

고체윤활제 Cu_2S 첨가 소결청동의 미끄럼 마찰마모특성 연구

이 한 영[†] · 池永明*

계명대학교 신소재공학과
*大阪府立大學 大學院工學研究科

A Study of Sliding Friction and Wear Properties for Bronze added Cu_2S as Solid Lubricants

Han-young Lee[†] and Akira Ikenaga*

Dept. of Advanced Materials Eng. Keimyung University, Korea

*Dept. of Materials Science and Eng., Osaka Prefecture University, Japan

Abstract – MoS_2 is a well-known metal sulfide applied as solid lubricants and an additive to prolong the life of sintered bearings under severe conditions. However, the high price of MoS_2 limited its wide application. This study is aimed to investigate the possibility for application to solid lubricants for Cu_2S as a substitute of MoS_2 . Bronzes added Cu_2S and MoS_2 are produced by powder metallurgy in this study, and then evaluated their friction and wear properties., as well as sintered bronze.

The sliding wear test using pin-on-disc type machine, was conducted at several sliding speeds for three type test pieces, sintered bronzes added Cu_2S and MoS_2 and sintered bronze without lubricants.

Addition of Cu_2S to bronze leads to relatively good friction properties, although it is not so good as addition of MoS_2 . However, the wear properties of sintered bronze added Cu_2S are better than that of sintered bronze added MoS_2 .

Key words – solid lubricants, Cu_2S , MoS_2 , sliding wear and friction, powder metallurgy.

1. 서 론

고체윤활제로써 요구되어지는 성질에는 일반적으로 높은 열적, 화학적 안정성과 강한 분자 흡착력 등이 있으나 무엇보다도 낮은 전단강도를 가져야한다[1]는 것이 중요한 인자로 알려지고 있다. 이러한 측면에서 이 황화몰리브덴(MoS_2)을 필두로 흑연, 운모, 황 등과 같은 대부분의 고체윤활제는 층상조직의 구조를 가지고 분자층간의 약한 결합력에 의해 낮은 전단강도를 나타내는 것이 일반적이다. 특히 Oilless bearing 등에 초기 마찰특성을 좋게 할 목적으로 첨가되고 있는 MoS_2 는 금속과의 강한 흡착성도 겸비하여 가장 우수한 고체윤활제로 알려져 있다[1]. 그러나 MoS_2 는 이러한 우수한 특성에도 불구하고 고가인 점이 사용상의 커다란 문제

점으로 알려져 있다.

이와 달리 Cu_2S 와 같은 일부의 금속 황화물은 MoS_2 와 달리 층상조직의 구조를 가지지는 않으나 고체윤활제로써 주목을 받고 있다[2]. 이들은 재료자체의 낮은 용점과 낮은 전단강도로 인해 마찰면에 피막을 형성하여 마찰특성을 개선하기 때문으로 알려져 있다[1]. 그러나 이러한 금속 황화물의 고체윤활제로써의 적용에 대한 연구로는 일부 성능 비교를 한 결과[3]는 있으나 이들의 마찰마모특성에 대해서는 거의 알려져 있지 않은 것이 사실이다. 이는 지금까지 고순도의 금속 황화물 제조가 불가능하였기 때문으로 추정된다. 그러나 최근 경제성이 있는 고체윤활제 개발차원에서 연소합성기술[4-6]을 이용한 이들 황화물 제조가 가능한 것으로 밝혀져 MoS_2 이외의 금속 황화물의 고체윤활제로써의 적용 가능성 여부는 이들의 마찰마모특성 파악이 관건임이 분명하다.

[†]주저자 · 책임저자 : lhy@kmu.ac.kr

본 연구에서는 고체윤활성이 높을 것으로 예상되는 Cu₂S분말을 ball mill에서 기계화학적 방식[5,6]으로 연소합성을 일으켜 분말을 제조하고, 이 분말을 청동분말에 첨가한 소결청동과 일반적인 MoS₂를 첨가한 소결청동 그리고 어떠한 고체윤활제를 첨가하지 않은 소결청동의 미끄럼 마찰마모특성을 비교 조사하였다. 이러한 결과를 토대로 고체윤활제로서의 Cu₂S의 적용가능성을 검토하였다.

