

## 오일리스 부시용 고체윤활제 개발

공호성<sup>1,\*</sup> · 한흥구<sup>1</sup> · 김진욱<sup>2</sup> · 김경석<sup>2</sup> · 박종식<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원 책임연구원/연구원, <sup>2</sup>(주)대금지오웰 본부장/선임연구원, <sup>3</sup>(주) J.S. Chem 대표이사

### Development of Solid Lubricants for Oil-less Bush

Hosung Kong<sup>1,\*</sup>, Hung-Gu Han<sup>1</sup>, Jin Uk Kim<sup>2</sup>, Kyoung Seok Kim<sup>2</sup> and Jong Sik Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Principal Researcher/Researcher, Korea Institute of Science and Technology

<sup>2</sup>General Director/Senior Researcher, Daekeum Geowell Co. Ltd.

<sup>3</sup>CEO, J.S. Chem Co.

(Received January 25, 2019; Revised March 12, 2019; Accepted March 20, 2019)

**Abstract** – This work aims to develop a dry lubricant for oilless bush, especially a solid lubricant, thereby creating a coating method with improved properties of anti-friction and load-carrying capacity without oil lubrication. In this work, spherical-shaped powders of thermosetting resin such as polyimide (PI) are mixed with a binder matrix obtained by mixing a fluorocarbon compound resin such as Polytetrafluoroethylene (PTFE) or Ethylene tetra fluoro ethylene (ETFE) with itself or with a non-fluorocarbon thermoplastic resin such as Polyether ether ketone (PEEK). And these dry lubricant mixtures are thickly coated (200-300 μm in the thickness) on the inner surface of the bush by using a wet-typed air-spray deposition method. It was found that the load-carrying capacity of the solid lubricant for excavator bush (60 mm in diameter) that operates under a high load condition (at 40 MPa) is greatly improved owing to the spherical-shaped powders of thermosetting resin. In addition, the coefficient of friction at the sliding surface is also reduced less than 0.1. Thick coating also lowers the contact stress at the edge of a bush that results in better tribological performances. The result suggests that the lubrication performance and durability life of the bush can be remarkably improved even without lubrication (oil or grease).

**Keywords** – oil-less bush(오일리스 부시), friction(마찰), wear life(내구수명), PTFE(불화탄소수지), solid lubrication(고체윤활)

## 1. 서 론

### 1-1. 연구 동기

부시(Bush)는 고하중, 저속 및 충격하중 등의 접촉조건 및 왕복 또는 회전구동이 반복되는 연결구조 부품에 사용되는 중공형 내마모성 기계요소부품에 적용하는 평면베어링(Plain Bearing) 형태이다. 상기 부품은 특수한

접촉 조건에 의하여 상대재인 핀(Pin) 부품 사이에서 일반적인 유체윤활 방법의 적용이 적절하지 않거나 불가능하여 제품 내부 접촉면에 윤활성 및 내마모성이 우수한 금속/비금속 재료를 사용하거나 자기윤활성 재료를 부분적으로 삽입 또는 코팅하여 사용하는 경계윤활방법이 요구되는 기계요소부품으로서, 상기 요소부품에 적용하는 윤활방법에 따라서 오일리스 베어링, DU 베어링 및 DX 베어링 등으로 세부적으로 분류되기도 한다. 부시는 건설기계 등의 중장비뿐만 아니라, 유압기기와 산업기계, 자동차 전장부품, 항공기 등 전반에 걸쳐 회전과 하중이 동시에 작용하는 대부분의 기계 요소부품에 사용되고 있다.

현재 국내외 중장비 부시의 경우, 저마찰 성능 및 적절한 내구수명을 위하여 일반적으로 부시 경계면에 그리

\*Corresponding author: [hkong@kist.re.kr](mailto:hkong@kist.re.kr)

Tel: +82-2-958-5655, Fax: +82-2-958-5659

<http://orcid.org/0000-0001-6396-6994>

이 논문은 KTS 2018년도 추계 학술대회(2018.10.31-11.2, 평창 알펜시아리조트) 발표논문임.

