정밀기계용 저 마찰 소재 개발

글 _ 임대순
고려대학교 신소재공학부

1. 서론

산업의 발달과 더불어 동력의 사용이 증가함에 따라 상대적으로 접촉하는 부위에서 마모 및 마찰의 중요성이 부각되고 있다. 브레이크나 클러치와 같이 고 마찰이 필수적인 몇 가지 부품을 제외하고는 피스톤, 베어링, 밸브, 캠과 같은 동력부품과 메커니컬 씰 과 같은 정밀 부품은 저 마찰 특성을 요구하고 있다[1,2]. 서로 접촉하며 움직이는 모든 물건은 마찰을 수반하게 되며 움직이기 위해 필요한 에너지의 많은 양이 마찰로 인해 소비되고 있다. Jost(1966) 보고서에 의하면 교통 및 산업 부품의 마모 및 마찰에 의한 손실은 GNP의 6%까지 이른다고 한다[3]. 현재 전 세계 에너지 자원의 약 1/3이 마찰에 의한 손실로 알려져 있으며 연소 엔진의 경우를 보면 기계적 에너지로 15% 가까이 소비되고 이 기계적 에너지의 80% 정도가 마찰에 의한 손실로 알려졌다[4,5]. 메커니컬 씰, 베어링, 기어 등과 같은 회전하거나 미끄러지는 부품은 농업, 석유, 화학, 광산, 자동차 및 항공산업 등에 사용되는 정밀 기계류에서 핵심작용을 하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 기계용 부품을 저 마찰 소재로 바꾸어 주게 되면 마찰에 의한 에너지 손실을 줄일 수 있어 막대한 경제적 이득이 기대된다. 또한 현재 사용되는 기계용 부품은 항공우주, 인공장기, 반도체 분야 등으로의 영역확대로 극한환경에서 오랜 수명을 필요로 한다. 이와 같은 경제적, 산업적인 이유에서 극한 환경 하에서 저 마찰 특성을 나타내는 소재 개발의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 본고에서는 에너지 효율성 및 산업 고도화에 필수적인 정밀기계용 저 마찰 소재의 최근 개발 현황을 소개하고자 한다.

2. 최근 기술개발과 연구동향

2.1. 세라믹 벌크 저 마찰 소재

전통적인 스틸 베어링에 비해 질화규소와 같은 세라믹 베어링은 여러가지 장점을 갖고 있기 때문에 그 응용 범위가 확대되고 있다. 우주선에서 이용되는 베어링은 10^{-6} Torr 이하의 고진공과 230℃ 에서 -150℃의 온도범위와 온도차에서 10에서 15년 까지 저 마찰 및 피로특성을 유지하며 작동하여야한다[2]. 세라믹 베어링은 구름접촉 피로 수명이 길고, 상대적으로 가벼우며 가스 터빈 엔진과 같은 고속응용 시 동적 하중을 덜 받기 때문에 유리하다. 또한 내 부식 및 내 화학 특성이 있으며 고온, 고속 및 초고진공에서의 작동이 가능하다[6]. 우주항공 부품이나 단열 엔진의 부품에서는 기존 steel 베어링은 약 300℃ 이상의 온도에서는 경도를 유지 할 수 없기 때문에 사용이 불가능하다. 또한 기존의 고온용 윤활유조차도 사용이 어렵게 된다. 따라서 이와 같은 극한 환경 하에서 견딜 수 있는 세라믹이 베어링 후보 소재로 등장하게 되었다. 초기의 개발에서는 설계 등의 문제로 어려움이 있었으나 수 십년의 연구개발을 통해 고온에서 견딜 수 있는 질화규소 세라믹 베어링이 상용화 되었다. 액체산소, 액체수소와 같은 액체연료 로켓엔진의 베어링은 극저온에서 고속 및 고 하중을 받으며 작동하여야 한다. 스틸 베어링에 비해 세라믹 베어링은 극저온 환경 하에서 매우 낮은 마찰계수를 나타내는 것으로 알려졌다. 액체질소에서 스틸 베어링에 의해 작동된 전력이 6.3kW에서 6.7kW가 필요한데 비해 세라믹하이브리드 베어링에 의해 작동 시 저 마찰 특성으로 인해 5.42kW에서 5.8kW로 줄어든다는 결과가 보고되었다[7]. 세라믹 공정 개발과 설계기술의 진

보로 세라믹 베어링은 진공 펌프, 컴프레셔, 고속 전기모터, 치과용 드릴, 해양기계, 고기능 자전거 등으로 응용이 확대되고 있다. 현재 3mm 이상 크기의 질화규소 볼이 매년 4천만에서 오천만개 생산되고 있으며 더 작은 크기의 볼이 컴퓨터 하드디스크 드라이브 베어링용으로 연간 수천만 개가 생산되고 있다[8].

