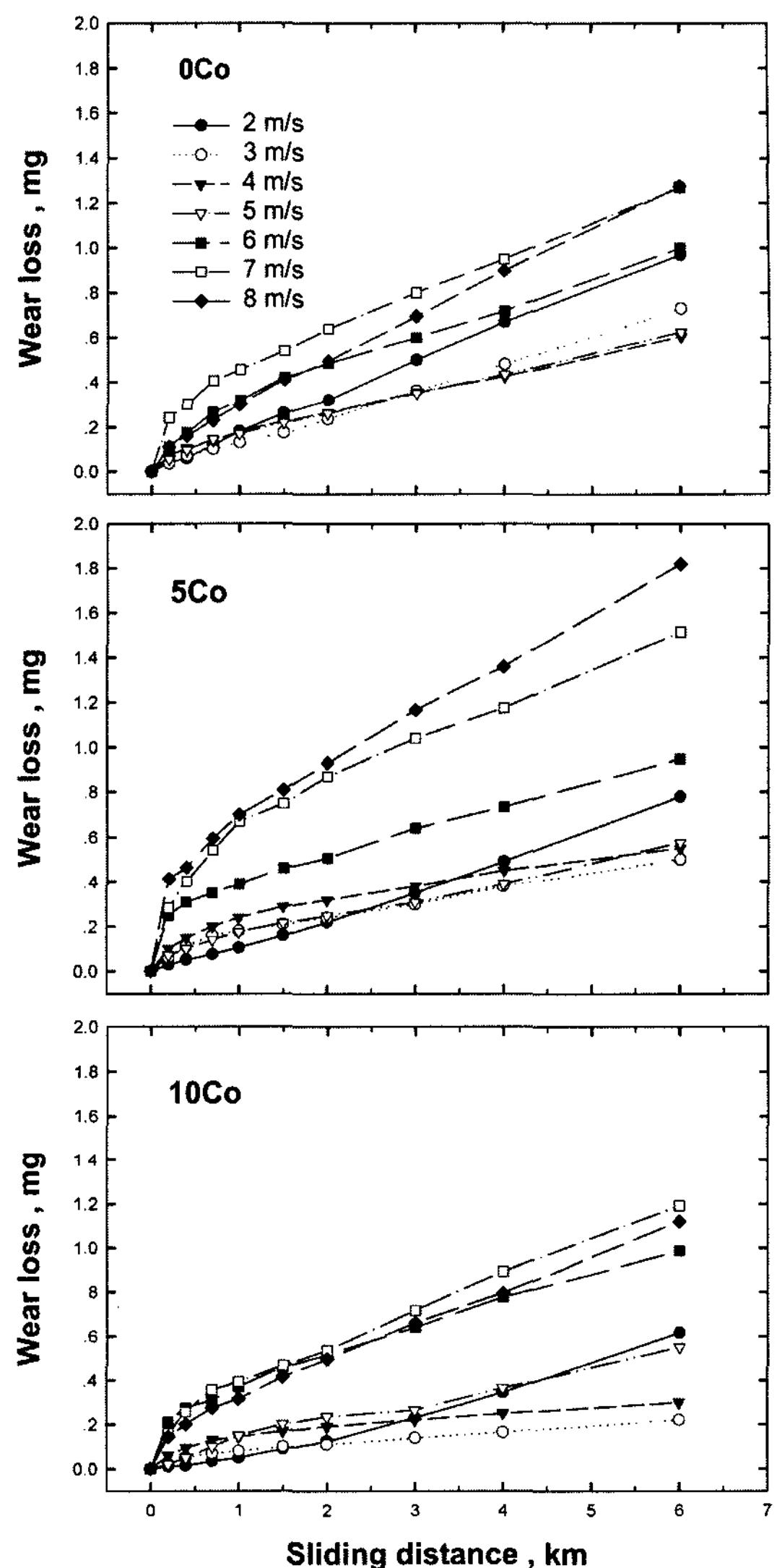


Fig. 3. Wear characteristics as a function of sliding distance at various sliding speeds.

끄럼 속도영역은 산화마모영역에 상응하는 것[5]을 알 수 있다. 따라서 이들의 마모특성은 마모에 의해 생성되는 산화물의 정도에 크게 영향을 받게 됨이 예상된다. 이 영역에서의 Co함유량의 영향은 그림에서도 알 수 있듯이 저속영역에서는 관찰되나 고속에서는 차이가 없어지고 있다. 저속영역에서는 Co량이 많아질수록 내마모성이 좋아지고 있다.

