

청동소재의 경도 및 마멸특성에 관한 실험적 연구

김청균* · 김경섭

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터

Experimental Study on the Hardness and Wear Characteristics of Bronze Metals

Chung Kyun Kim[†] and Kyung Sup Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology Center, Hongik University
(Received April 1, 2009; Revised May 13, 2009; Accepted May 17, 2009)

Abstract – This paper presents the hardness and wear characteristic of bronze metals, which are manufactured by a sintering process with a high pressuring technology. A bronze metal with a high hardness and anti-wear properties is usually used for a high pressure cylinder and a pin-bush bearing. The new bronze metal in which is manufactured for this experimental study shows very high hardness of 192~220 Hv compared with that of a conventional bronze metal of 120~140 Hv. The high hardness of new bronze metals is strongly related to the radical reduction of wear volumes and an improved surface roughness of operated worn surfaces. As explained by previous many research works, the improved hardness of nonferrous metals may increase a load-carrying capacity and anti-wear properties of tribological components.

Keywords – hardness(경도), wear characteristics(마멸특성), bronze metal(청동금속), surface roughness(표면 거칠기)

1. 서 론

동(copper)을 기저금속(base metals)으로 제조한 동합금 소재에는 Sn을 혼합한 청동(bronze)과 Zn을 섞은 황동(brass)으로 크게 분류할 수 있다. 청동소재에 P를 넣은 인청동은 내식성과 내마멸성이 우수하여 유압실린더, 밸브, 기어, 베어링, 부싱, 슬리브, 임펠러를 비롯한 일반 기계부품을 생산하는데 널리 사용하고, Pb를 넣은 연청동은 내압성과 내마멸성, 윤활성이 우수하므로 베어링, 부싱, 실린더, 밸브 등의 부품제조에 많이 적용되고 있다. 주물제조 안정성이 우수하여 기계부품 생산에 많이 사용하는 구리기저 합금소재도 최근에는 환경오염과 인체에 대한 유해 가능성을 줄이기 위해 많은 기술개발을 추진하고 있다. 일례로, 유해 중금속으로 분류된 Pb 대신에 Bi와 같은 대체소재를 사용하여 친환경 제품개

발에 많은 노력을 기울이고 있다[1]. 특히 환경과 보건 안전을 중시하는 유럽을 중심으로 선진국에서는 유해금속 사용을 점진적으로 금지하고, 무해소재만을 사용한 기계부품 및 시스템을 생산하고 있다.

따라서 본 연구에서 실험적으로 수행한 청동소재에 대한 경도 및 마멸특성 평가에서도 기존에 많이 사용하던 유해성분을 함유한 유연 청동소재 대신에 비스무트를 혼합한 무연청동(pb-free bronze) 소재를 제조하였다. 새로운 소재는 항상 기존소재에 비해 기계적 특성이 우수하면서 유해성이 없어야 한다. 이때 마멸특성을 고찰하기 위한 미끄럼마찰 운동표면에서의 접촉모드는 건조마찰, 혼합마찰, 윤활마찰을 고려하였다.

2. 시편 및 실험방법

2-1. 청동시편

본 실험에 사용된 청동소재는 85% 정도의 동소재에

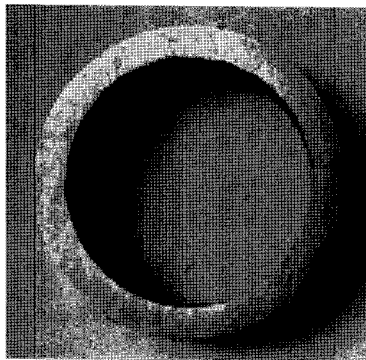
[†]주저자 · 책임저자 : ckkim_hongik@nate.com

10% 정도의 주석, 5% 정도의 비스무트를 혼합하여 소결로에서 합금소재를 제조하였다. 이것은 기존의 청동소재에서 납(Pb)을 사용한 것과는 다른 친환경의 새로운 청동소재이다. 소결합금으로 소재를 제조하는 공정에서 공기의 혼입에 의한 산화물질의 생성은 경도 및 내마멸성 저하로 이어져 문제가 될 수 있다. 따라서 양질의 청동합금을 생산하기 위해서는 고온의 밀폐 공간에서 소재를 제조하는 것이 중요하다.

