

내연기관용 무연 핀부싱의 마찰특성에 관한 실험적 연구

김청균[†] · 오경석

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Experimental Study on Friction Characteristics of Pb-free Pin Bushing for an Internal Combustion Engine

Chung Kyun Kim[†] and Kyoung Seok Oh

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – This paper presents the friction characteristics of pb-free pin bushing bearings for an automotive gasoline engine. The external load is 100 N to 600 N and the speed of the pin bushing bearing is 1000 rpm to 3000 rpm against the rubbing surfaces. And the contact modes of rubbing surfaces between a piston pin and a pb-free pin bushing specimen are a dry friction, an oil lubricated friction and a mixed friction that is starved by a lack of engine oil. Two influential factors of a contact rubbing modes and a material property are very important parameters on the tribological performance of a friction characteristic between a piston pin and a pb-free pin bushing. The experimental result shows that the pin bushing speed of 2000 rpm shows a typical oil film lubricated sliding contact mode in which means that as the applied load is increased, the friction loss is increasing. But other contact mode depending on the speed and the load may affect to the friction coefficient without a regular and uniform trend. In summary, the oil lubricated rubbing surface definitely decreases a running-in period in short and increase oil film stiffness, and this may leads the reduction of a friction loss.

Key words – pin bushing bearing, friction characteristics, friction coefficient, wear, tribology.

1. 서 론

내연기관에서 피스톤의 상단부 헤드에 가해지는 폭발에너지를 크랭크축에 효율적으로 전달하기 위해 두 개의 연결판과 부싱베어링(bushing bearing)ⁱ 조립된다 [1]. 하나는 커넥팅로드의 소단부(small end)에 입입된 핀부싱이고, 또 다른 하나는 커넥팅로드의 대단부(big end)에 조립된 분활형 평면베어링(split plain bearing)으로 크랭크축에 연결되어 크랭크축의 원활한 회전력을 보장한다. 이때 소단부의 핀부싱은 엔진오일을 공급하기가 곤란하고 구조적으로 회전 진자운동을 하기 때문에 유막형성이 상대적으로 어려워 혼합운동, 경계운동, 심지어 건조마찰 상태에서 운동을 하기도 한다. 반면에 평면베어링은 조립성 위해 180° 분활형을 사용하

지만, 윤활유 공급이 용이하고 회전운동을 하므로 유막 형성이 쉬워 혼합운동 또는 완전유체윤활을 한다고 본다[2].

최근에 유해성 금속성분의 자동차 부품으로 사용을 금지하는 환경중시의 자동차 부품개발이 주류를 이루면서 납, 카드뮴과 같은 유해성분을 혼입한 베어링은 사용할 수 없게 되었다. 따라서 기업체는 제품개발 또는 기술도입에 의한 제품생산을 지속적으로 추구하여 성과를 거두고 있으나, 상대적으로 기반연구는 아직 활발하지 못하다[3-5].

본 연구에서는 대표적인 유해성분인 납을 제거하고 비스무트를 대체성분으로 사용한 핀부싱 베어링 소재에 대한 마찰실험을 통해 마찰특성을 고찰하고자 한다. 핀부싱의 마찰접촉 운동조건은 비교적 유막형성이 어려운 혼합마찰, 경계마찰, 건조마찰의 환경에서 운전되는 경우가 많으므로 이에 적합한 모의실험을 수행하여 무연

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@hanmail.net

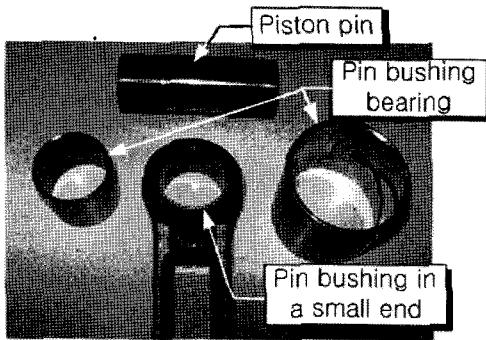


Fig. 1. Disassembled pin bushings and a piston pin in a small end of a connecting rod.