본 연구에 사용한 시편의 경도는 시험전 Co량이 증가함에 따라 각각 Hv(30 kg) 808.5, Hv 820.5, Hv 867, Hv 919로 증가하여 5% 이상 첨가시 경도가 급

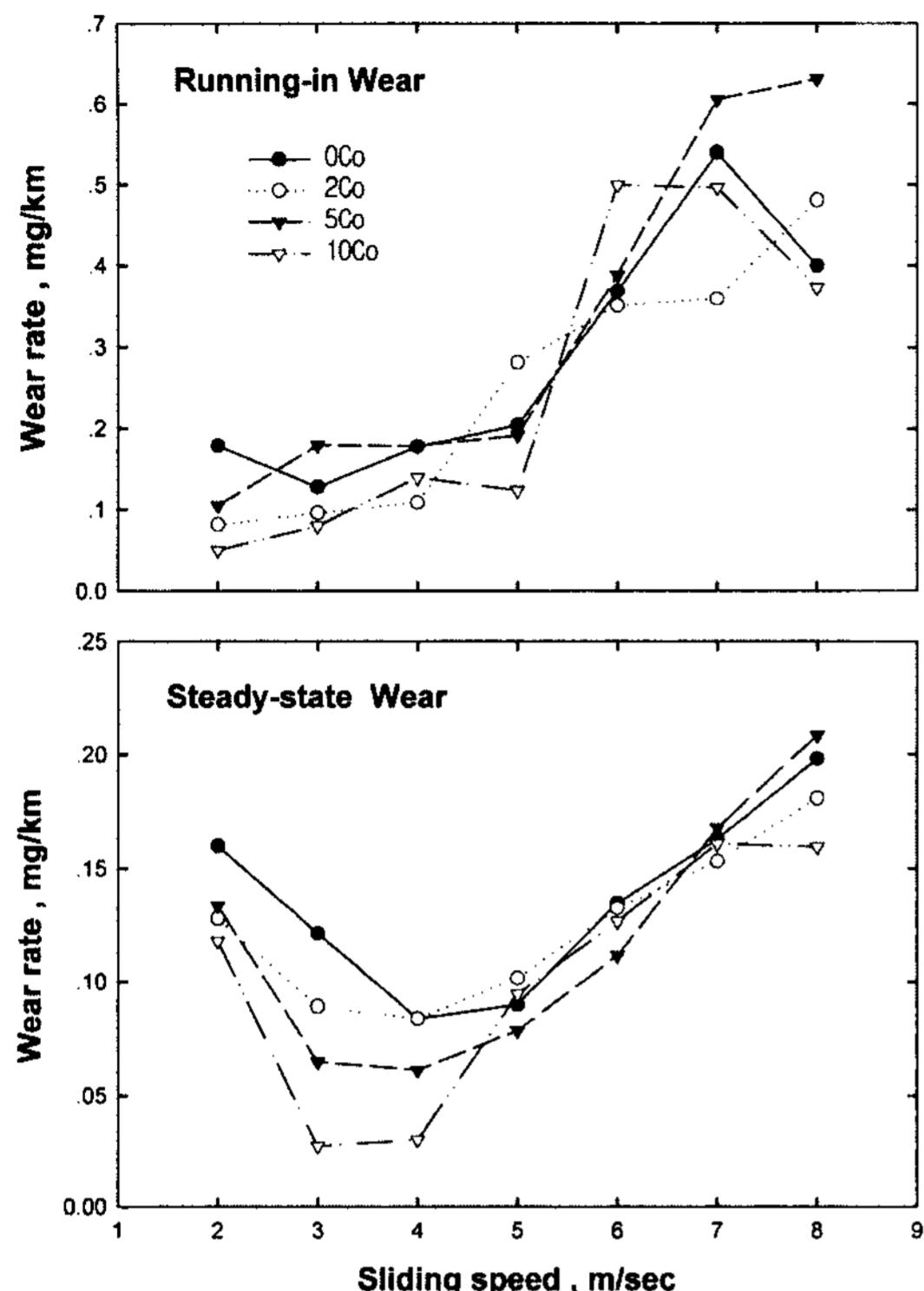


Fig. 4. Wear characteristics as a function of sliding speed under running-in wear region and steady state wear region.

증하는 것으로 밝혀졌다. 그리고 이들 상중에 잔류 오스테나이트 함유량은 X선회절(CoK $\alpha$ )을 이용해 확인한 결과 Co첨가량에 무관하게 어느 것도 4% 이하인 것으로 확인되었다.