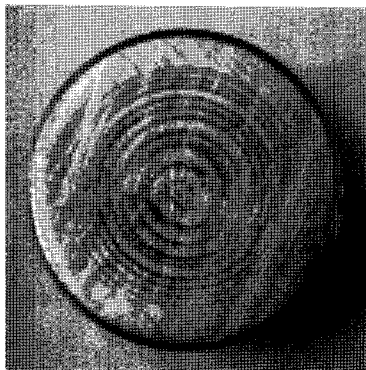
소결과정에서 환봉형상으로 제조한 청동시편을 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 유압실린더, 베어링과 같은 제품을 생산하기에 적합한 튜브 형상으로 가공한다. 청동소재에 대한 경도 및 마멸시험을 진행하기 위해 원통형의 청동소재와 평판의 강제 상호간에 상대접촉 마찰운동을 할 수 있도록 설계하여 마찰·마멸시험을 수행하였다.

2-2. 실험장치

Fig. 1에서 제시한 청동시편에 대한 경도를 측정하



(a) Bronze specimen



(b) Steel specimen

Fig. 1. Test specimen of a bronze tube and a steel plate.



Fig. 2. Vickers hardness tester.

기 위해 Fig. 2에서 보여준 비커스 경도계를 사용하였다. 경도는 디스크 평면의 원주방향을 따라서 90° 간격으로 균등하게 나누어 측정하였다. 여기서 사용한 청동시편은 5개이지만, 경도 및 마멸시험은 표면의 전면과 후면을 동시에 사용하여 반복시험에 따른 오차를 줄이려고 노력하였다.

또한 마멸거동 실험에 사용한 장치는 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 청동소재로 제작한 디스크 형상시편과 강재소재로 제작한 원판시편을 일직선상에 조립하여 원주면을 따라 접촉시키면서 회전마찰 운동면에 오일을 공급한다. 상부의 스프링 가압장치에 의해 시편의

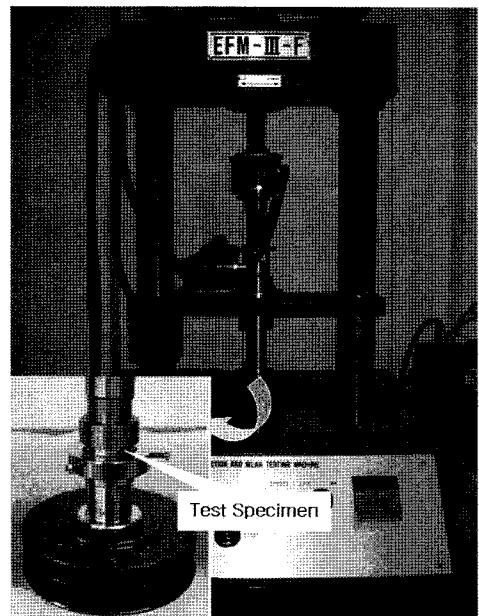


Fig. 3. Experimental test rig for a rubbing contact mode of a disk/circular plate with and without oils.

상대접촉 운동면에는 안정된 접촉하중을 제공할 수 있고, 마찰계수를 측정하기 위한 마찰토크는 로드셀과 압에 의해 간단하게 측정할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 경도시험

구리와 주석에 비스무트를 혼합하여 제조한 청동소재에 대한 경도를 측정하기 위해 사용한 비커스 경도계의 시험하중은 500 g 이고, 시편은 미끄럼마찰 실험을 위해 디스크 형상으로 제작하였다. 경도는 Fig. 1에서 보여준 시편의 원주방향을 따라서 90°씩 균등하게 4개 지역으로 나누어 앞쪽과 뒤쪽을 함께 측정하여 가능한 실험 데이터를 많이 확보하도록 하였다.