소재에 대한 마찰특성을 고찰하고자 한다.

2. 핀부싱 소재특성

핀부싱용 소재는 윤활성과 내하중성이 우수하고, 여기에 윤활유 공급이 원활할 경우 피스톤 핀과 부싱베어링 사이의 윤활작용이 양호해질 수 있지만, 커넥팅로드의 회전진자운동 때문에 완전윤활보다는 혼합윤활을 유지하는 경우가 많다. 하지만, 연소실의 폭발작용이나 윤활유의 공급부족, 부적합한 윤활유의 선정 등으로 간극에 유막형성을 더욱 어렵게 하여 유막손상이 많아진다. 그 결과로 혼합마찰, 경계마찰 또는 부분적인 건조마찰을 조장하기 때문에 마찰력이 심하게 증가하고, 이에 따라 마찰작용은 빠르게 진행되어 핀부싱의 수명은 크게 단축된다.

Fig. 1에서 아직 사용하지 않은 신품 핀부싱 베어링, 이미 사용한 피스톤 핀과 커넥팅로드의 소단부에 조립된 핀부싱을 각각 보여주고 있다. 여기서 왼쪽의 핀부싱 사진은 가솔린 엔진용으로 핀과 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 표면에 오일홈이 없으나, 오른쪽의 디젤 엔진용 핀부싱은 오일구멍을 중심으로 경사진 오일홈을 설치하여 오일유동과 유막형성을 용이하도록 제작한.

Fig. 2는 핀부싱 베어링을 제조하는 기본 복합소재를 보여준 것으로 핀과 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 표면은 구리를 주성분으로 제조한 인청동 소재의 박판으로 마찰력을 줄여주는 기능을 갖는다. 반면에 인청동 박판소재에 걸리는 하중을 전달받아 외부하중을 직접적으로 담당해야 하는 SPCC 백메탈 소재는 핀부싱 소재와 기계적 톤링·압접을 통해 Fig. 2와 같은 복합재로 제조한 다음 이 평판 스트립을 원형으로 성형가공하고 마지막으로 가공정밀도와 진원도를 확보하기

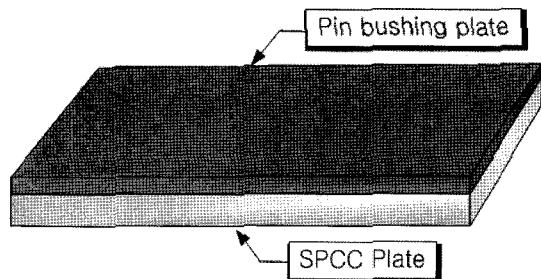


Fig. 2. Roll cladding plate for a pin bushing bearing.

위해 절삭가공을 한다.

핀부싱에 사용된 소재에는 Pb가 함유된 인청동 계열의 기존부싱과 유해금속 사용을 금지하는 환경정책에 의해 새로이 개발된 Pb가 없는 무연 핀부싱의 두 가지가 있다. 핀부싱 베어링 소재는 Cu80, Pb10, Sn10의 성분으로 구성된 기존의 핀부싱 유연베어링은 피로강도가 보통이지만 미끄럼마찰 운동특성은 우수하다. 반면에 새로이 개발된 CuSnBi 성분의 핀부싱 무연베어링은 피로강도가 우수하고 미끄럼마찰 운동성이 대단히 우수하며, 특히 시저현상에 대한 내저항성이 높다는 장점을 갖고 있다. 따라서 유해성분이 납 성분을 제거한 핀부싱은 자동차를 비롯한 모든 산업설비에 많이 사용하게 될 것이다.