저 마찰 세라믹소재의 또 다른 주요 응용 부품은 메커니컬 씰이다. 정제나 화학 산업에 사용되는 공정 펌프의 약 90%가 씰 부품을 사용한다. 이와 같은 메커니컬 씰은 회전하며 밀봉특성을 유지해야 한다. 접촉하며 회전할 때 마찰력이 생기고 이와 같은 마찰력은 씰의 수명을 결정하고 에너지를 소비시킨다. 따라서 현재 씰 제조회사에서는 씰의 수명을 늘리고 저에너지로 작동할 수 있는 씰 재료 개발에 노력을 하고 있다. 메커니컬 씰의 회전부위의 소재로 우수한 화학적 안정성, 내마모성, 저 마찰 특성을 나타내는 세라믹 재료가 흔히 사용되고 있다. 메커니컬 씰은 어떤 작동 조건에서 작동하느냐에 따라 서로 접촉하는 소재가 결정될 수 있다. 메커니컬 씰 조합에 따른 분류 및 특징을 Table 1에 나타냈다.

탄화규소 와 탄소와 같은 hard-mild 의 조합이 일반적인 씰 소재로 많이 사용된다. 그러나 이와 같은 조합의 마찰시 탄소재료는 기계적 변형과 연삭마모 저항성이 낮아 쉽게 파손되는 문제가 있다. 그러므로 높은 작동압력과 같은 상황에서는 hard-hard 조합이 사용되어야 한다. 극한환경에서의 산업적 응용이 늘어남에 따라 hard-hard 조합의 씰의 사용은 늘어나는 추세이다. 이러한 경우에 윤활이 되지 않는 상황에서 씰이 파손되는 문제가 있다. 그러므로 씰의 수명을 늘리기 위해서 씰 소재 와 표면처리 기술개발이 필요하게 된다. Fig. 1은 hard-hard 씰 소재의 조합에 따른 마찰계수 변화를 보여준다. 사용되는 세라믹 종류에 따라 마찰계수의 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다[9]. 상대적으로 적은 하중에서는 흑연이 포함된 반응소결 탄화규소의 조합에서 가장 낮은 마찰계수를 보인다.

Table 1. Mechanical seal face material combinations

Group	Materials	Advantages
Hard-mild	SiC-SiC and C	Low friction Dry sliding
Hard-hard	SiC-Si Si-C/Si/C SiC-Si/SiC SiC-Si/Sic-C-Si	High pressure Acid solution Anti abrasive wear

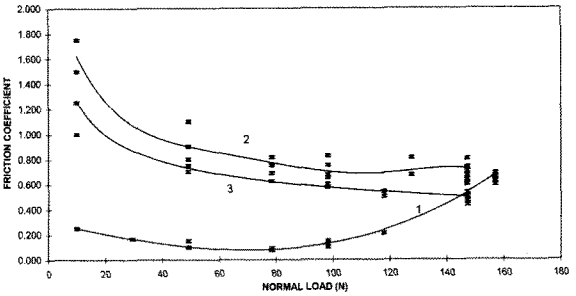

Fig. 1. The relationship between the friction coefficient and the applied mormal load for (1) reaction bonded SiC in contact with reaction bonded SiC-graphite, (2) reaction bonded SIC in contact with alpha sintered SiC and (3) reaction bonded SiC in contact with tungsten carbide + 6% Co[9].

위에서 설명한 세라믹 볼 베어링과 씰 부품외의 자동차 엔진부품에는 저 마찰 세라믹 벌크 소재의 우수한 특성에도 불구하고 경제적인 이유 등으로 많이 사용되지 못하고 있다.

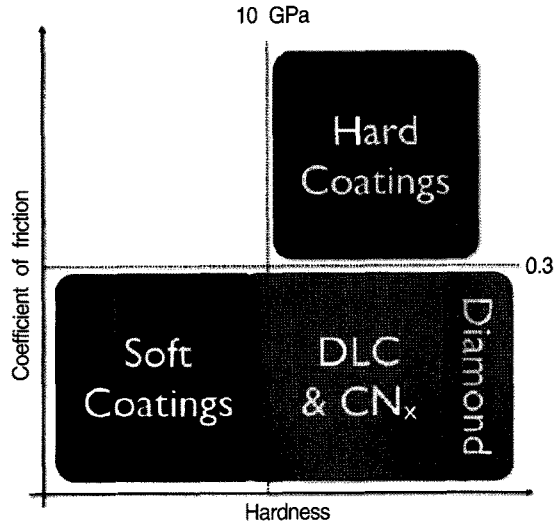

Fig. 2. Classification of tribological coatings with respect to hardness and typical coefficient of friction, highlighting the unusual case of carbon-based coatings[10].