Fig. 4는 유압실린더, 슬라이더, 베어링, 부상 등에 사용하기 위해 개발한 청동시편의 앞쪽과 뒤쪽에서 측정된 경도의 대표적인 산포범위를 요약한 결과이다. Fig. 4에서 제시한 경도측정 결과를 보면, 시편 1번의 평균경도는 192 Hv 정도이고, 시편 5번의 평균경도는 220 Hv 정도로 생산된 시험편에 따라 15%나 증가된 경도 차이를 나타냈다. Fig. 4의 경도산포 데이터를 볼 때 아직은 소재의 균질성이 확보되지 않았다고 할 수 있지만, 기존의 청동소재에 비해 대단히 높은 경도를 나타내고 있다. 본 실험을 통해 확보한 청동시편의 경도는 기존의 청동소재 경도값 120~140 Hv보다 최소 37%에서 최대 83%의 높은 경도값 상승을 보여주고

있다. 보통 유압실린더, 베어링, 편부싱 등의 소재로 사용하기 위해 개발한 청동소재의 평균경도는 120 Hv[2]로 자동차와 같은 운반기계에 많이 사용하고 있으며, 130~140 Hv 정도의 높은 경도를 갖는 청동소재 [3]는 기존의 소결합금 제조법으로는 생산할 수 없고, 원심주조나 HIP 제조법[4]을 사용해야 본 실험에서 사용한 청동시편을 제조할 수 있다.

청동소재에서 경도가 높다는 것은 소재의 내부에 상존하는 결함이 많이 없어졌고, 소재내부의 미세크랙이나 어떠한 공극도 없다는 것을 의미하는 것으로 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 기계부품으로 사용할 경우 내마멸성과 내구성이 높아지게 된다. 본 실험에서 제시한 청동소재는 유해금속인 Pb 대신에 비스무트를 사용하여 국제적인 환경기준을 만족하는 것은 물론이고, 유압실린더나 베어링과 같은 트라이볼로지 소재로 사용할 경우 저마찰성과 특히 내마멸 내구성을 확보할 수 있게 된다.

3-2. 마멸실험

Fig. 5는 50 rpm으로 회전하는 시편에 5 kg의 하중이 가해진 상태에서 청동소재에 대한 마멸실험 측정결과를 제시한 것이다. 마멸실험에 사용한 시편의 크기에 비해 마멸 발생량이 대단히 적기 때문에 초정밀 저울을 사용하였지만, Fig. 5에서 제시한 데이터를 정확하게 신뢰할 수는 없다. 그러나 시편의 미끄럼마찰 접촉표면에서 발생한 마멸패턴을 통해 소재특성을 평가할 수 있고, 특히 청동소재의 경도와 연계하여 고찰하면 실험데이터에 대한 의미를 부여할 수 있다. Fig. 5의 실험결과에서 시편 5는 최저의 마멸량을 발생하였

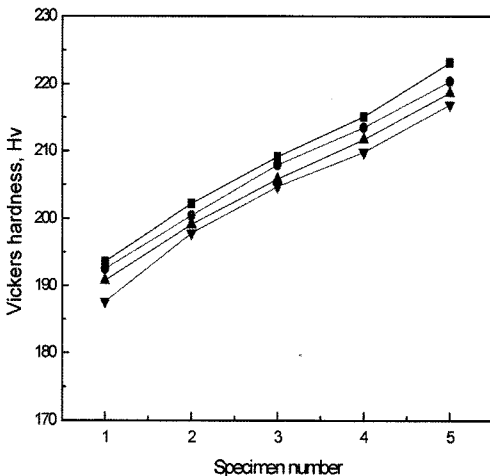


Fig. 4. Vickers hardness of five bronze metals with a contact load of 500 kg.