3. 실험적 연구

3-1. 실험장치와 실험방법

본 실험에 사용된 마찰 시험기는 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 링-디스크 마찰접촉 운동모드로 소재의 마찰특성을 실험할 수 있다. 이 그림에서 핀부싱 베어링 시험편 A의 위쪽에 설치한 코일스프링으로 고정한 실제의 피스톤 핀 소재에 대해 아래쪽의 모터에 의해 구동되는 Fig. 4와 같은 디스크 형상의 시험편을 $30 \times 30 \times 1.5$ 정사각형의 박판으로 제작하여 원형의 지그에 조립하여 사용한다. 또한 미끄럼 마찰운동을 하는 피스톤 링의 형상은 실제의 피스톤 핀을 가공한 것으로 내경 6 mm, 외경 10 mm의 원통형상으로 피스톤 핀과 핀부싱의 상대접촉 미끄럼마찰 특성을 그대로 유지하면서 마찰특성을 가장 잘 나타낼 것으로 예상되어 핀부싱 소재에 대한 링-디스크 마찰실험을 수행하였다[7].

마찰·마찰특성 실험에서 디스크 형상의 시편에 가한 기본하중은 100 N, 300 N, 600 N이고, 이를 하중은 코일스프링에 의해 수직방향으로 하중을 가하는 메

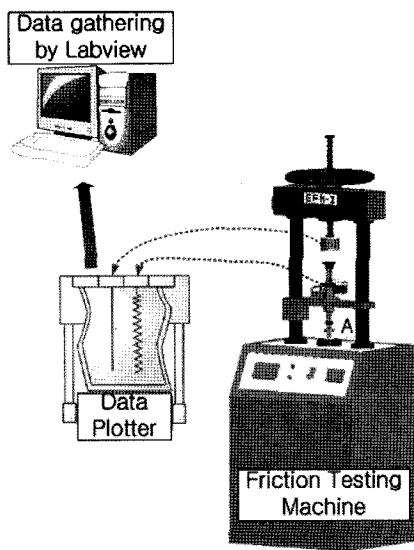


Fig. 3. Ring-on-disk type friction tester.

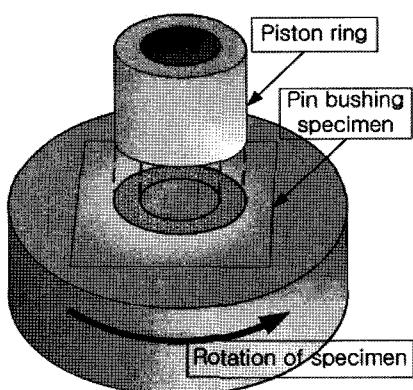


Fig. 4. Ring-disk rubbing model between a real piston pin and a Pb-free pin busing specimen.

커니즘을 하고 있다. 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 디스크 시편에는 1000~3000 rpm(116~349 mm/s)의 속도를 설정하여 회전운동을 시작할 때와 끝날 때의 속도를 항상 같게 유지하도록 하였고, 상단부에서 가하는 스프링의 정적하중과 디스크의 회전에 따른 마찰 토크는 로드셀로 측정하여 환산한 결과를 마찰계수로 제시하고 있다.

3-2. 실험조건

핀부싱 배어링에는 윤활유가 충분히 공급되어 피스톤과 핀부싱 사이의 윤활간극에 최소유막두께가 안정적으로 형성되어 마찰력 발생과 동력손실을 최대한

줄여야 한다. 그러나 자동차용 핀부싱의 경우는 미세 간극에 윤활유를 충분히 공급할 수 있는 메카니즘이 아니기 때문에 유체윤활보다는 혼합마찰, 경계마찰, 약한 건조마찰 운동조건에서 작동하는 경우가 많다. 따라서 본 실험에서는 피스톤 핀과 핀부싱 베어링의 마찰접촉 운동표면에서 발생되는 마찰특성을 고찰하기 위해 마찰표면의 접촉모드는 윤활마찰, 혼합마찰, 건조마찰의 3가지 경우를 설정하여 실험하였다.

미끄럼마찰 접촉운동에 의해 발생되는 마찰계수는 미끄럼마찰 접촉면에 가해지는 스프링 방식의 정적하중과 시험편의 회전속도에 의해 결정된다. 이때 시험편에 가한 정하중은 100~600 N이고, 운동속도는 1000 rpm(116 mm/s), 2000 rpm(233 mm/s), 3000 rpm(349 mm/s)의 3가지에 대해 30분 정도의 마찰실험 시간을 통해 안정된 마찰접촉 평형조건을 얻었다.