© 2019, Korean Tribology Society

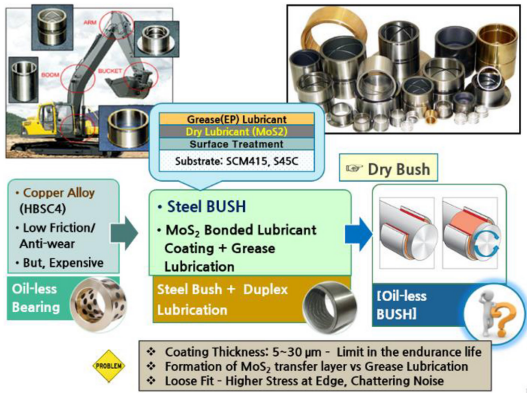


Fig. 1. Bush lubrication trend for excavators.

스 윤활을 하는 DX 베어링을 보편적으로 사용하고 있으나, 주기적인 그리스 윤활제의 재급유에 따르는 제반 문제점을 해소함과 동시에 베어링 시스템을 보다 간소화하기 위하여 무윤활형의 건식(dry) 부시 개발 및 적용이 새롭게 요구될 것으로 전망되고 있다(Fig. 1 참조).

따라서 본 연구에서는 상기와 같은 미래지향적 국내의 요구(needs)에 효과적 및 선제적으로 대응하기 위하여, 무윤활용 저마찰 윤활제를 개발하고자 하며, 이를 중장비 부시 표면에 적용하여 무급유용 중장비용 부시 제품의 상용화 개발에 대비하고자 하였다.

1-2. 부시 내구수명 결정요인

건설중장비 굴삭기 등과 같은 산업용 차량은 다수의 축 회전부를 가지고 있으며, 이러한 축 회전부에는 통상적으로 마찰저항을 저감시키는 상기 Fig. 1에서 도시한 바와 같은 부시형의 원통형 베어링이 사용된다.

하중을 받으며 상대운동을 하는 기계요소 접촉면의 윤활을 위하여 종래에 사용하고 있는 오일이나 그리스 윤활제는 기본적으로 두 접촉면 사이에서 발생하는 썸기 및 스퀴즈 작용 등으로 인하여 유체역학적으로 형성되는 윤활막 형성에 의하여 윤활 작용을 한다. 그러나 부시의 회전속도(N)가 낮은 경우와 같이, 상대 접촉면에서의 미끄럼 속도가 작은 경우에는 유체역학적으로 형성되는 윤활막의 두께가 지지 하중을 지탱할 정도로 충분하지 못해서, 두 접촉면간에 금속간 직접 접촉이 발생할 수 있으며, 상기 결과로서 높은 마찰력이 발생하거나 접촉면의 표면이 마모되어 파손될 가능성이 높아진다.

상기와 같이 접촉면에서의 윤활막 두께가 매우 작은,

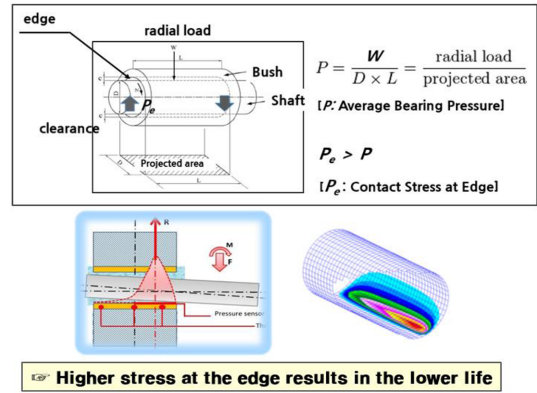


Fig. 2. High contact stress at a Bush' edge.

즉 이른바 경계윤활 영역에서 부시의 회전속도가 낮은 경우의 효과적인 윤활을 위하여, 종래에는 오일 또는 그리스 윤활제를 사용하거나 부시 접촉면 표면에 하중지지 능력이 우수한 고체윤활제 피막과 병행하여 사용하는 방법이 대표적으로 이용된다. 그러나 이와 같이 오일 또는 그리스 윤활제와 병행하여 부시 접촉면 표면에 고체 윤활 피막을 코팅하여 윤활을 행하는 경우, 오일이나 그리스 윤활제가 두 접촉면 사이의 직접 접촉을 가로막고 있어서 고체 윤활제 입자들이 상대 접촉면에 요철 부위로 물질 전이되는 길들이기 효과를 기대하기 쉽지 않은 문제점이 있다. 대한민국 특허 제10-1837116호[1]에서는 상기와 같은 문제를 해결하기 위하여, 에폭 시수지계 결합제를 실리콘화합물 0 내지 30% 및 플루오로카본계 화합물 0 내지 25%로 단일 또는 복합 변성시킨 수지 중합체 조성물을 이용함으로써 내유성 및 친유성이 향상된 코팅 두께가 대략적으로 10 내지 30 μm 내외의 윤활제가 코팅된 부시용 피막 고체 윤활제를 기술하고 있다.