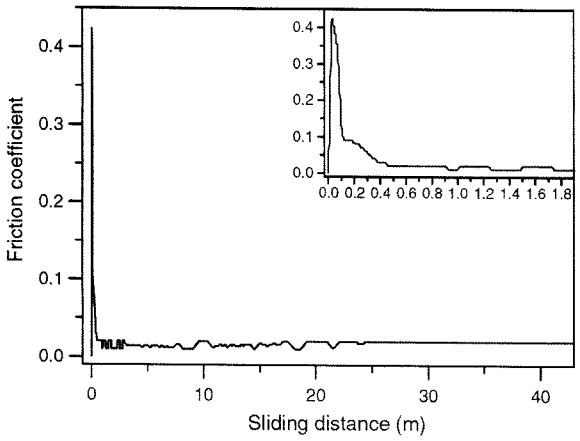

Fig. 3. Representative evolution of the friction curve, for unlubricated self-mated NCD films in ambient atmosphere, as a function of the sliding distance on a sample tested for x=43 m under W=30 N[11].

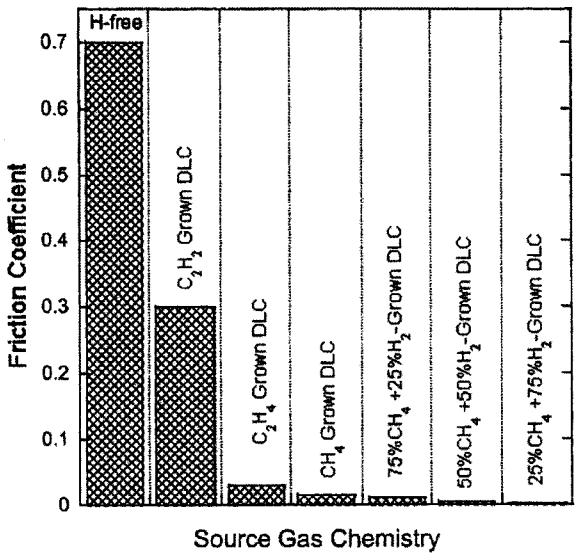

Fig. 4. Effect of carbon source on friction coefficient of DLC films in dry nitrogen[12].

2.2. 저 마찰 다결정 다이아몬드 및 DLC 코팅

Fig 2와 같이 세라믹 벌크 혹은 코팅 재료는 고경도 특성으로 고 내마모 특성을 갖지만 연질 코팅이나 다이아몬드와 DLC(Diamond Like Carbon)코팅에 비해 높은 마찰계수를 나타낸다[10]. 세라믹 코팅이 유리한 고온이나 고속에서의 응용 분야를 제외하고는 높은 내 마모 특성과 저 마찰 특성을 동시에 보이는 다이아몬드나 DLC코팅은 정밀기계용 저 마찰 소재의 잠재적 후보로 주목을 받아왔다. 그러나 다이아몬드 코팅은 모재와의 접착력이 낮고 거친 표면으로 인한 상대 부품과의 높은 마찰력 때문에 메커니컬 씰과 같은 저 마찰 부품에는 사용되지 못하였다. 그러나 최근에 표면이 매끄러운 나노결정 다이아몬드 막 제조 방법이 개발되어 내마모와 저 마찰 특성을 요구하는 부품에 응용이 고려되고 있다. Abreu 등이 보고한 질화규소 위에 코팅된 나노결정 다이아몬드 막끼리의 미끄럼마찰 결과를 Fig. 3에 나타냈다[11]. 마찰계수는 초기에는 0.4 정도를 나타내다가 곧 0.13 정도의 낮은 값

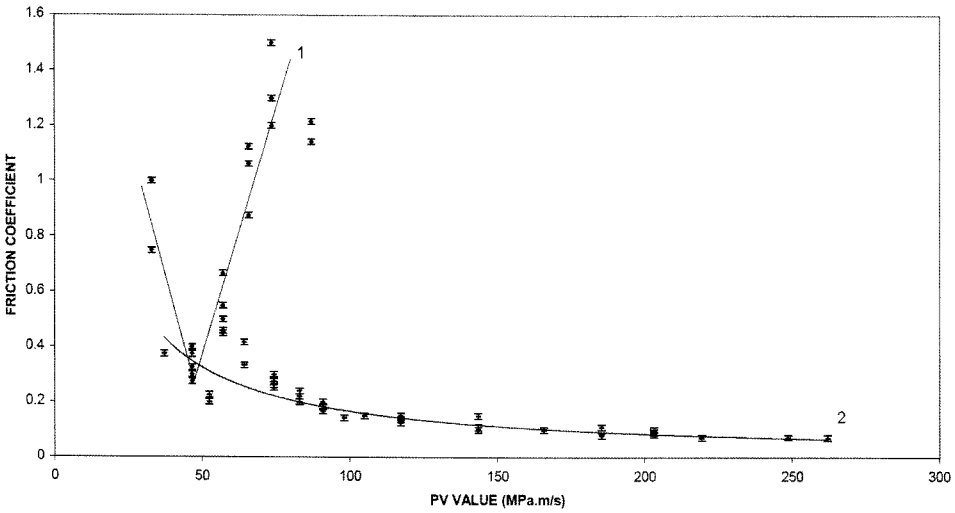

Fig. 5. The relationship between the friction coefficient and PV value for (1) aplha sintered SiC in contact with reaction bonded SiC + DLC film and (2) alpha sintered SiC in contact with reaction bonded SiC + PCD film[9].