일반적으로 내마모성에 미치는 재료 경도의 영향은 Holm-Archard식으로 얻어지듯이 경도가 높을수록 내마모성이 좋은 것으로 알려져 있다[6]. 이러한 측면에서 본 연구에서 사용한 시편의 경도는 Co가 많아질수록 경도가 상승하므로 결국 시편의 경도가 이들의 마모특성에 영향을 미쳤음이 분명하다. 그러나 초기마모에서 이들의 마모특성이 Co함량에 거의 무관하고 정상마모영역에서도 2 m/s와 고속영역에서 경도와 관계없이 마모율이 유사한 것으로 미루어 Co첨가에 따른 모재경도 상승효과 외에 다른 효과가 동시에 작용한 것으로 예상된다(후술).

### 3.2 마모면의 관찰

0Co와 10Co에 대해 2, 3, 8 m/s에서 시험한 마모면의 광학현미경사진을 Fig. 5에 나타내었다. 이들 마

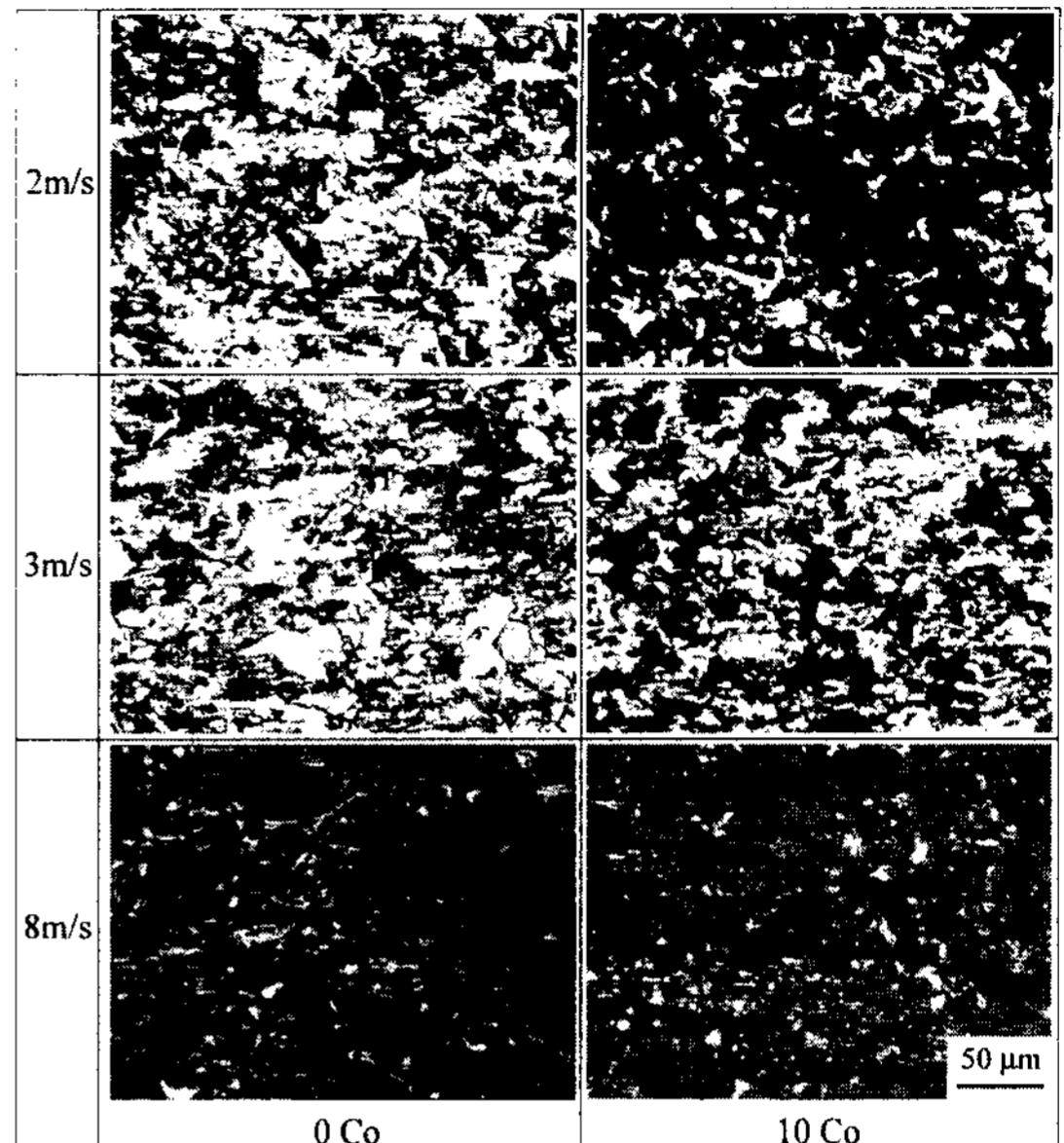


Fig. 5. Optical micrographs on worn surface of testpiece after test.