그러나 고체윤활제가 수십 μm 정도의 피막으로 코팅된 경우에는 코팅층이 미끄럼 접촉 시간이 경과함에 따라 서서히 닳아지게 되어 코팅 피막의 수명이 짧고, 코팅층이 파손된 이후에 재차 코팅을 행하기가 용이하지 않은 문제점이 있다. 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 대안의 하나로서, 부시 내면에 내마모성이 우수한 엔지니어링 소재의 오일리스 베어링을 기계적인 방법으로 체결하거나 접착제를 이용하여 결합하는 방법을 사용할 수도 있다. 그러나 폴리아미드 (PA) 및 폴리아세탈 (POM)를 비롯한 대부분의 엔지니어링 소재들은 강철 소재와의 미끄럼 접촉 시의 동마찰계수가 대략 0.2~0.3

정도로 높아서 굴삭기 부시의 윤활 목적으로 효과적으로 사용하기에 부적합하다. 또한 부시와 오일리스 베어링 결합이 불완전할 경우에는 오일리스 베어링이 헛도는 것과 같은 또 다른 문제점을 초래할 수 있어서, 가능하다면 고하중 조건에서도 윤활특성이 우수함과 아울러 내마모성이 우수한 고체윤활제를 부시 내면에 직접 코팅하는 것이 기술적 및 경제적인 측면에서 가장 바람직하다.

굴삭기에 사용되는 부시의 경우에, 축의 모서리(edge) 경계면에서의 응력( $P_e$ )이 평균면압( $P$ )보다 상대적으로 크게 걸리며, 상기 요인이 부시 수명에 커다란 영향을 미치는 또 다른 중요한 요인이다. 부시와 축 사이의 틈새(clearance)를 작게 하면 모서리 경계면에서의 응력을 상대적으로 줄일 수 있으나, 부시 내면에 축을 끼우기 쉽지 않고 반대로 틈새를 너무 크게 하면 경계면에 걸리는 응력이 증가하여 부시 수명이 결과적으로 떨어지는 결과가 초래될 수 있다.

따라서 부시의 성능과 수명을 향상시키기 위하여 코팅 두께가 가능한 두꺼우며, 높은 하중 조건에서 미끄럼 마찰 및 내마모성이 우수함과 동시에 부시와 축 사이의 모서리 경계면에 걸리는 응력을 저감할 수 있는 부시용 고체 윤활제 및 코팅기술이 요구되고 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 부시 축의 모서리 경계면에 걸리는 높은 접촉응력을 완화하여 결과적으로 부시의 수명을 증가시키기 위하여, 부시와 축 사이의 틈새를 가능한 작게 하는 것이 요구된다. 일반적으로 중장비 굴삭기용 부시와 축의 조합에는 헐거운 끼워맞춤(loose fit)이 이용된다. 예를 들어, 내경이 60.12 mm인 부시와, 외경(diameter)이 59.95 mm 축의 조합의 경우, 이들 상호간의 틈새는 170  $\mu\text{m}$ 이다. 축의 길이가 충분히 길지 않은 경우에, 상기의 틈새는 축이 부시와 하중을 받으며 미끄럼 접촉 시에 축 방향으로 일정한 각도로 기울어져서 부시 모서리 경계면에서의 접촉응력( $P_e$ )이 평균면압( $P$ )에 비하여 상대적으로 크며, 상기 결과로서 부시 수명을 떨어뜨리는 중요한 요인이 된다. 만약에 상기 부시와 축의 조합을 KS B 0401 (또는 ISO 286-2)[2] 끼워맞춤 조합 기준으로, 종래에 가장 광범위하게 이용하는 H7-e7 또는 H7-f7 등의 헐거운 끼워맞춤에서, 틈새가 극히 적은 정밀한 운동이 요구 시에 적용되는 H7-g6와 중간 끼워맞춤이지만 특히 정밀한 미끄럼 부위에 적용하는 H7-h6 끼워맞춤으로 하면, 축의 기울어지는 각도를 상대적으로 줄여서 모서리 경계면에 걸리는 응력을 완화할 수 있으나, 일반적으로

거의 틈새가 없는 조립작업으로 작업자의 조립이 쉽지 않아서 특별한 공구 지그를 이용해야 함이 요구된다.