2. 시험방법

2-1. 시험편

본 연구에서는 금속 황화물 Cu₂S의 고체윤활성을 조사하기 위하여 시판되는 Cu-10%Sn 조성의 KAB23 청동혼합분말에 연소합성에 의해 제조한 Cu₂S분말을 1.5%첨가(이하 BC재)하였다. 비교재로 그 청동혼합분말에 MoS₂분말을 1.5% 첨가한 시편(이하 BM재)과 이들 고체윤활제를 전혀 첨가하지 않은 청동혼합분말만의 소결청동시편(이하 B재)도 제작하였다. 이때 사용된 Cu₂S 분말은 시판되는 Cu와 S분말을 Ball mill에서 Mechanochemical Process로 연소합성[5,6]시켜 제조한 것이며 MoS₂는 시판되는 분말을 사용하였다. 이들 분말의 D50 입도는 Cu₂S가 5.26 μm, MoS₂가 1.88 μm정도인 것으로 확인되었다.

시편제작은 청동혼합분말과 고체윤활제인 Cu₂S와 MoS₂를 각각 소정의 비율로 혼합한 목표조성의 분말을 각각 20 ton 냉간 성형프레스를 이용하여 우선 Ø 12.6×15 mm 사이즈의 압분체(성형밀도 7.32~7.36 g/cm³)로 제작하였다. 이후 성형된 압분체는 암모니아 분위기 하에서 mesh-belt type의 로를 이용하여 760°C에서 20 분간 소결하였다.

Table 1에 소결 후 시편의 밀도 및 경도를 나타내었다. 표에서 보듯이 이들의 경도 및 밀도는 거의 유사하나 고체윤활제를 첨가한 것이 경도 및 밀도가 다소 높고 특히 BM재의 경도 및 밀도의 상승이 다소 크다.

마모 시편은 이들을 각각 최종 Ø6×5mm의 크기로 기계가공을 하여 제작하였다.

Table 1. Density and hardness of sintered testpieces

	B	BM	BC
Density (g/cm ³)	6.91	7.15	6.92
Hardness (HRB)	38.3	45.5	41.6

Table 2. Experimental conditions of sliding friction and wear test

Test machine type	Pin-on-disc
Load (g)	500
Speed (m/s)	0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0
Sliding distance	5 km
Temperature	Room temperature
Lubricants	Dry
Counter material	STS 420J2

2-2. 마모시험

본 연구에서의 마모시험은 pin-on-disc type의 미끄럼마찰마모시험기[7]를 이용하였다. 이때 시험하중은 500 g의 단일 하중에서 접촉부의 선속도를 0.5, 1, 2, 4 그리고 6 m/s의 5종류로 변화시키면서 각 속도에서 최대마찰거리 5 km까지 시험하였다. Table 2에 마모시험 조건을 나타내었다. 이때 시험편 및 상대재는 시험 전 마모면을 #400 abrasive paper로 연마하여 거칠기를 조절하였다. 또한 모든 시험은 상온에서 무윤활 조건으로 행하였으며, 소정의 거리마다 시편의 중량감소를 측정하여 마모량을 산출하였다.

마찰계수의 측정은 상대재 하부에 장착된 torque meter를 이용하여 소정의 거리마다 상대재에 작용하는 torque의 변화를 측정하여 마찰계수의 변화를 산출하였다.