모면에는 정도의 차이는 있으나 모두 화합물로 덮혀 있음을 알 수 있다. 특히 저속에서는 흑색의 화합물(실제는 적갈색)이 관찰되나 속도증가에 따라 감소하고 8 m/s의 경우는 회색 화합물이 전면을 덮고 있다. 그러나 저속에서 관찰되는 흑색 화합물량은 Co함유량이 높을수록 그 양이 많음을 관찰할 수 있다. 결국 저속도영역에서 Co함유량에 따른 마모율의 차이의 발생은 이러한 화합물의 대소와 관계하는 것이 분명하다. 이러한 측면에서 초기마모에서 Co첨가의 영향이 나타나지 않은 것은 미끄럼거리가 짧아 이러한 화합물생성이 충분하지 않았기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 2 m/s의 0Co, 10Co의 마모면의 SEM사진이나 0Co의 경우는 다량으로 소성유동한 부위가 관찰되어 마모율이 큰 것과 대응한다. 결국 Co첨가에 따라 내마모성이 향상되는 것은 이러한 화합물 생성량이 많아 금속간 접촉이 방지되었기 때문으로 추정된다[5].

Fig. 7은 0Co와 10Co의 마모면을 EPMA분석한 결과이나 저속 및 고속에서의 마모면에서는 어느 것도 산소가 관찰되어 이들 화합물은 산화물임을 알 수 있다. 이러한 측면에서 저속에서 관찰되는 산화물은 색상 등을 고려할 때  $Fe_3O_4$ 계 산화물[5]인 것으로 추정된다. 결국 Fig. 5에서 보듯이 Co첨가 유무에 따라 마모면의 산화물생성 정도의 차이를 유발하여 이들이 마