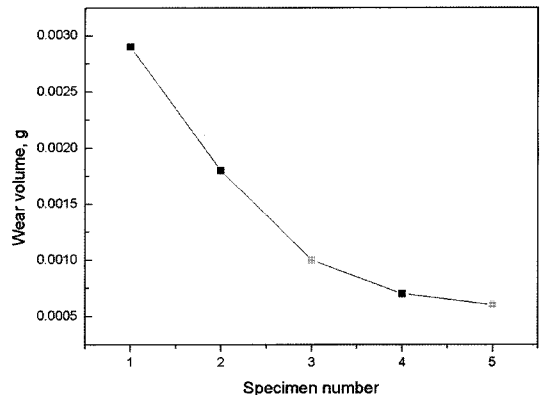


Fig. 5. Wear of five bronze metal specimens at the speed of 50 rpm and a load of 5 kg.

는데, 이것을 Fig. 4에서 제시한 경도 실험결과를 연계 하면 220 Hv 정도로 가장 높은 경도를 보여준 시편으로 기존에 수행된 연구결과와 일치한다. 또한, 마멸량을 가장 많이 발생한 시편은 1번이고, 이것은 Fig. 4에서 경도값이 상대적으로 가장 낮은 시편 1의 192 Hv로 밀접한 관계를 맺고 있다. 여기서 제시된 실험결과에 의하면, 완만한 경도의 증가는 소재의 마멸 발생량을 급격하게 떨어뜨리는 요소로 작용한다.

요약하면, 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 표면에서 발생하는 마멸생성은 Archard가 제시한 마멸방정식[5]을 잘 따르는 것으로 나타났다. 따라서 미끄럼마찰 접촉운동면에서 발생하는 마멸량을 줄이기 위해서는 마찰 표면의 경도를 높이는 것이 중요하다. 따라서 강재(steel)의 경우는 보통 열처리에 의해 경도를 높일 수 있지만, 청동처럼 비철금속을 사용하는 트라이볼로지 요소부품은 마멸을 줄이기 위해 소재의 밀도를 증가시켜 경도를 높이는 방법이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 6은 디스크 형상의 청동시편과 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 강재원판 사이의 마찰운동 접촉모드에 따라 달라지는 마멸거동 특성을 제시한 실험결과이다. 미끄럼마찰 운동면의 접촉모드가 달라져도 접촉표면에 가해지는 하중에 따라 발생하는 마멸량은 완만하게 상승하는 경향을 보여주고 있다. 실험결과에 의하면, 마찰접촉 운동면에 윤활유 공급이 원활하게 진행된다면, 즉 건조마찰에서 윤활마찰로 원활하게 이동하면 마멸 발생량은 급격하게 줄어드는 결과를 제시한다. 그러나 하중이 증가할수록 마멸발생량은 더욱 증가하는데, 이것은 마찰접촉 운동면의 유막이 충분하게 형성되지 못하기 때문이다. 마찰접촉 운동면에 유막형성이 잘 이

루어지지 못하는 원인은 여러 가지 있지만, 그중에서 접촉하중이 증가하면서 유막간극이 줄어들어 윤활유 공급, 즉 유동이 어려워지는 것도 하나의 문제점으로 지적할 수 있다. 또한, 회전속도가 빨라지면 디스크 시편 및 계면에 유입된 오일의 원심력은 증가하기 때문에 미끄럼마찰 접촉계면으로 유입되어야 할 오일이 오히려 접촉간극으로부터 멀어지는 현상을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 미끄럼마찰 운동표면으로 윤활유 공급이 어려워질 정도의 빠른 회전속도는 하중과 함께 유막파손에 의한 마멸발생을 증가시키는 복합요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

3-3. 거칠기시험

Fig. 7은 50 rpm의 회전속도와 0~15 kg의 하중조건에서 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 경우, 마멸실험을 통해 확보한 시편의 표면거칠기를 측정된 결과이다. 표면거칠기에 대한 측정결과에 따르면 미끄럼마찰 접촉 표면에서 발생하는 마멸과 밀접한 관계를 맺고 있다.