상대재는 시판되는 STS 420J2(KS)를 사용하여 Ø 80×8 mm의 사이즈로 가공하고 소정의 열처리하였다. 이들의 열처리 후 경도는 HRC 38~40인 것으로 확인되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 미끄럼 마모특성

Fig. 1에 미끄럼 마찰거리에 따른 각 시편의 마모량의 변화를 나타내었다. 그 결과 마모경향은 속도 및 거리에 따라 마모정도는 상이하나 전반적으로 거리가 증가할수록 마모량이 증대하는 일반적인 경향임을 알 수 있다. 이러한 결과에서 초기마모영역과 정상마모영역을 구분하여 각 영역별로 미끄럼속도에 따른 각 시편의 마모율을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 보듯이 어느 것도 속도가 증가할수록 마모율이 감소하나 초기마모영역 및 정상마모영역에서 MoS₂첨가 소결청동(BM재)이 가장 높은 마모율을 나타

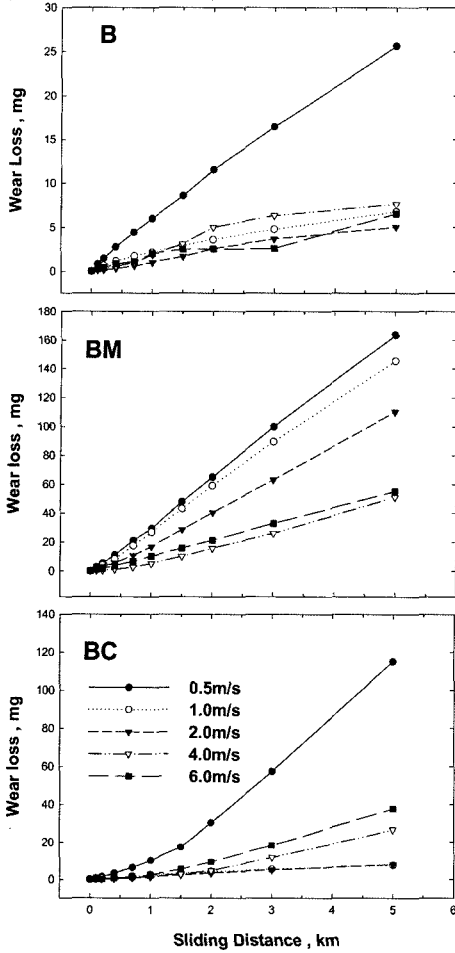


Fig. 1. Wear characteristics curves as a function of sliding distance at several sliding speeds.

내고 고체윤활제를 첨가하지 않은 B재가 가장 낮은 것으로 확인되었다. Cu₂S를 첨가한 BC재의 경우는 B재와 BM재의 중간정도의 마모특성을 나타내는 것으로 밝혀졌다.

BM재의 경우 저속에서의 마모율은 상당히 크나 속도가 증가함에 따라 현저히 감소하고 있다. B재의 경우는 0.5 m/s에서 다소 마모율이 크나 전속도 영역에서 아주 낮고 거의 변화가 없다. BC재의 경우는 초기 마모영역에서는 B재와 거의 유사하여 거의 마모가 일어나지 않는 것으로 밝혀졌으나 정상마모영역에서는 0.5 m/s에서 아주 크고 1~2 m/s에서 급감을 하여 B재와 유사한 값을 나타내고 있다. 그러나 이상의 속도에서 마모율이 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.

이러한 마모특성의 변화는 이하에 기술하는 마모형

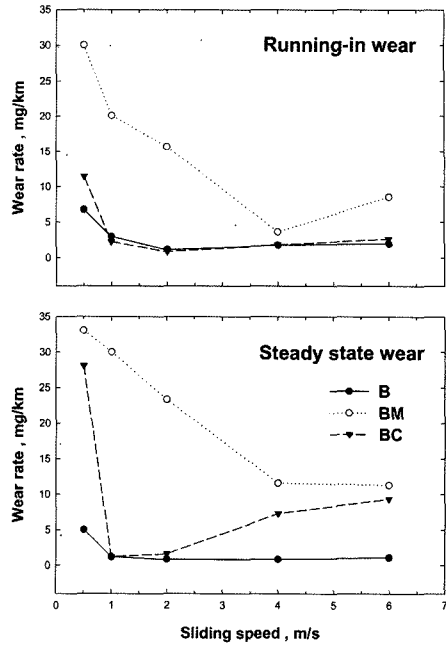


Fig. 2. Wear characteristics curves as a function of sliding speed for each specimen.