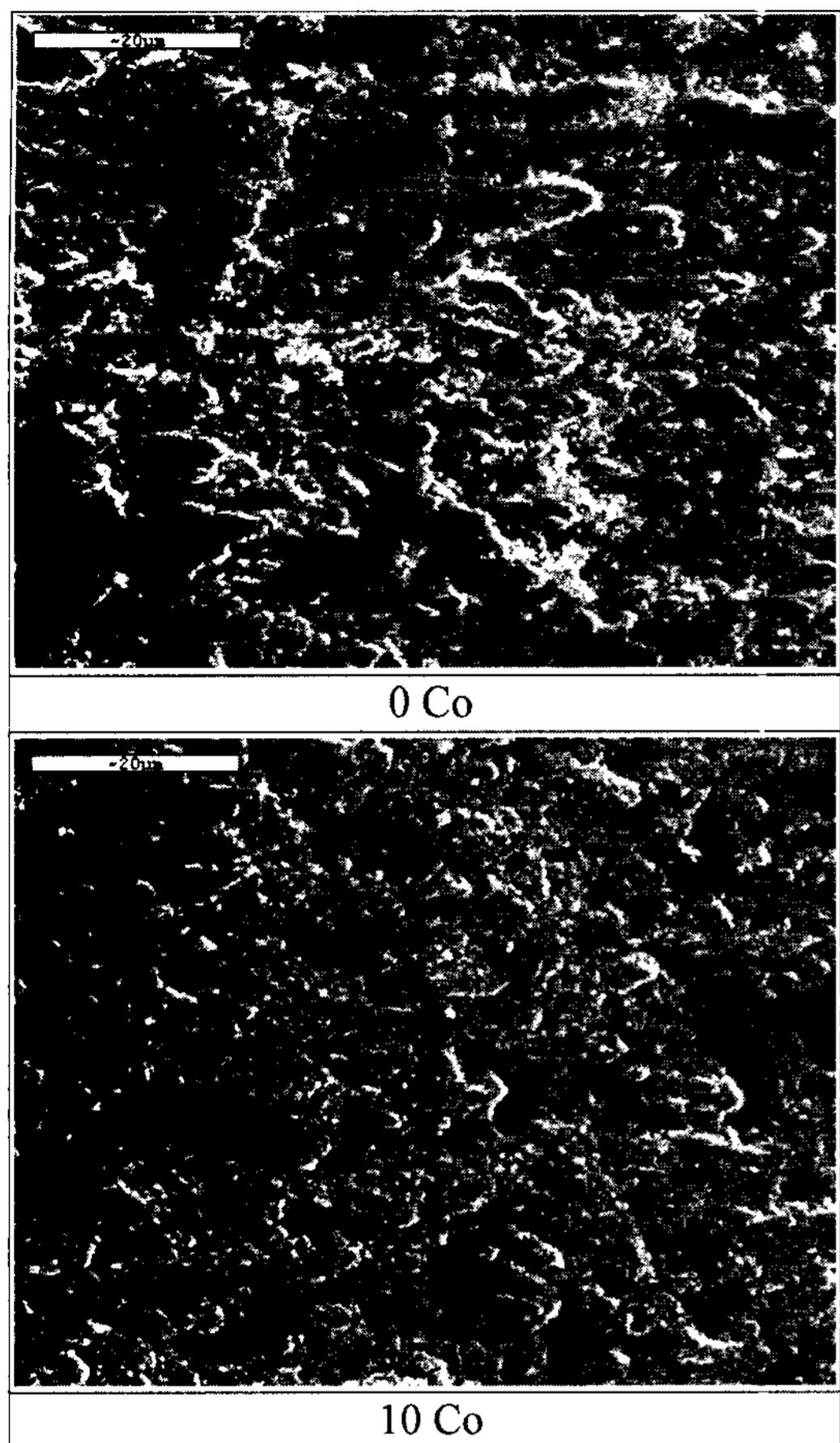


Fig. 6. SEM images on worn surface of testpiece after test (at 2 m/s).

모특성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이와 같아 Co함유량에 따라 마모에 의한 산화물의 생성정도에 차이가 발생하는 것은 이미 고속도공구강에서도 관찰된 현상[7]으로 결국 Co가 오스테나이트상에 고용되어 C의 고용한도를 증대시킴으로써 산화마모 촉진작용을 하기 때문으로 이러한 현상이 다합금 백주철에 있어서도 동일하게 작용하는 것으로 생각된다. 한편 고속의 회색의 산화물은 속도가 증가함에 따라 그 양이 많아지는 것으로 밝혀져 고속의 마모시험시 발생하는 고온산화물인 FeO계[5]인 것으로 추정된다. 그러나 시편의 Co함유량에 따른 고온산화물의 생성정도의 차이는 발견할 수 없었다(Fig. 5 참조).

Fig. 8은 상대재 마모면의 광학현미경사진의 일례를 나타내었으나 이들 마모면에도 시험편과 마찬가지로 저속에서는 흑색, 고속에서는 회색의 화합물이 관찰된