그러나 부시 내측 표면에 윤활특성이 매우 우수한 물질이 코팅되어 있다면, 이와 같이 특별한 조립 방법을 이용하지 않는다 하더라도 상기 작업을 보다 용이하게 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

상기 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 자기 윤활성 고체 입자 및 결합제를 포함하는 오일리스 부시용 고체윤활제에 있어서, 상기 결합제가 불화탄소수지를 기본 도료로 하는 윤활제 및 상기 코팅 방법을 개발하고자 하였다.

### 1-3. 불화탄소수지계 코팅제

불화탄소수지 코팅은 C-F 결합물인 불화탄소수지를 도료화하여 피도체의 표면에 도포한 후 일정 온도에서 가열 소성했을 때 형성되는 비활성의 코팅층을 일컬으며, Dupont(Teflon, Tefzel), Daikin(Neoflon, Polyflon), Asai Galss(Aflon, Fluon), Ausimont(Algoflon, Hyflon, Hylar), Achison, Withford) 등 유수의 다국적기업에서 불화탄소수지 코팅제를 제조하고 있다. 불화탄소수지 중에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 대표적인 불화탄소수지로서 테프론(Teflon)으로 흔히 불리는 Poly-tetrafluoro-ethylene(PTFE)은 비점착(non-stick) 기능이 우수하며, 마찰계수가 매우 낮아서 윤활성이 우수하며, 물리·화학적으로 안정적이고 내화학성이 우수함과 아울러 사용온도가 연속적으로 290°C 이상에서도 사용 가능한 우수한 내열성을 지니고 있다[3]. PTFE는 상기와 같은 다양한 장점을 가지고 있음에 불구하고, 재료가 물러서 압축하중을 받으면 쉽게 눌리며, 내하중성(load-carrying capacity)이 떨어져서 미끄럼 접촉 시 마모가 쉽게 발생하는 단점을 동시에 가지고 있다. 따라서 이와 같은 PTFE의 단점을 보완하고 특별한 사용 용도에 적합하도록, 상기 PTFE를 다른 수지로 공중합화한 코팅제가 지속적으로 개발되어 사용되고 있다(Table 1, Ref. 4-8 참조).

또한 내마모성이 그다지 좋지 못한 PTFE계 수지의 단점을 향상시키기 위하여 수지 매트릭스 내에 유리섬유, 금속 파우더나 다른 종류의 열가소성 수지들을 복합하여 기계적 및 물리적 특성을 향상시켜 사용하기에 한다.

상기 PTFE계 수지를 피도체 표면에 코팅하는 방법을 크게 나누면, 분체(powder) 정전도장(electro-static deposition)과 같은 건식방법과 액상(liquid) 형태의 슬러

Table 1. An example of PTFE variants [3]

PTFE	the lowest coefficient of friction and highest temperature resistance. Withstand temperatures of 290°C on a continuous basis and up to 315°C for brief periods, somewhat porous, and thus permeable to water vapor and other gases.	Cure at 400°C
FEP	frequently used as mold release coatings. They melt flow to smooth, non-porous films, and are thus more chemically resistant. FEP coatings have lower heat resistance (200°C), very low coefficient of friction.	370
PFA	high temperature resistance, non-porous, chemical resistant films. Films can be built to 640 microns, quite tough and abrasion resistant	340
ETFE	extremely tough, abrasion resistant films with high tensile strength. ETFE is limited in temperature resistance (150°C)	315
Teflon-S	Self-priming, one coat product. They are formulated with <u>organic binders</u> to improve adhesion without the use of primers, so they typically cure at lower temperatures.	175 - 340

리(slurry)를 스핀(spin), 브러시(brush), 롤러(Roller), 스프레이(spray), 침적(dipping) 등의 방법으로 코팅하는 방법 등이 있다.