태와 관계하는 것으로 생각된다.

3-2. 미끄럼 마찰특성

Fig. 3에 각 시편에 대해서 속도별 미끄럼 거리에 따른 마찰계수 변화를 나타내고 있다. 전반적으로 마찰계수는 어느 것도 거리가 증가함에 따라 감소하는 경향임을 알 수 있다.

일정 속도에서 거리에 따른 마찰계수의 변화에서는 B재의 경우 아주 불규칙적이거나 BM재는 일반적으로 알려진 대로 MoS₂의 윤활작용으로 변화가 적고 아주 안정적이다. BC재의 경우는 마모가 현저하였던 0.5 m/s에서 마찰초기에서만 변화폭이 크나 전반적으로 마찰 안정성은 양호한 것으로 밝혀졌다. 이러한 측면에서 Cu₂S도 MoS₂정도는 아니나 마찰안정성 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

속도에 따른 마찰계수는 B재의 경우 저속도에서는 1.2정도로 큰 값을 보이나 고속에서는 현저히 낮아지는 경향이다. BM재는 속도가 증가함에 따라 점차적으로 마찰계수가 감소[1]하고 있으나 BC재의 경우는 2 m/s에서 다소 적으나 대부분 1.0정도의 유사한 값을 나타내고 있다.

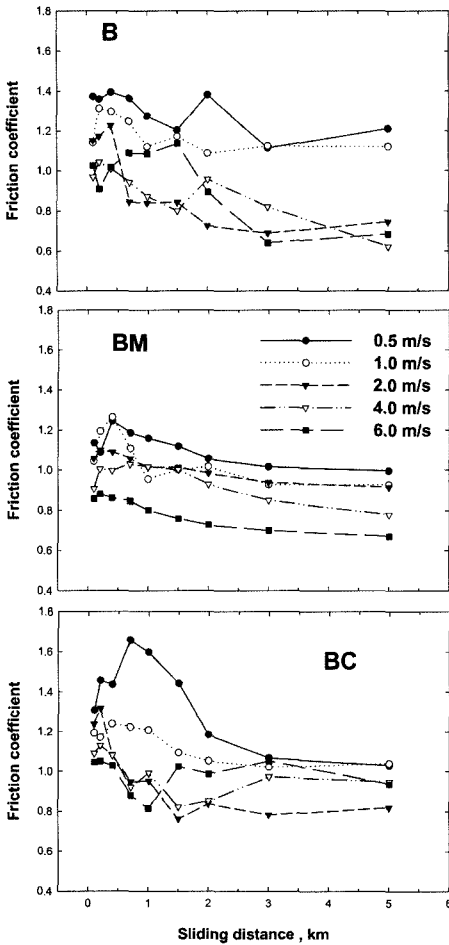


Fig. 3. Change of friction coefficient with sliding distance.

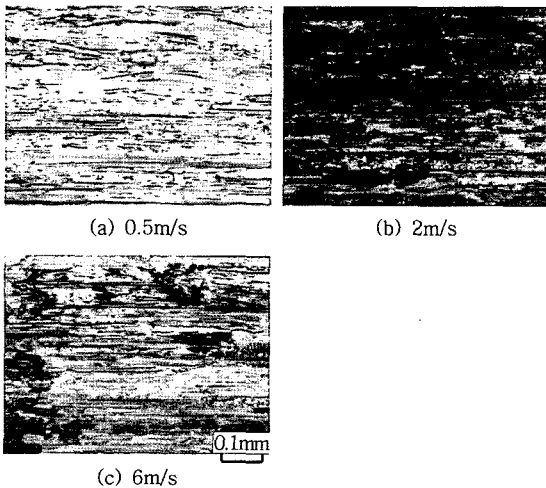


Fig. 4. Optical micrographs on worn surface of BC.