4. 실험결과 및 고찰

핀부싱 소재에 대한 마찰실험은 윤활유 공급이 전혀 없는 건조마찰, 윤활유를 한번 공급하고 회전마찰 운동을 지속적으로 유지한 혼합마찰 실험조건, 윤활유를 유액식(oil bath)으로 공급하여 윤활마찰 접촉운동을 유지한 상태에 대한 마찰특성을 고찰하였다. Fig. 4와 같은 피스톤 링-디스크 마찰시편에 가한 하중은 100 N, 300 N, 600 N이고, 회전속도는 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm의 3가지 경우로 핀부싱 무연소재의 트라이볼로지 특성에 대한 실험을 수행하였다.

4-1. 건조마찰특성

Fig. 5는 116 mm/s(1,000 rpm)~349 mm/s(3,000 rpm)의 건조마찰 접촉운동을 하는 Fig. 4와 같은 링-디스크 마찰표면에 100 N의 정적하중을 가한 상태에서 마찰계수를 측정한 결과이다. Fig. 5에 의하면 건조마찰 접촉표면에서는 30분간의 마찰실험을 수행하여도 높은 마찰계수가 불안정한 상태로 계속 유지되고 있다. 길들이기 과정의 실험초반에서는 회전수 변동에 따른 영향을 크게 받는 것으로 나타났지만, 약 25분을 넘어서면 회전속도에 관계없이 마찰특성이 혼재되는 불안정한 현상으로 발전한다. 이것은 초기의 길들이기 과정 동안은 접촉환경의 마찰조건에 의해 더 큰 영향을 받지만, 시간이 경과함에 따라 회전속도에 의해 발생한 미끄럼 마찰열이 핀부싱 소재에 지속적으로 축적되면 소재의 기계적 특성이 바뀌고 동시에 소재고유의

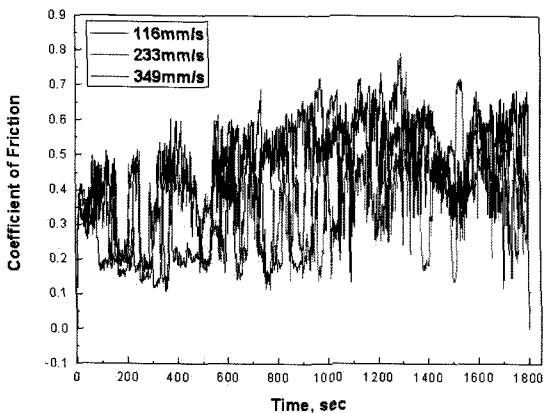
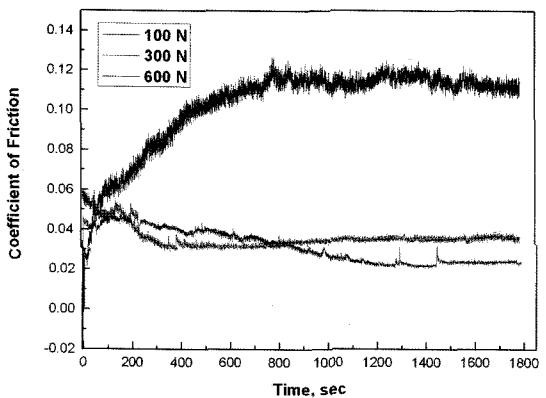
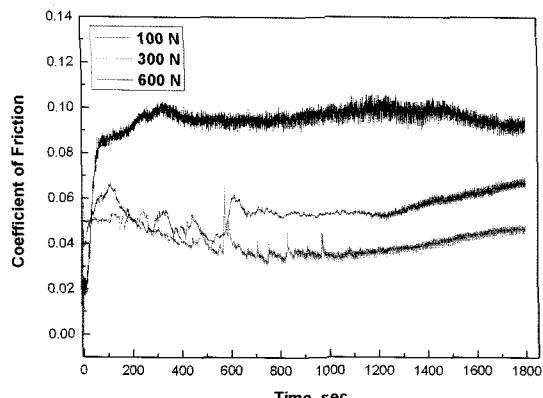


Fig. 5. Friction coefficient of dry rubbing contact mode with a normal force of 100 N for a ring-on-disk rubbing mode.