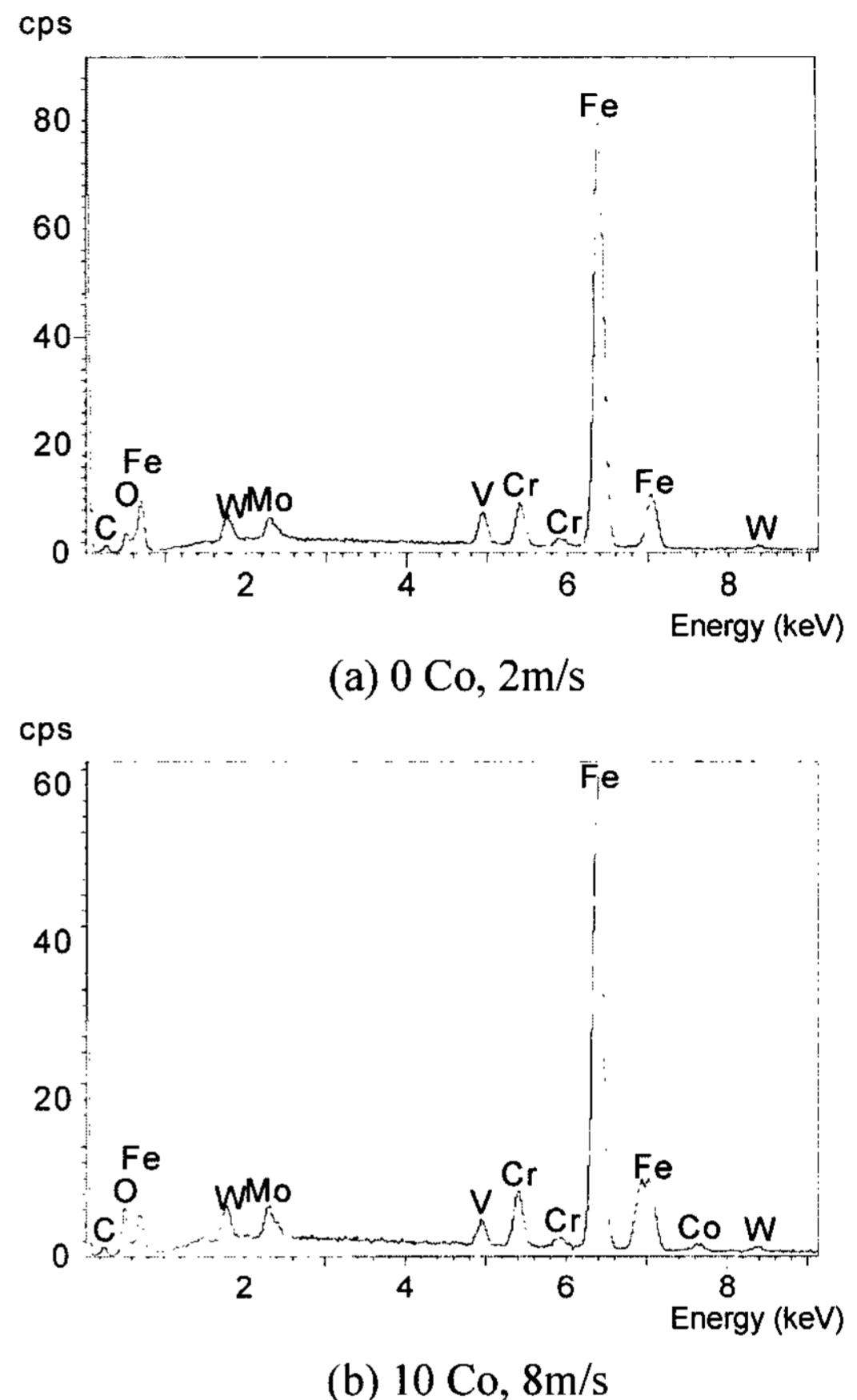


Fig. 7. Results of EPMA on worn surface of testpiece.

다. 이들도 모두 산화물인 것으로 밝혀졌으나 속도에 관계없이 시편의 Co함유량에 따른 양 차이는 관찰할 수 없었다.

Fig. 9는 상대재 마모면을 미끄럼방향과 수직방향으로 측정한 마모면 profile을 나타내고 있다. 저속에서는 groove가 크나 속도가 증가함에 따라 감소하고 8 m/s에서는 오히려 돌출된 것으로 밝혀져 고속의 마모시는 시편에서의 이착물이 많아지는 것으로 밝혀졌다. 이러한 측면에서 고속으로 될수록 시편의 온도상승이 커서 응착후 주로 시편측에서 전단되어 마모가 진행되므로 마모율이 증가하게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 고속에서의 마모는 시편의 고온전단강도가 마모율에 크게 영향을 미칠 것으로 예상되나 마모특성곡선(Fig. 4)의 고속영역에서는 Co함유량에 따른 이들의 차가 없는 것으로 밝혀졌다. 이것은 시편과 상대재에 이미 상당량의 산화물로 덮혀 있기 때문으로 생각된다.