플루오로카본계 화합물 수지를 건식 코팅방법인 분체 정전도장 방법으로 피도체 표면에 코팅할 경우에는, 수지 자체가 내화학성 및 방청성이 우수하므로, 피도체 재료를 선정함에 별다른 제약이 없다. 그러나 물에 작은 크기(0.1~100 μm)의 플루오로카본계 화합물 수지 입자가 분산되어 있는 액상 형태의 슬러리를 이용하여 코팅하는 경우에 분산안정제로서 퍼플루오로-옥탄산암모늄염 등과 같은 산성의 화학물질 등을 사용하기 때문에 피도체 표면을 부식시킬 수 있어서, 스테인레스강, 동합금, 니켈합금, 티타늄합금 등과 같이 기본적으로 내식성을 갖는 금속을 반드시 사용해야 하며, 만약에 철강재를 피도체로 사용해야하는 불가피한 경우에는 상기 재료 표면에 인산염 또는 산화막 처리 등과 같은 부식방지용 표면처리를 반드시 한 이후에 윤활 코팅을 행하여야 한다.

## 2. 부시용 코팅윤활제

### 2-1. 코팅 재료

본 연구에서는 Fig. 3에서 도시하고 있는 바와 같이, 플루오로카본계 화합물 수지 또는 플루오로카본계 화합물 수지에 PEEK 수지 등과 같은 비-플루오로카본계 열가소성 수지를 혼합한 결합제 매트릭스에 폴리이미드(PI) 수지와 같은 열경화성 수지 파우더 등을 복합하여 강화하고 이를 부시 내면에 두껍게 코팅함으로써, 높은 하중 조건에서 작동하는 굴삭기 부시용 고체 윤활제의 내하중성을 증진시키고 동시에 미끄럼 접촉 시의 동마찰계수를 저감함으로써, 종래에 굴삭기 부시에서 사용

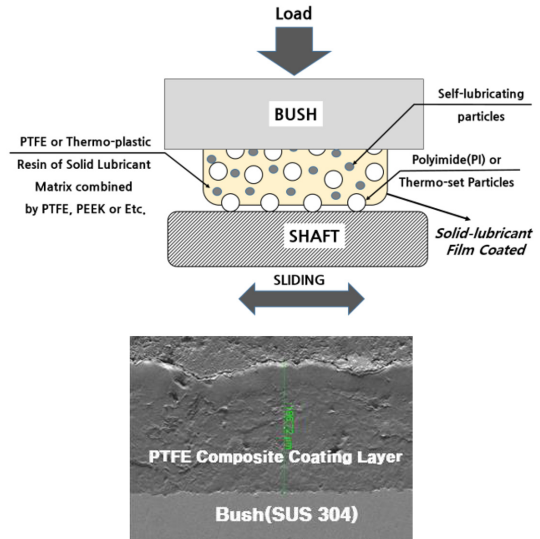


Fig. 3. Developed PTFE composite coating on the Bush.

Table 2. Test specimens and the test results

Test No.	Test Results of Lubricants			
	Main Composition(wt%)	Thickness (μm)	C.O.F (-)	Endurance Life (hour)
1	ETFE(100)	300	0.045	0.5
2	ETFE(70)-PEEK(30)	200	0.050	10
3	PFA(70)-PI(30)	220	0.11	> 20
4	ETFE(50)-PI(50)	50	0.035	47
5	ETFE(70)-PI(30)_1	250	0.054	248
6	ETFE(70)-PI(30)_2	> 300	-	-
7 (FM BUSH)	Modified-EPOXY, MOS2+PTFE(p)+ Grease Lubrication (Moly EP-2)	15	0.155	104

하던 오일이나 그리스 등과 같은 윤활유 급유 없이도 부시의 마찰저항을 저감함과 동시에 높은 내구수명을 보유하도록 코팅윤활제 조성물을 구성하였다[10].