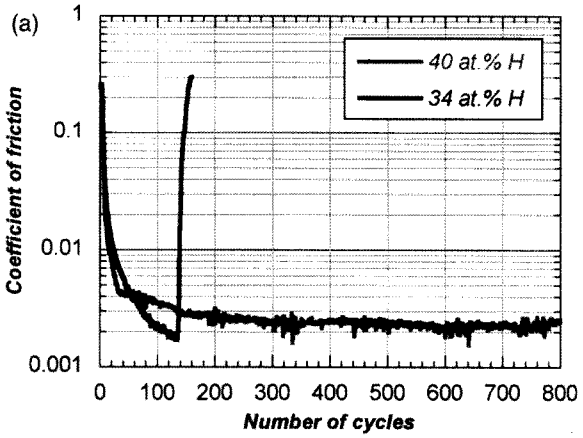

Fig. 6. Coefficient of friction versus number of sliding cycles for two a-C:H films (40 and 34 at.% H) sliding in ultra-high vacuum against steel pin[10].

을 유지한다. 초기의 높은 마찰계수는 나노결정 다이아몬드 돌기의 접촉에 의한 것으로 보인다. 마찰거리가 증가함에 따라 표면이 연마되고 그에 따라 마찰계수의 변화 폭도 줄어드는 것을 알 수 있다.

미국의 알곤 연구소는 에너지성의 에너지효율 및 재생에너지 프로그램으로 나노결정 다이아몬드 막을 메커니컬 씰에 응용하는 연구를 다이아몬드 막 제조회사인 Advanced Diamond Technology 사와 메커니컬 씰 제조회사인 Jone Crane 사와 공동연구를 수행하였다. 2" 직경의 나노다이아몬드 결정이 코팅된 씰의 벤치 테스트 결과는 마모가 거의 일어나지 않았고 마찰계수는 6배 감소하였음을 보였다. 연구팀은 펌프 씰에 적용 시에 약 75%의 마찰 손실을 막을 수 있을 것이라 주장하고 있다[12].

DLC 코팅은 저 마찰 내 마모 특성을 요구하는 메컬니컬 씰, 엔진 부품의 응용에 적합한 것으로 알려졌다. DLC는 탄소가 sp^2와 sp^3 결합으로 비결정질 형태로 혼재하고 있어 높은 경도와 낮은 마찰계수를 나타낸다[13]. Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 수소함량이 많을수록 마찰계수가 낮아지는 경향을 보인다. DLC막은 미끄럼 마찰시 습도, 온도와 같은 환경에도 영향을 많이 받기 때문에 사용되는 부품의 응력상태, 작동온도에 따른 마찰 특성이 평가되어야 한다[14]. Fig. 5는 메커니컬 씰 적용을 위한 탄화규소 위에 코팅된 DLC와 다이아몬드 막의 마찰계수 변화를 보여준다. Jones의 실험 결과는 작동 압력과 속도의 변화에 따라 DLC 막이 민감하게 변화하는 것을 보여준다[15]. DLC막의 마찰계수는 초기 조건에서 최저값을 보이다가 이후 급격하게 증가한다. 반면에 나노결정의 다이아몬드 막은 비교적 높은 압력과 속도에서도 낮은 마찰계수를 보인다. 또한 DLC박막은 500℃ 이상의 온도에서 쉽게 열화(thermal degradation)되는 문제와 습기에 취약한 문제를 갖고 있다[16]. DLC박막은 제조 시 발생하는 10 GPa에 달하는 높은 잔류응력의 문제 때문에 박막 두께를 증가시키기 어려운 문제를 갖고 있다. 따라서 DLC박막을 세라믹 재료에 코팅하여 내마모성 부품에 응용하기 위해서는 이러한 기술적인 문제가 해결되어야 한다[15,17].