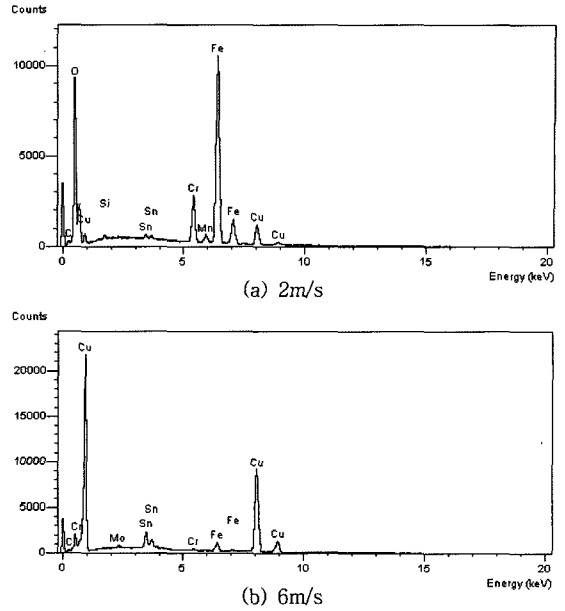


Fig. 5. Results of EDX analysis on worn surface of BC.

3-3. 마모면의 고찰

Fig. 4는 BC재를 마모시험한 후 마모면을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 0.5 m/s에서는 긴 scratch가 관찰된다. 2 m/s에서는 흑색의 화합물이 관찰되나 Fig. 5의 이들의 EDX분석 결과에서도 알 수 있듯이 이들은 상대재에서 이착된 철산화물인 것으로 확인되었다. 그러나 이 철산화물은 속도가 증가함에 따라 그 양이 감소하여 6 m/s에서는 소량만이 관찰

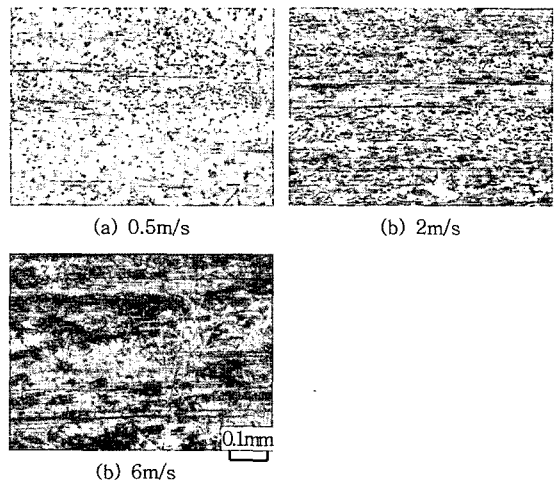


Fig. 6. Optical micrographs on worn surface of counter material against BC.