(a) Oil film friction contact mode



(b) Mixed friction contact mode

Fig. 6. Friction coefficient of sliding contact modes at 3000 rpm for various normal contact loads in a ring-on-disk friction tester.

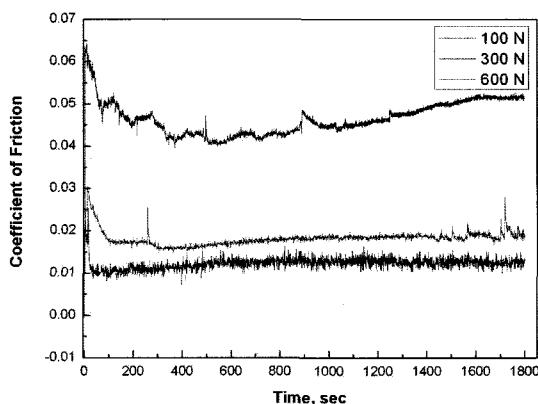
마찰접촉 표면의 불안전성으로 인해 발생하는 것으로 생각된다.

4-2. 혼합마찰 및 윤활마찰특성

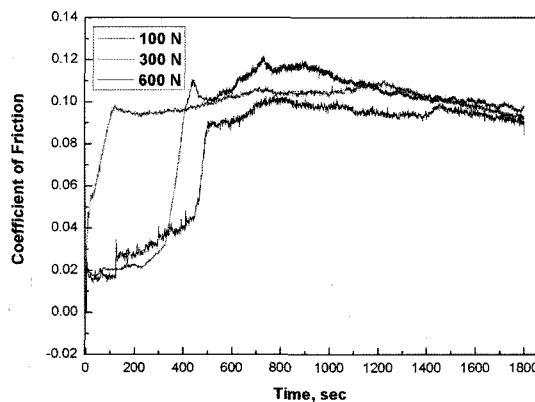
Fig. 6은 1000 rpm으로 회전하는 시험편에 마찰하중 100~600 N을 가한 상태에서 마찰계수를 윤활마찰과 혼합마찰 접촉환경에 대해 측정한 결과이다. 피스톤 링과 편부싱 무연소재의 마찰모드를 충분한 윤활유 공급에 의해 형성된 윤활마찰로 유지된 상태에서 실험한 Fig. 6(a)의 결과에 의하면 모든 하중에 대해 길들이기 구간에서 빠르게 안정되지만, 100 N의 낮은 하중조건에서 작용하는 마찰계수는 0.11 정도로 높게 증가한다. 반면에, 300 N과 600 N의 높은 하중조건에서 작동하는 마찰모드에서는 오히려 0.025~0.035로 접촉모드가 빠르게 안정되는 마찰특성을 보여주고 있다. 이것은 상대적으로 낮은 1000 rpm의 속도에서는 낮은 하중으로 인해 유막형성이 어려워, 즉 유막형성이 잘 진행되지 않은 작동조건에서의 마찰손실은 하중이 낮은 상태에서 오히려 많아질 것이라는 사실이다.

그러나, 혼합윤활 마찰운동을 하는 Fig. 6(b)의 접촉모드도 Fig. 6(a)의 마찰특성과 유사한 경향을 나타내지만, 100 N의 마찰계수는 0.1로 약간 낮아진다. 이것은 낮은 하중에서 회전속도에 의한 영향이 높지 않기 때문에 나타난 현상이다. 반면에 300 N이나 600 N의 경우는 0.04~0.06으로 윤활마찰에 비하여 크게 높아진 마찰특성을 보여준다. 이러한 마찰력 증가현상은 1000 rpm의 낮은 회전수에서 마찰손실은 하중조건이 더 큰 영향을 미쳤다는 것이다. 1000 rpm에서 마찰손실을 줄이는 유일한 방법은 미끄럼마찰 운동표면에 윤활유를 충분히 공급하여 유막을 형성하는 것이다.