DLC박막은 또한 진공분위기에서도 낮은 마찰계수를 유지할 수 있기 때문에 인공위성의 회전부품에 응용이 가능할 것으로 보고 개발 연구가 진행 중에 있다. 특히 진공분위기에서는 DLC에 포함되어 있는 수소가 낮은 마찰계수에 기여하는 것으로 알려졌다[18]. Fig. 6은 초고진공 상태에서 상대적으로 적은 수소를 포함하는 DLC의 마찰계수가 반복접촉 후에 급격히 증가하는 결과를 보여주고 있다[10]. 현재까지 보고 된 연구결과를 참고하면 DLC코팅을 인공위성이나 진공에 관련된 부품에 적용하면 우수한 성능을 보일 것으로 기대한다. 그러나 연구실의 실험결과가 실제부품의 성능과 일치한다고 볼 수가 없다. 따라서 수십 년 동안 검증하여 진공분위기에 적합

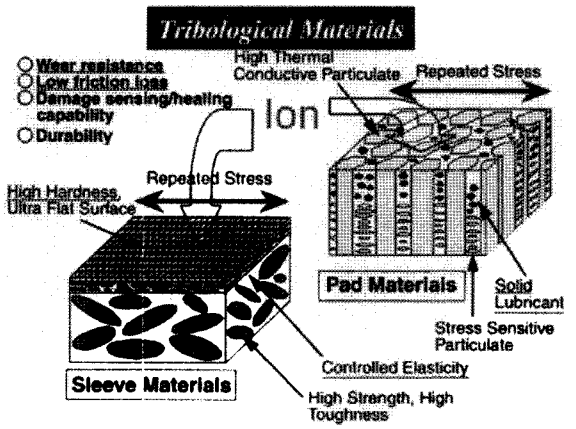

Fig. 7. Expectation of improvement of the wear resistance of Si_3N_4 ceramics for ion implantation[19].

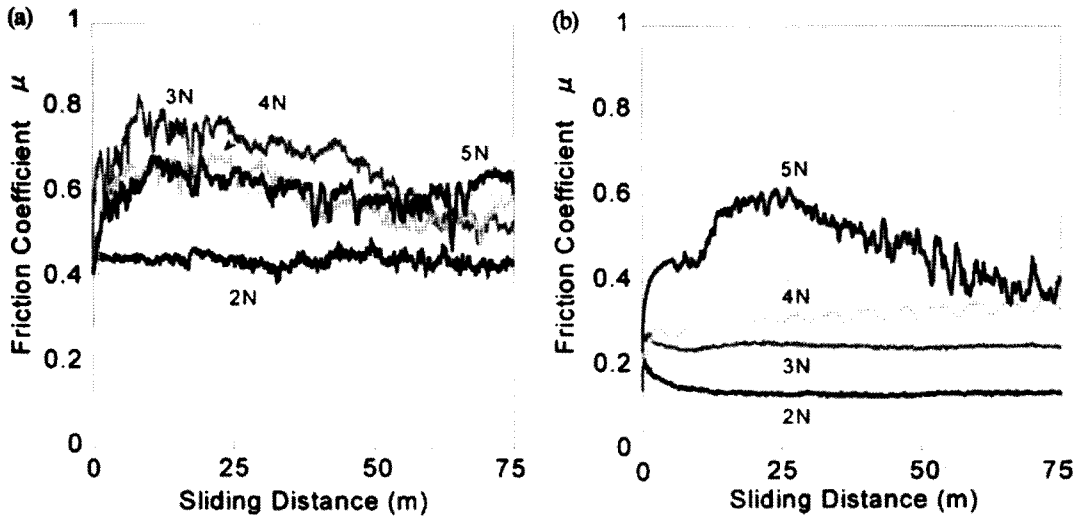

Figure 8. Friction coefficient of Si_3N_4 at a load of 2, 3, 4, 5 N: (a) unimplanted, (b) Si^+-implanted[19].

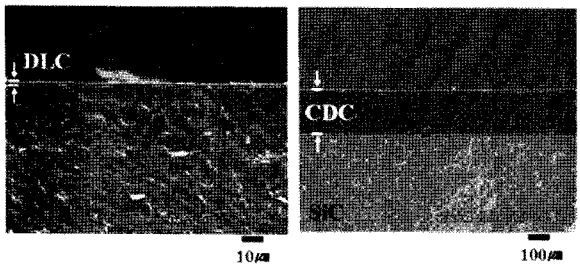

Fig. 9. Cross-sectional images of the fracture surface of DLC and modified carbon coatings[20].

하다고 알려진 MoS_2를 대체하기 위해서는 진공용 DLC 코팅 개발연구가 더 필요하다.

2.3. 저 마찰 특성을 위한 세라믹 표면개질 연구

세라믹 베어링은 스틸 베어링에 비해 우수한 특성을 나타내는데도 불구하고 세라믹 재료의 취성 특성 때문에 폭넓게 응용되지 못하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 시도되고 있는 세라믹 표면 개질 연구에 대해 소개하고자 한다.