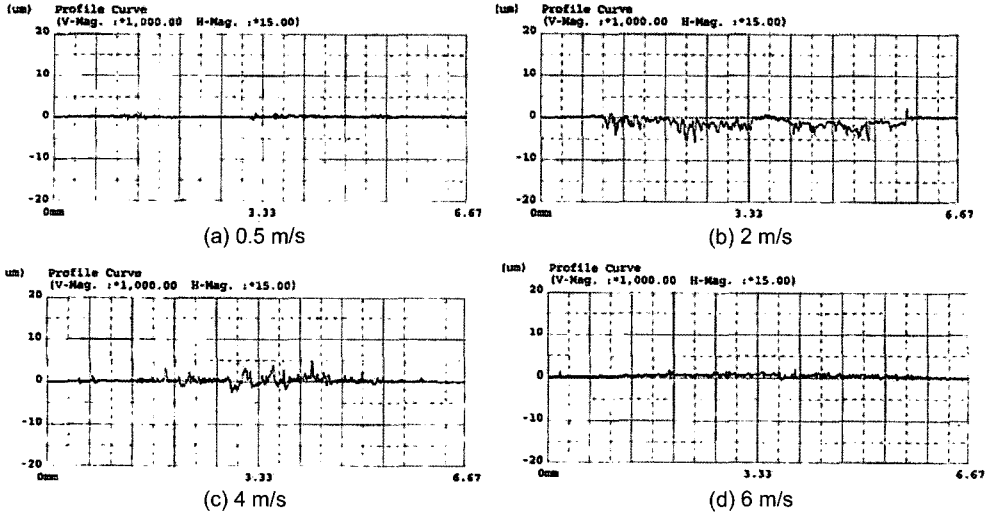


Fig. 7. Profile curves on worn surface of counter material against BC.

되나 Fig. 4(c)에서 관찰되는 마모면상의 많은 이착물들은 대부분이 시편자체가 재전이된 것으로 밝혀졌다. Fig. 6은 이들의 상대재 마모면을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 이들 마모면에는 scratch가 관찰되고 일부 시편의 이착물이 확인되었으나 그 정도는 적고 대부분 철산화물로 확인되었다. 이러한 철산화물의 양은 속도가 증가할수록 증대하였다. Fig. 7은 이들 상대재마모면의 단면곡선을 나타낸 것이다. 0.5 m/s에서는 거의 변화가 없고 2 m/s에서 깊은 groove가 생길 후 속도가 증가함에 따라 groove가 적어지고 6 m/s에서는 오히려

돌출되어 있는 것을 알 수 있다. 결국 0.5 m/s에서는 응착 후 주로 시편측에서만 전단되므로 시편의 마모가 많으나 2 m/s에서는 상대재의 마모가 현저해 시편의 마모가 급감하는 것을 알 수 있다. 이러한 측면에서 상대재의 속도에 대한 마모의 극대점은 2 m/s부근인 것으로 생각되어진다. 속도가 더욱 증가하면 마찰면의 온도상승에 따라 시편측의 열화가 현저하여 다시 시편측의 마모가 많아지는 것으로 생각되어진다.

Fig. 8과 Fig. 9는 B재 및 BM재의 0.5 m/s와 6 m/s에서 시험한 시편 및 상대재의 마모면을 광학현미경으

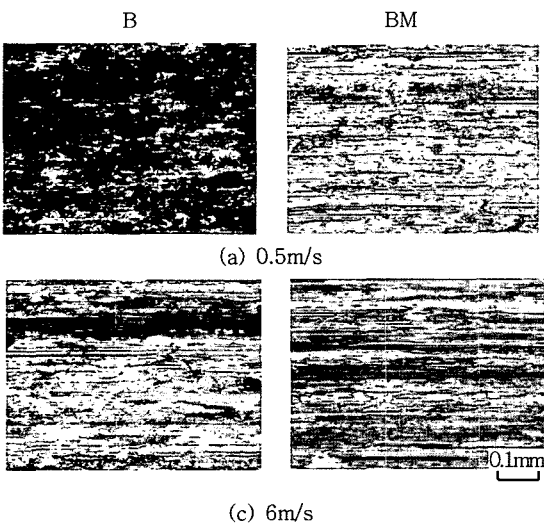


Fig. 8. Optical micrographs on worn surface of B and BM.

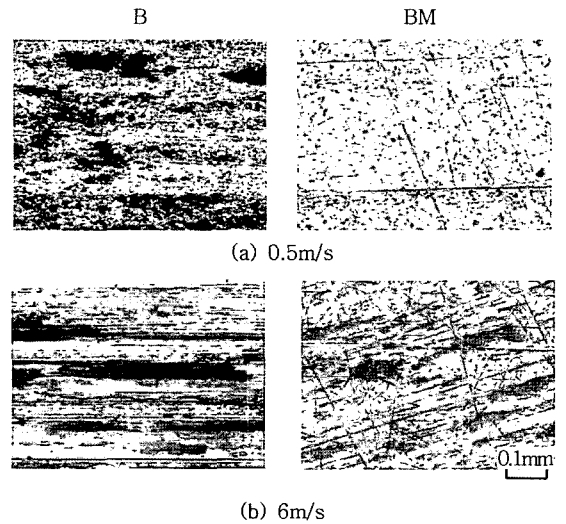


Fig. 9. Optical micrographs on worn surface of counter material against B and BM.