Fig. 7은 2000 rpm으로 회전하는 편부싱 시험편에 마찰접촉 하중조건, 100~600 N을 가한 상태에서 마찰계수를 윤활마찰과 혼합마찰 접촉조건에 대해 측정한 실험결과이다. 마찰접촉 운동모드가 윤활마찰일 경우를 나타낸 Fig. 7(a)의 실험결과에 의하면 접촉하중이 가장 높은 600 N에서 0.05 이상의 높은 마찰계수를 유지하지만, 상대적으로 낮은 접촉하중인 300 N과 100 N에서 0.01~0.02의 안정된 마찰계수를 제시하고 있다. 반면에 혼합윤활 마찰운동을 하는 Fig. 7(b)의 길들이기 모드에서는 마찰계수가 0.02~0.1로 대단히 불안정하게 상승하다가 10분정도를 지나면서 마찰페인이 비교적 안정화를 이루는 마찰특성을 보여준다. Fig. 7에서 제시한 실험결과는 회전속도에 의한 유막이 정



(a) Oil film friction contact mode

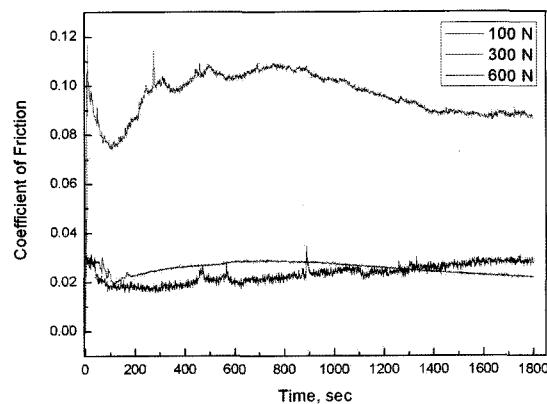


(b) Mixed friction contact mode

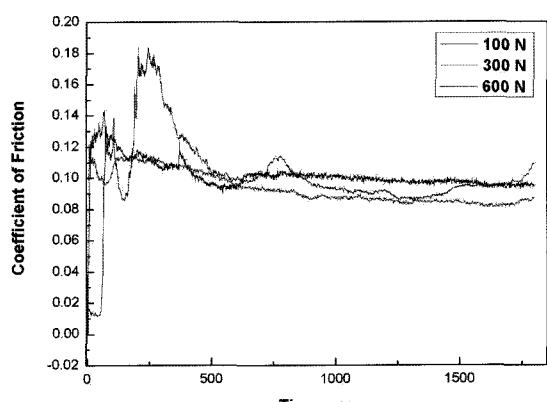
Fig. 7. Friction coefficient of sliding contact modes at the speed of 2000 rpm for various normal contact loads.

상적으로 형성되고, 여기에 접촉하중 증가에 따른 마찰력 증가라는 고전적인 마찰특성을 잘 나타낸다.

Fig. 8은 3000 rpm의 회전속도로 운동하는 편부식 시험편에 100~600 N 정도의 접촉하중을 가할 경우에 발생하는 마찰계수를 윤활마찰과 혼합마찰 접촉조건에 대해 측정한 결과이다. 마찰접촉 운동모드가 윤활마찰일 것이라고 가정하고 제시한 Fig. 8(a)의 실험결과에 의하면 접촉하중이 중간정도인 300 N에서 초창기의 불안정한 마찰계수가 상대적으로 높게 나타났지만 0.09 정도로 유지되고, 접촉하중 600 N과 100 N에서는 안정된 낮은 마찰계수 0.02~0.03을 보여주고 있다. 이것은 회전속도가 낮은 2000 rpm의 경우와는 다른 현상으로 회전속도가 증가된 3000 rpm에서는 윤활마찰의 전형적인 특성이 다르게 나타났다. 상기의 유체마찰에 비



(a) Oil film friction contact mode



(b) Mixed friction contact mode

Fig. 8. Friction coefficient of sliding contact modes at the speed of 3000 rpm for various normal contact loads.