세라믹 소재의 마모 마찰 특성은 표면 성질에 예민하게 반응하는 특성을 가지고 있다. Fig. 7의 도식에서 보여주는 것과 같이 소재 표면에 원자를 강제로 주입하여 표면의 구조를 원자 스케일로 제어할 수 있는 이온 주입법에 의해 세라믹 표면을 개질하여 저 마찰 특성을 향상시키려는 시도가 있었다. 질소와 탄소와 같은 이온을 질화규소와 같은 세라믹 표면에 주입시키면 저 마찰 특성을 보이게 된다는 보고가 있다. Fig. 8은 실리콘 이온을 주입시킨 후 마찰 계수의 변화를 보여준다. 처리 전에 비해 특별히 마찰계수가 현저하게 감소하는 것을 알 수가 있다. 이와 같은 마찰 감소현상은 이온 주입 층의 비정질화와 표면경도에 기인하는 것으로 알려졌다[9].

저 마찰을 위한 또 다른 시도 중의 하나는 탄화규소와 같은 탄화 세라믹을 염소가스와 반응시켜 세라믹 표면을 탄소 층으로 만들어 주는 것이다. 이와 같은 공정에 의해서 만들어진 탄소 층은 저 마찰 특성을 보일뿐만 아니라 Fig. 9는 DLC 박막과 CDC막의 단면사진이다. CDC막은 DLC와 달리 두꺼운 탄소 층 형성이 가능하고 계면에서의 막 분리 등의 문제가 없어서 정밀기계용 저 마찰 부품의 응용이 기대되고 있다[20]. Fig. 10은 반응소결 탄화규소 볼을 상대재로 하여 가해준 하중에 따른 마찰계수 변화를 보여주고 있다. 먼저 동질의 두 탄화규소를 마모 실험한 경우는 0.5 - 0.8 사이로, 다소 높은 값을 보였다. 한편, DLC박막의 마찰계수는 코팅하지 않은 시편에 비해 비교적 낮은 값을 보이지만 시간이 지남에 따라 점차 높은 마찰계수 값을 나타낸다. 이는 앞에서 설명한 바와 같

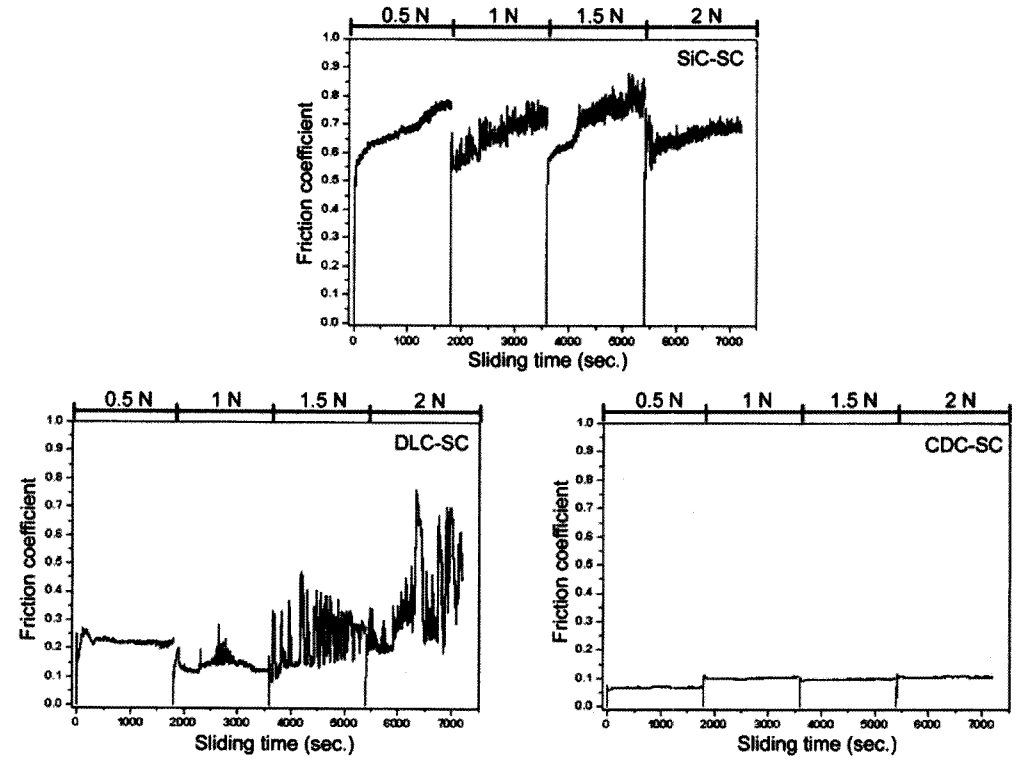

Figure 10. Variation of frictional coefficient as a function of sliding time and applied load for SiC, DLC, and CDC discs with a SiC ball [20].