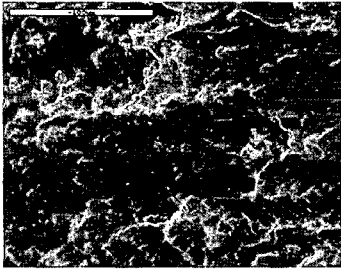


Fig. 10. SEM image on worn surface of B tested at 0.5 m/s.

로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 9에서도 보듯이 B재의 경우는 0.5 m/s에서 시편 및 상대재의 마모면에 상당량의 흑색의 부위가 관찰되나 시편의 흑색부위를 EDX분석 결과 대부분 Cu이고 소량의 철과 산소가 포함된 것으로 확인되었다. Fig. 10은 B재의 0.5 m/s 마모면을 SEM 관찰한 결과이나 심한 요철이 관찰되어 변형마모가 발생한 것을 알 수 있다. 그러나 속도가 증가할수록 시편의 마모면에는 상대재의 이착이 많아져 2 m/s에 가장 많은 것으로 확인되었으며 6 m/s에서도 BM재나 BC재에 비해 많은 양이 이착된 것으로 밝혀졌다. 이와 같이 B재의 마모면에 이착물이 많은 것은 BM재나 BC재에 비해 마모면의 온도상승이 현저하였기 때문으로 생각된다. BM재의 경우는 전 속도영역에서 scratch가 관찰되나 상대재의 단면곡선을 나타낸 Fig. 11에서 보듯이 B재의 상대재는 현저한 groove가 확인되나 BM재의 경우는 전반적으로 평탄하

여 이착현상은 거의 없는 것으로 밝혀졌다. 이는 MoS₂의 윤활작용의 영향으로 사료된다.

일반적으로 연질재료는 응착된 후 전단시 prow를 형성하면서 마모가 진행되는 것으로 알려져 있다. 그래서 약한 재료는 scratch가 짧고 강한 재료는 길어진다[8]. Table 1에서 보듯이 경도는 시편 간에 커다란 차이는 없으나 B재에 비해 BC재가 높고, BM재가 가장 높았다. 결국 B재는 경도가 낮아 변형마모의 형태로 진행되면서 마모가 적으나 BC재나 BM재는 고체윤활제 첨가로 경도상승효과가 작용하여 scratch로 전환되면서 마모가 많아진 것으로 생각되어진다. 속도 증가에 따라서도 B재는 상대재 마모 입자의 시편으로의 몰입이 커서 응착 후 대부분 상대재에서 마모가 발생하므로 시편의 마모는 적어지는 것으로 생각된다. 그러나 BM재의 경우는 응착 후 경도상승으로 긴 scratch발생으로 마모량이 현저하나 MoS₂의 영향으로 안정적인 마찰을 나타내는 것으로 사료된다. MC재의 경우도 경도상승으로 scratch가 길어지나 Cu₂S의 작용으로 마찰면의 온도상승이 MoS₂정도는 아니나 낮아져 양호한 마찰마모특성을 보이는 것으로 사료된다. 그러나 윤활작용이 큰 MoS₂첨가 청동이 Cu₂S첨가 청동보다 마모율이 높게 나타난 것은 이들 고체윤활제와 청동입자와의 계면에서의 밀착력이 Cu₂S보다는 적기 때문으로 사료되나 분명하지는 않다.