하여 상대적으로 증가된 마찰계수를 보여준 혼합운동 마찰운동의 Fig. 8(b) 접촉모드에서는 하중이 높은 600 N에서 특히 길들이기 구간의 불안정한 마찰특성을 보여주다가 10분정도를 경과하면 다른 접촉하중인 300 N이나 100 N과 같은 마찰패턴으로 바뀌어 안정된 마찰계수 0.1 정도를 나타낸다. 이것은 회전속도와 접촉하중, 그리고 마찰접촉 환경인 윤활마찰과 혼합마찰의 접촉조건에 의해 항상 바뀔 수 있다는 사실이다. 여기서 제시한 실험결과에 의하면 회전속도 3000 rpm 과 하중 300 N은 유막을 충분히 형성하지 못하는 작동조건으로 윤활마찰 작동상태를 제공하지 못하였다. 상대적으로 100 N과 600 N의 경우는 유막형성에 긍정적인 영향을 미쳤고, 더욱이 혼합마찰 작동조건이라고 가정한 Fig. 8(b)의 경우는 오히려 안정된 유막을 형성

하고 있을 것이라는 실험결과로부터 추정할 수 있다. 그렇지만 분명하게 나타난 형상은 윤활유의 충분한 공급에 의해 형성된 유막은 혼합마찰에 비해 마찰계수를 안정적으로 낮추고, 길들이기 안정화가 빠르게 진행된다는 사실이다.

5. 결 론

본 실험적 연구에서는 피스톤 펀으로 제작한 링과 펀부싱 베어링 무연소재로 개발한 펀부싱 베어링용 시험편의 마찰특성을 링디스크 마찰접촉 운동에 의해 형성되는 건조마찰, 윤활마찰, 혼합마찰에 대하여 고찰한 실험결과를 제시하였다.

실험결과에 의하면, 회전속도가 상대적으로 낮은 1000 rpm의 경우 100 N의 낮은 하중에서는 아직 유막이 잘 형성되지 않아 마찰손실이 높게 나타날 수 있으나, 회전속도를 2000 rpm으로 높여서 수행한 실험에서는 하중이 증가할수록 마찰계수가 높아지는 전형적인 마찰거동 특성을 보여주고 있다. 반면에 회전속도를 3000 rpm으로 높여 수행한 실험결과에 의하면 중간정도의 300 N 하중에서 마찰손실이 높게 나타났는데, 이것은 유막형성에 속도에 의한 기여도가 상대적으로 높

기 때문에 발생한 특이현상이다.

실험에서 공통적으로 나타난 마찰특성은 윤활유를 충분히 공급하여 유막형성이 잘 진행될 경우는 마찰계수가 획기적으로 줄어들고, 길들이기 안정화 현상도 빠르게 진행된다는 사실이다.

참고 문헌

1. 김청균, “자동차엔진공학,” 북두출판사, 2004.
2. 김청균, “트라이볼로지,” 형설출판사, 2006.
3. 김도현, 심종현, 김청균, “윤활형태에 따른 커넥팅 로드 펀 부시의 유막 거동에 관한 수치적 연구,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 323-328, 2007.
4. 정남인, 심종현, 김청균, “마이크로 그루브를 통한 커넥팅 로드 펀 부시의 윤활 특성에 관한 연구,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 304-308, 2007.
5. 김청균, “자동차 엔진용 펀부싱 베어링의 SEM/EDX 이용 성분 결합분석에 관한 연구,” 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 5, pp. 195-200, 2007.
6. Jang, Sung-Tae and Lee Young Z., “Friction and Wear Behaviour of Ceramics Under Various Sliding Environments,” *J. of the KSTLE*, Vol. 11, No. 3, pp. 11-23, 1995.