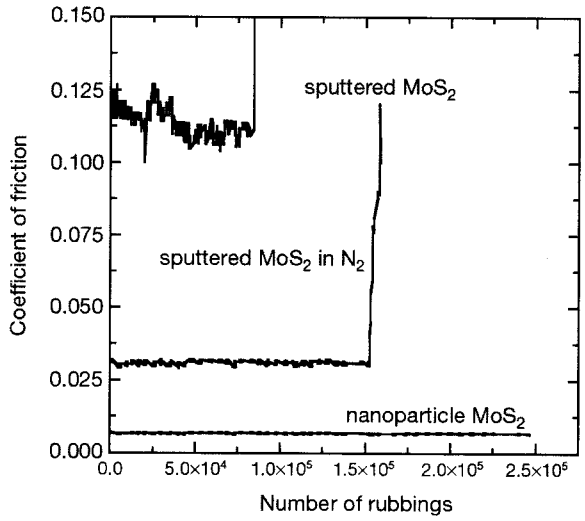

Fig. 11. Wear tests on MoS_2 films in different atmospheres. The coefficient of friction as a functiion of time for: sputtered MoS_2 films in 45% relative humidity in ambient conditions (top curve); sputtered MoS_2 films in dry nitrogen; and nanoparticle MoS_2 films in 45% humidity formed by the procedure described in this work. Note that each curve is an average of ten different measurements on at least three different samples. The friction coefficient was obtained by a unidirectional 'ball on flat disk' (pure sliding) wear test[22].

이, 박막 내부의 높은 잔류응력과 두께의 영향으로 마모 실험 시 압력에 의해 응력이 집중되고 극대화되었기 때문이다. 그러나 결정질 탄소로 개질된 CDC (Carbide Derived Carbon)박막의 경우는 DLC박막과 비교하여 현저한 차이를 보이는 0.1 이하의 저 마찰 거동을 보였다[20].

최근에는 여러 연구자들에 의해 나노 입자를 이용한 저 마찰 코팅에 대한 연구가 이루어지고 있다. 최근에 유럽의 여러 기관이 공동으로 나노기술을 이용하여 새로운 저 마찰코팅 방법을 산업체에 공급하기 위한 공동 프로젝트를 수행한 바 있다[21].우주항공, 자동차, 에너지 산업 등에서 크게 기여할 목적으로 추진된 과제를 통해 황과 몰리브덴이 곡면을 이루는 50nm 두께의 초저마찰 MoS_2 박막을 개발하였다고 보고하였다. 기존의 스퍼터링에 의한 MoS_2 박막과 비교된 마찰 계수 변화를 Fig. 11에 나타냈다. 연구 결과는 기존의 스퍼터링에 의한 MoS_2막 보다 훨씬 작은 값을 오랜 접촉에도 유지하는 것을 보여주고 있다[22].

3. 향후 전망 및 결론

세라믹 저 마찰 소재는 세라믹 재료가 갖는 취성으로 인해 고 응력, 무 윤활 상태에서는 장시간 저 마찰 특성을 유지하기가 힘들다. 또한 높은 경도 특성으로 무른 상대재의 마모를 촉진하게 하여 수명을 짧게 할 수 있다. 따라서 세라믹 표면에 저 마찰 소재로 코팅할 필요가 있다. DLC와 다이아몬드막 제조 기술이 개발되어 이들의 독특한 특성인, 고 경도, 고 내마모, 저 마찰 특성 때문에 공업용 정밀 부품의 적용에 많은 기대를 갖게 되었다. 그 간의 많은 연구로 성장 메카니즘, 물리적 화학적 상태, 트라이볼로지 특성에 대한 많은 이해가 이루어 졌다. 그 결과 여러 정밀부품에 응용될 수 있는 우수한 코팅들이 개발되었고 MEMS부품, 정밀공구 부품, 엔진 부품 등에 적용되고 있다. 그러나 잔류응력에 의한 막 분리, 표면조도, 고온 및 고 응력에서의 취약, 두께의 한계 등의 문제가 해결되어야 한다. 또한 대 면적 코팅 방법과 실험실에서 검증된 특성을 대량 생산과정에서도 재현하는 문제와 경제적인 공정방법 등이 개발되어야하는 과제를 갖고 있다.

탄소계 물질은 다른 물질과 달리 저 마찰 특성과 고경도 특성을 함께 나타내며 결합조건에 따라 그 특성을 변화시킬 수 있다. 따라서 기존에 개발된 탄소계 물질의 공업용 부품에 대한 적용연구와 더불어 새로운 제조방법에 대한 연구가 이루어지면 정밀부품의 성능향상으로 유지보수 및 에너지 절감 등의 산업적 효과가 기대된다. 그러나 국내에서는 탄소계 막을 제조하는 기업이 영세하여 기술개발 인력이 부족하고 인구지원이 미약한 것이 문제이다. 유럽과 미국에서는 GNP의 6%에 달하는 마찰 손실을 줄이기 위한 노력의 일환으로 국가적인 프로젝트로 추진하고 있다. 그러나 저 마찰 소재 개발에 의한 노력이 국내에서는 상대적으로 부족하다. 따라서 저 마찰 소재 개발에 대한 원천적 개발에 대한 관심과 국가적 지원이 시급하다.