### 2-2. 코팅 윤활제 제조

본 연구에서 개발한 부시용 저마찰 코팅 윤활제는 Table 2에서와 같다. ETFE 수지(FK-014SW) 및 상기 수지 매트릭스에 피크(PEEK, VICTREX 150XF 제품, 평균 크기 25 μm) 및 폴리이미드(PI, Evonik P84 제품, 평균크기 30~40 μm) 수지를 여러 가지 비율의 중량부로 혼합하여 고체윤활제 시료를 제조하였으며, 이를 부시 내면에 평균 50~300 μm 정도 두께로 코팅하고, 360~380°C 이상의 온도의 열처리로 내에서 가열하여 용융시킨 후에 서서히 냉각하여 고체윤활제를 제조하였다. 또한 상기 플루오로카본계 화합물 수지로 조성된



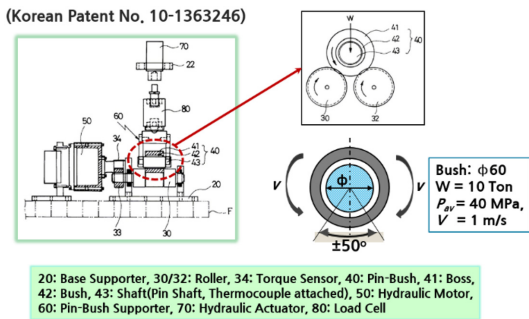


Fig. 4. Wear life test machine used in this work [9].

고체윤활제와 실리콘화합물 및 플루오로카본계의 물질로 복합변성 처리한 피막접착형 고체윤활제를 비교하였다.

### 2.3. 코팅 윤활제 성능평가 시험방법

고체윤활제의 성능평가는 상기 Fig. 4와 같이 제시된 부시 내구수명 시뮬레이션 시험기[9]와 왕복동 마찰마모시험기(TE77, ASTM G 133) 시험방법을 각각 사용하여 수행하였으며, 상기 시험에서 여러 가지 고체윤활제 조성 및 코팅방법 변화에 따른 마찰특성 및 내구수명을 각각 평가하였다. 상기 부시 내구수명 시험에서 축은 좌우  $\pm 50^\circ$  범위에서 1 m/min 속도로 왕복운동을 하고, 반경방향에서의 평균면압은 40 MPa이며, 여러 가지 조건으로 코팅된 고체윤활제 시료의 동마찰계수 및 부시의 내구수명을 측정하였다. 또한 상기 시험에서 부시와 축 재료는 각각 스테인레스강(SUS304)과 크롬몰리브덴 합금강(SCM440)을 사용하였다. 윤활제의 내구수명의 판정은 초기 길들이기 과정을 거쳐 안정화된 미끄럼 마찰계수 값이 대략 2배 이상으로 증가되는 시점까지의 총 시험시간을 기준으로 설정하였다. 또한 상기 시험도중 부시의 마찰로 인하여 온도가 증가하는 것을 억제하기 위하여 부시 접촉면 주위에 냉각수를 순환하여 냉각을 시켰으며, 시험 온도 범위는 섭씨  $45 \pm 5^\circ$  정도로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 내구수명

Table 2의 Test No. 7에서와 같이, 굴삭기용 부시의 윤활방법으로 종래에 사용하고 있는, 실리콘화합물 및 플루오로카본계의 물질로 복합변성 처리한 피막접착형 고체윤활제[1]와 그리스(KIXX, Moly EP-2) 윤활을 병

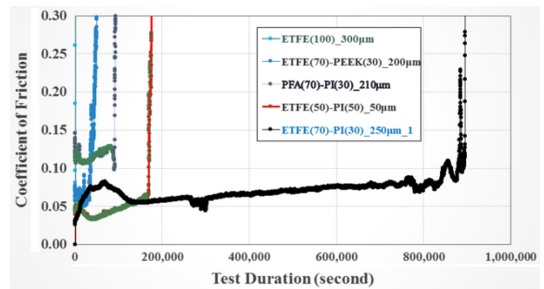


Fig. 5. Wear life of test specimens tested.

행한 윤활 시험에서 동마찰계수는 평균 0.155, 내구수명은 104시간으로 각각 측정되었다.