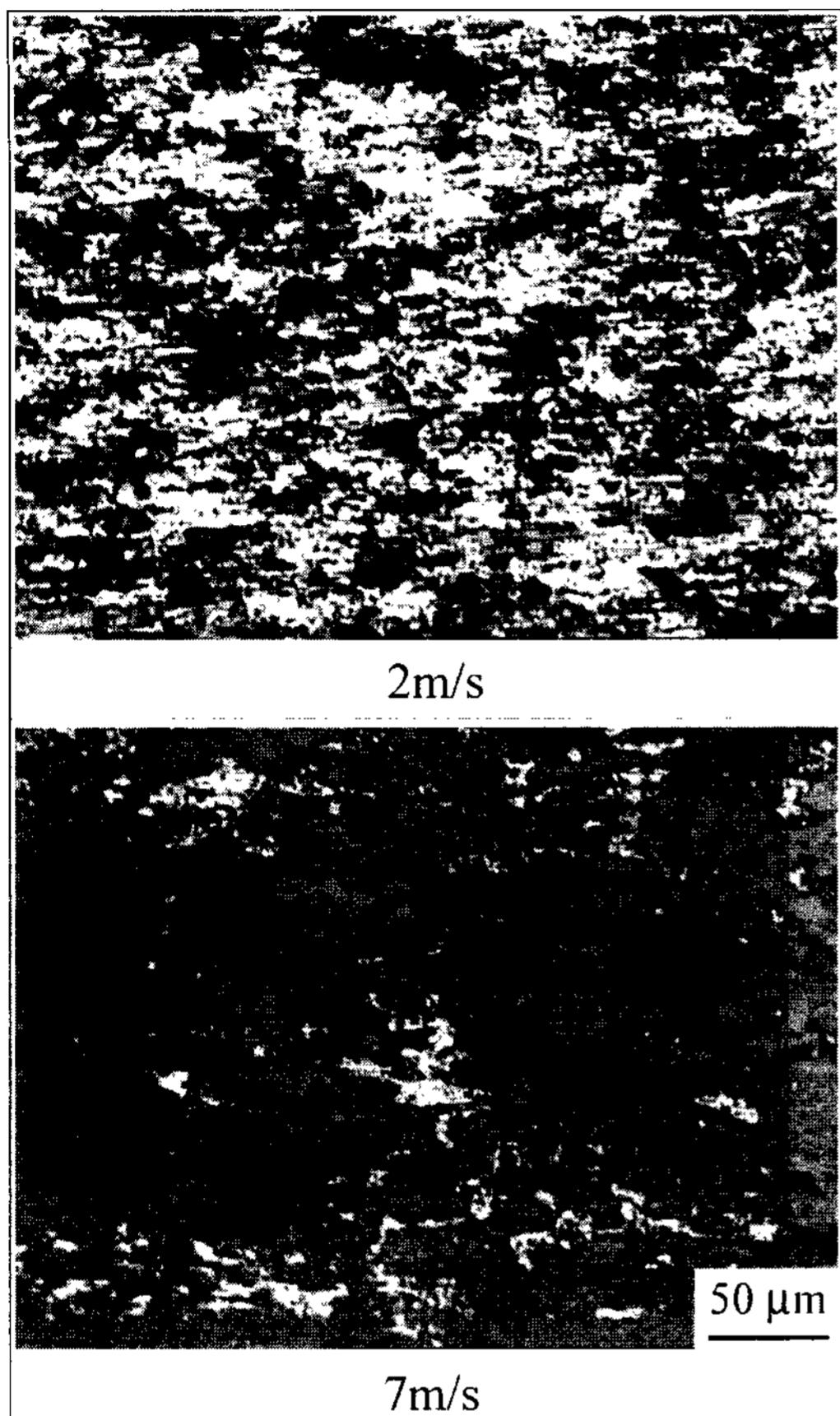


Fig. 8. Optical micrographs of worn surface of counter material for 10Co testpiece.

따라서 다합금 백주철의 미끄럼 마모특성에 미치는 Co의 영향은 저속영역에서 산화마모를 촉진하여 내마모성 향상에 유익한 것으로 밝혀졌다. 그러나 경도상 승효과도 배제할 수 없다.

#### 4. 결 론

다합금 백주철의 미끄럼 마모특성에 미치는 Co첨가의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Co첨가에 따른 마모특성의 변화는 정상마모영역의 저속구간에서 관찰된다. 그리고 그 효과는 Co함유량이 많을수록 내마모성이 향상되는 것으로 밝혀졌다.

2) 다합금 백주철에 Co의 첨가는 마모과정 중에 산화물생성을 용이하게 하는 산화마모촉진작용을 증대시키는 것으로 밝혀졌다.