감사의 글

본 기술 보고서는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 임대순, "요업재료의 마모 특성," *요업재료의 과학과 기술*, **4** [1-2] 23-8 (1989).
2. L. Wang, R. W. Snidle, L and Gu, "Rolling Contact Silicon Nitride Bearing Technology: a Review of Recent Research," *Wear*, **246** 159-73 (2000).
3. Ernest Rabinowicz, "The least wear," *Wear*, **100** 533-541 (1984) .
4. D. E. Richardson, "Review of power cylinder friction for diesel engines," *Transactions of the ASME*, **122** 506-19 (2000).
5. B.Bhushan, "Tribology and mechanics of magnetic storage devices," *Springer-Verlag New York Inc.*, 3-4 (1990).
6. T.S.R.Ch. Murthy, Bikramjit Basu, "Tribological properties of TiB2 and TiB2-MoSi2 ceramic composites," *Journal of the European Ceramic Society*, **26** 1293-300 (2006).
7. L. Wang, R.W. Snidle, L.Gu, "Rolling Contact Silicon Nitride Bearing Technology: a Review of Recent Research," *Wear*, **246** 159-173 (2000).
8. Klaas B. Klaassen, "Charge Generation and Bleed-off in Spindlee Motors with Ceramic Ball Bearings," *IEEE Transactions on Magnetics*, **39**-5 2435-37 (2003).
9. G.A. Jones, "On the Tribological Behaviour of Mechanical Seal Face Materials in Dry Line Contact Part II. Bulk Ceramics, Diamond and Diamond-like Carbon Films," *Wear*, **256** 433-55 (2004).
10. J. Fontaine, "Towards the use of Diamond-like Carbon Solid Lubricant Coatings in Vacuum and Space Environments," *Proc. IMechE* **222** *Part J: J. Engineering Tribology*, 1015-29 (2008).
11. C.S. Abreu, M.S. Amaral, F.J. Oliveira, "Tribological Testing of Self-mated Nanocrystalline Diamond Coatings on Si_3N_4 Ceramics," *Surface and coatings technology*, **200** 6235-39 (2006).
12. A. Erdemir, "Friction and Wear of Diamondd and Diamond-like Carbon Films," *Proc Instn Mech Engrs* **216** *Part J: J Engineering Tribology*, 387-400 (2002).

13. Jill Jackson, "Advanced Diamond Technologies Launches Revolutionary Family of Diamond Pump Seals," *Advanced Diamond Technologies, Inc.*, calyx consulting 312.231.9870.
14. A. Grill and V. Patel, "Characterization of Diamond Like Carbon by Infrared Spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **60**-[17] 2089-2091 (1992).
15. A. Grill, "Tribology of Diamond-like Carbon and Related Materials: An Updated Review," *Surface and Coatings Technology*, **94**-[95] 507-513 (1997).
16. A. Erdemir, "The role of Hydrogen in Tribological Properties of Diamond-like Carbon Films," *Surface and Coatings Technology*, **146-147** 292-97 (2001).
17. K. Jia, Y.Q. Li, T.E. Fischer, and B. Gallois, "Tribology of Diamond-like Carbon Sliding Against Itself, Silicon Nitride, and Steel," *J. Meter. Res.*, **10**[6] 1403-10 (1995).
18. Hongxuan Li, Tao Xu, Chengbing Wang and Huiwen Liu, "Effect of Relative Humidity on the Tribological Properties of Hydrogenated Diamond-like Carbon Films in a Nitrogen Environment," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38** 62-69 (2005).
19. Naoki Nakamura, Kiyoshi Hirao, and Yukihiko Yamauchi, "Tribological Properties of Silicon Nitride Ceramics Modified by Ion Implantation," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **24** 219-24 (2004).
20. Hyun-Ju CHoi, Heung-Taek Bae and Dae-Soon Lim, "Tribological properties of carbon layers produced by high temperature chlorination comparison with DLC coating," *J. Kor. Ceram Soc.* **44**[7] 375-79 (2007).
21. Gordon A. jones, Derek Arnell and Peter Kelly, "On the potential of CVD Diamond Films as Mechanical Seal Face Materials," *Tribology Transactions*, **51** 33-43 (2008).
22. Manish Chhowalla and Gehan J.J. Amaratunga, "Thin Films of Flullerene-like MoS_2 Nanoparticles with Ultra-low Friction and Wear," *Letters to Nature*, **407** 164-67 (2000).

◉◉ 임대순

◉ 1978년 고려대학교 재료공학 학사
◉ 1979년-1981년 고려대학교 재료공학 석사
◉ 1986년 미국 일리노이대(시카고) 공학 박사
◉ 1986년-1988년 미국 표준기술원 초청연구원
◉ 1988년-1981년 한국표준연구원 책임연구원
◉ 1991년-현재 고려대학교 교수
◉ 2004년-현재 고려대학교 반도체기술연구소장