본 연구에서 행한 Test No. 1(FM Bush 적용)에 의하여 플루오로카본계 공중합체 화합물인 ETFE 수지 100% 중량부인 고체윤활제를 부시 내면에 300  $\mu\text{m}$  정도 두께로 코팅한 시험에서 동마찰계수는 0.045, 내구수명은 0.5시간으로 측정되었다. 플루오로카본계 공중합체 화합물인 ETFE 수지의 우수한 마찰특성에 의하여 동마찰계수가 매우 낮게 측정되었으나, 높은 하중이 걸리는 본 성능평가 시험 조건에서는 상기 윤활제의 내하중성이 충분하지 못하여 부시의 내구수명이 매우 짧게 측정되었다.

한편 Test No. 2에 의하여 플루오로카본계 공중합체 화합물인 ETFE 수지 70 중량부에 PEEK 파우더 30 중량부를 혼합한 고체윤활제를 제조하고 부시 내면에 평균 200  $\mu\text{m}$  정도 두께로 코팅한 시험에서, 동마찰계수는 0.050, 내구수명은 10 시간으로 측정되어, 전술한 실험에 1의 시험결과와 비교하여 동마찰계수는 다소 증가하였으나, 내구수명은 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 상대적으로 증가하였음을 확인할 수 있었다.

또한 Test No. 3에 의하여 플루오로카본계 공중합체 화합물인 ETFE 수지 50 중량부에 폴리이미드 파우더 50 중량부를 혼합한 고체윤활제를 제조하여, 부시 내면에 평균 50  $\mu\text{m}$  정도 두께로 코팅한 시험에서, 동마찰계수는 0.035, 내구수명은 47시간으로 측정되어, 전술한 실험에 1의 시험결과와 비교하여 동마찰계수는 다소 감소하고 내구수명도 상대적으로 증가하였음을 확인할 수 있었다. 상기 폴리이미드의 마찰특성이 ETFE에 비하여 상대적으로 높으나, 윤활제의 파손이 발생하지 않은 한, 상기와 같이 수지가 혼합된 고체윤활제의 마찰특성은 ETFE 수지 결합체에 의하여 영향을 크게 받음을 알 수 있었다.

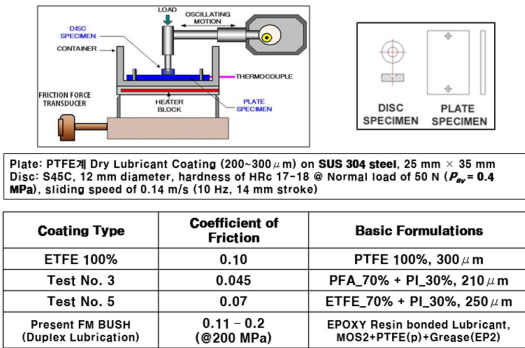


Fig. 6. Coefficients of friction of test specimens.

그러나 Test No. 4에 의하여 플로오로카본계 공중합체 화합물인 ETFE 수지 70 중량부에 폴리이미드 파우더 30 중량부를 혼합한 고체윤활제를 제조하여, 부시 내면에 평균 250 μm 정도 두께로 코팅한 시험에서, 동마찰계수는 0.054, 내구수명은 248시간으로 각각 측정되어, 전술한 Test No. 3의 시험결과와 비교하여 내구수명이 큰 폭으로 증가하였음을 확인할 수 있었다. 상기 윤활제의 동마찰계수가 전술한 Test No. 3에 비하여 다소 증가한 것은 윤활막의 두께가 5배로 증가하여 소성 변형에 의한 동마찰계수 증가 요인이 상대적으로 증가했기 때문인 것으로 추정해볼 수 있다.

부시의 내구수명 시험 후에 파손된 부시 내면의 모습을 관찰하면, 코팅된 고체윤활제가 높은 하중을 받아서 눌러 있다가 미끄럼 접촉에 의하여 서서히 마모되어 부시의 내구수명 시간대에 다다르면 코팅층이 드디어 닳아져서 상호 접촉면 금속간 직접 접촉이 발생하여 갑작스럽게 마찰 및 마모가 크게 증가함을 알 수 있었다. 따라서 높은 하중을 받는 굴삭기용 부시의 경우에, 고체윤활제의 바람직한 코팅 두께는 부시와 축 사이에 걸리는 평균면압 크기에 따라서 각기 달라질 것이나, 본 실험 조건에서와 같이 높은 하중을 받는 굴삭기용 부시의 경우에 100 내지 300 μm 정도가 적당함을 확인할 수 있었다.