Fig. 7(a)는 건조마찰 접촉면에서 미끄럼마찰 접촉운동 실험을 수행한 다음, 마찰접촉 표면에 대한 RMS(Root Mean Square)를 측정된 것으로 0.35~1.03의 높은 표면거칠기를 나타내고 있다. Fig. 7(b)는 마찰접촉 운동표면에 충분한 정도의 오일이 공급되지 못하기 때문에 발생하는 혼합마찰 접촉환경의 운동모드에서 정상적인 실험이 끝난 시편의 마찰접촉 표면에 대한 RMS를 측정된 것으로 0.42~0.76의 표면거칠기를 나타내고 있다. 이것은 건조마찰의 표면거칠기에 비해 많이 낮아진 거칠기로 특히 고하중을 받는 접촉모드에서 74%나 줄어든 표면거칠기 상태, 즉 마멸발생량이 그만큼 많이 줄어들었다는 것으로 미끄럼마찰 접촉면에 조금이라도 공급된 오일에 의한 유막형성의 중요성을 보여준 실험결과이다. Fig. 7(c)는 미끄럼마찰 접촉표면을 윤활유에 완전히 담가버린 오일배스(oil bath) 윤활유 공급방식을 채택한 경우로 실험한 후의 시편의 접촉표면에 대한 RMS는 0.16~0.55로 크게 개선된 표면거칠기를 제시하고 있다. 이것은 하중을 가하지 않은 초기의 마찰접촉 운동모드에서는 46%, 15 kg의 높은 하중의 마찰접촉 모드에서는 53%나 향상된 표면거칠기를 나타낸 결과로 미끄럼마찰 접촉표면의 운동상태에서 윤활유 공급에 의한 운동표면의 저마찰, 내마멸 표면상태를 유지한다는 것은 대단히 중요하다는 실험결과로 또 다시 입증하였다.

결국 청동과 같은 비철소재처럼 열처리를 할 수 없

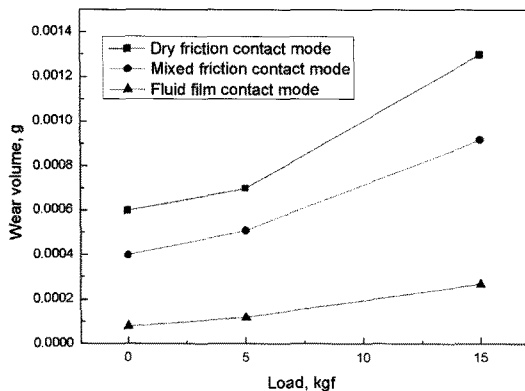
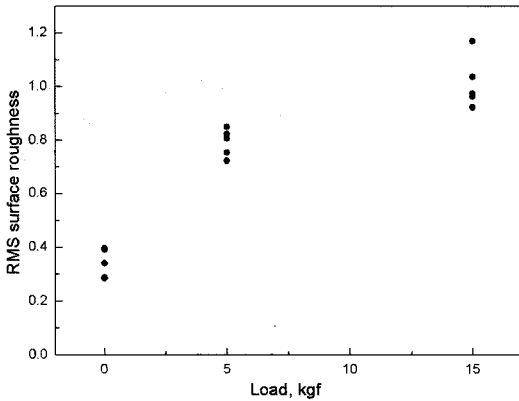
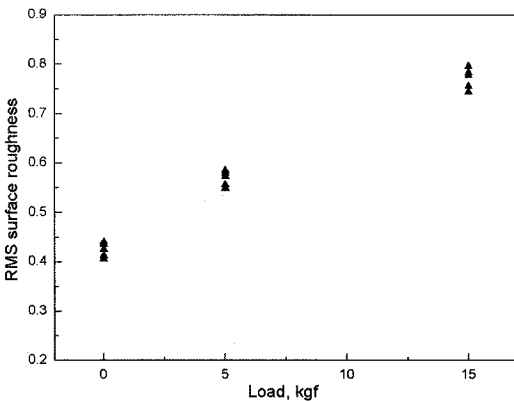