이상의 결과 Cu₂S첨가 소결청동은 MoS₂첨가 소결청동 정도는 아니나 동일하게 Cu₂S의 낮은 전단강도로 마찰면의 온도상승을 저하시켜 양호한 마찰마모특성을 보이는 것으로 생각할 수 있다. 더욱이 Cu₂S첨가 소결청동은 MoS₂첨가 소결청동보다 마모특성이 양호하여 경제적인 면을 생각하면 Cu₂S의 고체윤활제로써의 적용 가능성은 높은 것으로 추정된다.

4. 결 론

Cu-10%Sn 조성의 혼합분말과 이들에 고체윤활제로 Cu₂S와 MoS₂를 각각 1.5%씩 첨가 한 3종류의 시편에 대해 각각 미끄럼 마찰마모특성을 조사하고 비교하여 Cu₂S의 고체윤활제로써의 적용가능성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소결청동의 마모특성은 저속에서는 높은 마모율이나 속도가 증가함에 따라 감소한다. 그러나 마모특성은 고체윤활제를 첨가 않은 소결청동이 가장 양호하였으며 MoS₂첨가 소결청동이 가장 열악하였다. 이는

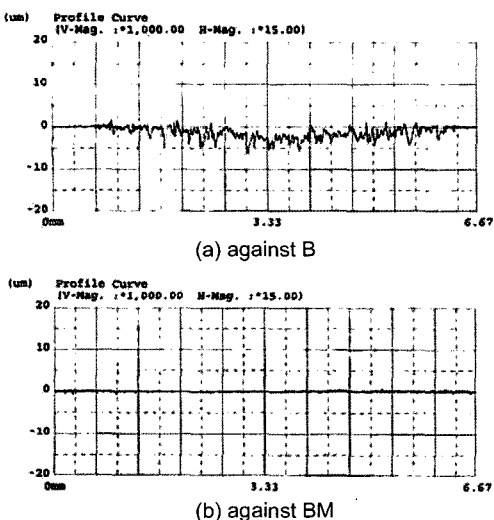


Fig. 11. Profile curves on worn surface of counter material tested at 2 m/s against B and BM.

고체윤활제를 첨가한 경우 경도상승으로 응착 후 Prow 형성이 어려워지기 때문으로 생각되었다.

2) Cu_2S 첨가 소결청동의 마모특성은 초기마모영역에서 고체윤활제 미첨가 소결청동의 마모특성과 유사하게 양호하였으나 정상마모영역에서는 고체윤활제 미첨가 소결청동과 MoS_2 첨가 소결청동의 중간 특성을 가지는 것으로 확인되었다.

3) 마찰특성은 MoS_2 첨가 소결청동이 가장 안정적이고 속도증가에 따라 감소하였다. 그러나 Cu_2S 첨가 소결청동도 양호한 것으로 밝혀졌다. 이러한 마찰마모특성의 향상은 고체윤활제에 의해 마찰면의 온도상승 저하와 경도상승이 동시에 작용한 것으로 생각되었다.

참고문헌

1. 정선모, "윤활공학," 동명사, pp. 207-212, 1987.
2. US Patent 6, 305, 847.
3. Luise Gudmand-Hoyer, Allan Bach, Georg T. Nielsen, Per Morgan, "Tribological Properties of Automotive Disc Brakes with Solid Lubricants," *Wear*, Vol. 232, pp. 168-175, (1999).
4. 燃焼合成研究會, "燃焼合成の化學." 株式會社TIC, 日本, 1992.
5. 日本材料科學會, "金屬間化合物と材料," 裳華房, 日本, 1995.
6. C. C. Koch and J. D. Whittenberger, "Mechanical Milling/Alloying of Intermetallics," *Intermetallics*, Vol. 4, pp. 339-355, 1996.
7. H. Y. Lee, "Analysis of Sliding Wear Mode on Annealed Steel by X-ray Diffraction Technique," *Wear*, Vol. 256, no. 4, pp. 657-663, 2004.
8. 葉山房夫, 金屬合金の摩耗現象の基礎 `丸善, 日本, 59, 1987.