그러나 Co첨가에 따른 경도상승효과도 배제할 수 없

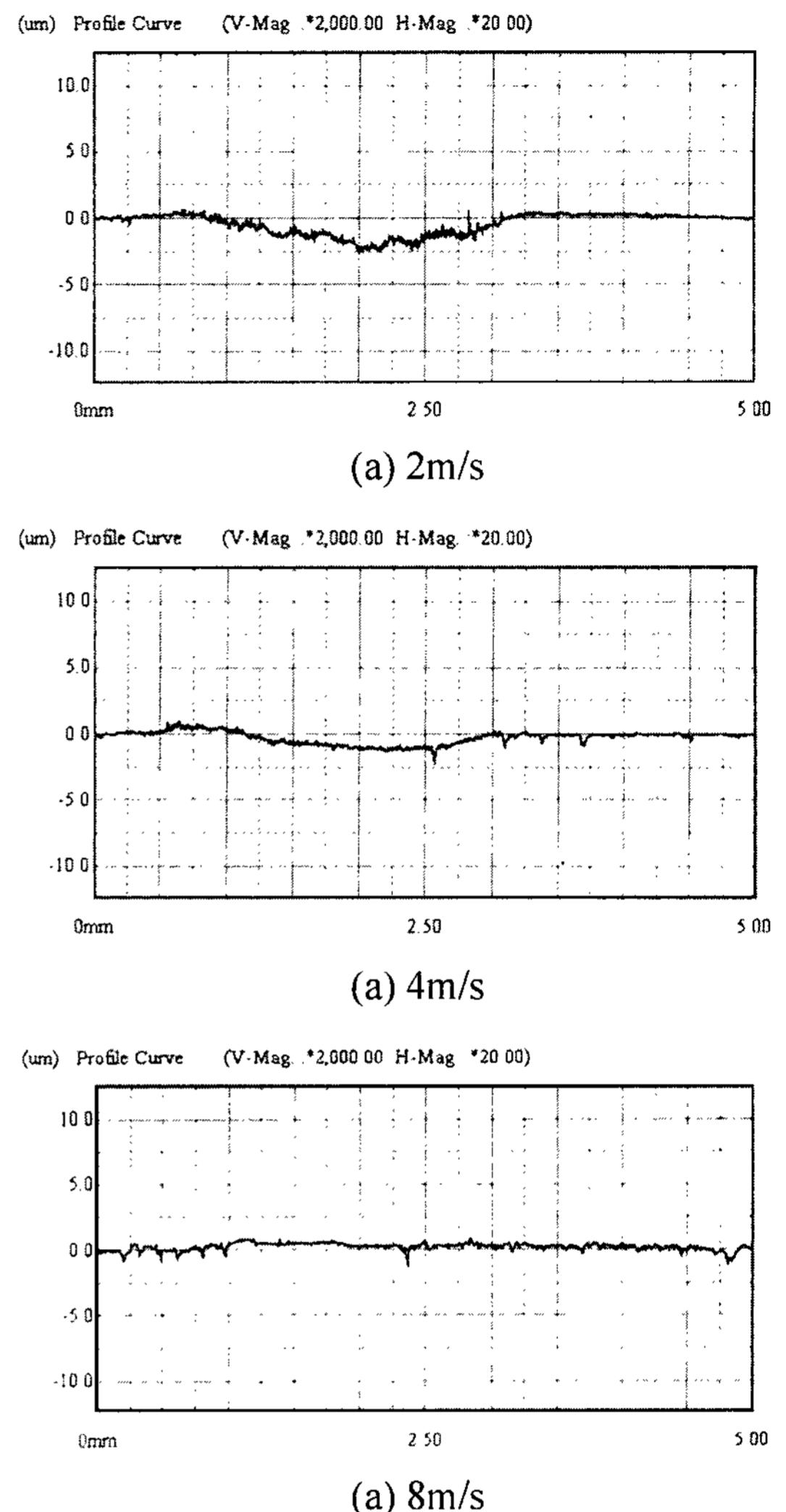


Fig. 9. Profiles on worn surface of counter material for 5Co testpiece.

어 이들이 동시에 작용하는 것으로 보는 것이 타당할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구를 위해 시료를 제공해 주신 일본 久留米工業高等専門學校의 笹栗信也 선생님께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. Matsubara, N. Sasaguri, Y. Honda, H. Wu and M. Hash-

- imoto : "Solidification structure of Multi-component white cast Iron", Imono, 66(11) (1994), 815-821.
- [2] H. Wu, N. Sasaguri, M. Hashimoto and Y. Matsubara : "Type and morphology of carbides precipitated in Multi-component white cast Iron", Imono, (1) (1995), 49-55.
- [3] N. Sasaguri, O. Kubo, Y. Yokomizo and Y. Matsubara : "Air-oxidation behavior of multi-component white cast iron with cobalt at high temperature", J. of Japan Foundry Engineering Society, 73(2) (2001), 99-104.
- [4] K. Ogawa : "Wear of metal in lubricant and its counter-plan", Youkendo, Japan, (1981), 179.
- [5] Karl-Heinz Zum Gahr: "Microstrucrture and wear of materials", Elsevier, (1987), 380.
- [6] Y. Endo: "Surface Science", Youkendo, Japan, (1985), 64.
- [7] H. Y. Lee, J. S. Bae and Y. J. Kim : "The effects of cobalt on wear and friction characteristics of HSS by PM", J. of the Korean Society of Tribology and Lubrication Engineers, 15(2) (1999), 156-163.