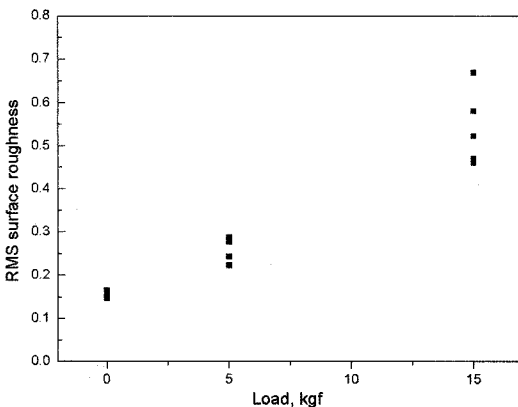
Fig. 6. Wear of bronze metals for various rubbing contact modes at the speed of 50 rpm as a function of loads.



(a) Dry friction contact mode without oiling



(b) Mixed friction contact mode with drop oiling



(c) Fluid film contact mode with bath oiling

Fig. 7. Surface roughness on the rubbed surface of bronze metals for the applied load.

는 금속소재는 밀도증가에 의한 각종 결함을 제거함으로써 경도를 높일 수 있고, 고경도 소재는 트라이볼로

지 거동특성을 향상시키는 지름길이라는 것이다. 본 연구에서 사용한 청동소재는 최근의 기계부품 제작에서 흔하게 요구하는 고경도에 의한 높은 하중담당과 내마멸성을 보여준다는 측면에서 중요한 소재라 할 수 있다.

4. 결 론

본 실험에서 사용한 청동소재는 Pb와 같은 유해금속을 제거한 친환경 무연소재로 특수한 소결합금 제조 공법으로 디스크 형상의 청동시편을 제작하였다.

청동시편의 기계적 특성을 알아보기 위해 비커스 경도계로 마찰접촉 운동표면에 대한 경도시험을 수행한 결과 192~220 Hv로 측정되었고, 이것은 기존의 120~140 Hv에 비해 대단히 높아진 결과를 제시한 것이다. 이렇게 높은 경도값은 청동소재의 제조기술이 다르기 때문에 소재내부의 결함이나 미세크랙 등이 극히 적게 발생한다는 것을 의미한다.

또한, 마멸실험을 수행한 결과에 의하면 미끄럼마찰 접촉표면에 오일물질을 공급할 경우 마멸발생이 크게 줄어드는 것은 당연한 결과이지만, 청동소재의 미끄럼 마찰 접촉면에 윤활유 공급이 거의 없어도 청동소재의 경도가 높아지면서 마멸 발생량이 현저하게 줄어든다는 사실을 보여주고 있다. 따라서 본 실험에서 제조한 고경도의 내마멸 청동소재는 유압 실린더나 베어링과 같은 고강도의 내마멸 기계부품에 적용하면 유리할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 김청균, 오경석, “내연기관용 무연 핀부시의 마찰특성에 관한 실험적 연구”, 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 6, pp. 306-311, 2007.
2. 김청균, 김도현, “핀부시 베어링 소재의 계면접합특성에 관한 실험적 연구”, 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 6, pp. 255-260, 2007.
3. 김도현, 이병관, 심종현, 이창주, 김청균, “핀부시 베어링의 물리적 특성에 관한 실험적 연구”, 한국윤활학회 제46회 춘계학술대회 논문집, pp. 229-234, June 19-20, 2008.
4. Steven Mussman, “Hot Isostatic Pressing”, The Institute of Materials, 1999.
5. 김청균, “트라이볼로지”, 형설출판사, 2006.