3-2. 미끄럼 마찰특성

상기 시험에서 고체윤활제를 코팅하는 시험시편은 표면의 오염 물질을 완전히 제거한 후 윤활제와의 결합력을 증대시키기 위하여 #120 메쉬 크기의 알루미나 입자를 이용하여 샌드-브라스팅 처리를 하였다.

이때의 시험시편의 표면 조도는 약 0.8 내지 1.2 μm

정도이며, 표면에 존재하는 입자를 제거한 후 재차 세정처리를 하였고, 기타의 화성 피막 처리는 행하지 않았다. 왕복동 마찰마모시험기(TE77, ASTM G 133) 시험방법에 의하여 행한 주요 고체윤활제 시료들의 미끄럼 마찰계수는 Fig. 6에서와 같다.

4. 결 론

본 연구에서 플루오로카본계 화합물 수지(ETFE 등) 또는 비-플루오로카본계 화합물 수지에 PEEK 수지 등 열가소성 수지를 혼합한 결합제 매트릭스에 폴리이미드(PI) 수지와 같은 구형(spherical type)의 열경화성 수지 파우더 등을 복합하여 강화하고, 이를 스프레이 방식으로 부시 내면에 두껍게(200~300 μm) 코팅하고 열처리한 결과를 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째, 오일리스 부시용 고체윤활제 시험 결과에서 높은 하중 조건(@40 MPa)에서 작동하는 굴삭기 부시용 고체 윤활제의 내하중성을 향상시키고 미끄럼 접촉 시의 동마찰계수를 0.1 이하로 저감하여, 종래에 굴삭기 부시에서 사용하던 오일이나 그리스 등과 같은 윤활유 함유 없이도 부시의 윤활 성능 및 내구수명을 현행 FM Bush 윤활방법 대비하여 2배 이상으로 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 코팅된 저마찰 고체윤활제에 의하여 축(Pin)을 부시 내면에 때려박음 등과 같이 무리한 힘을 가하지 않고도 쉽게 조립할 수 있으며, 후막으로 코팅함으로써 모서리 경계면에 걸리는 접촉응력을 보다 완화하여 결과적으로 부시의 수명을 증가시킬 수 있고, 부시와 축의 끼워맞춤을 보다 타이트하게 하여 외부로부터의 먼지(dust) 등과 같은 이물질이 경계면으로 유입되는 오염(contamination)과 채터링(chattering) 현상과 같은 비정상적인 진동 및 소음발생을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Kong, H. et al., 'Oil-resistant and oleophilic bonded-type solid lubricants and the processing method thereof', Korean Patent No. 10-1837116, 2018.  
 [2] KS B 0401(ISO 286-2), "Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts", 2014.  
 [3] [https://www.chemours.com/Teflon\\_Industrial/en\\_US-products/product\\_by\\_name/teflon\\_ptfe/aqueous.html](https://www.chemours.com/Teflon_Industrial/en_US-products/product_by_name/teflon_ptfe/aqueous.html).

- [4] Brisco, B. J., Lin, H. Y., "The friction and wear of poly(tetrafluoroethylene)-poly(etheretherketone) composites: An initial appraisal of the optimum composition", *Wear*, Vol. 108, pp. 357-374, 1986.
- [5] Stuart, B. H., "Tribological studies of poly(etherether ketone) blend", *Tribology International*, Vol. 31, No. 11, pp. 647-651, 1998.
- [6] Bijwe, J, Sen, S., Ghosh, A., "Influence of PTFE content in PEEK-PTFE blends on mechanical properties and tribo-performance in various wear modes", *Wear*, Vol. 258, pp. 1536-1542, 2005.
- [7] Yim, W.-S., *Tribological properties of PTFE-CNT composite coatings*, Department of Mechanical Engineering, Master Degree Thesis, Yonsei University, 2015.
- [8] Lee, K. H., *A study on tribological characteristics of PTFE coating in grease lubrication*, Department of Mechanical Engineering, Master Degree Thesis, Sungkyunkwan University, 2016.
- [9] Byun, C. U. et al., "Simulator for sliding bearing of construction machines", Korean Patent No. 101145 931B1, 2012.
- [10] Kong, H. et al., 'A solid lubricant for oil-less bush', Korean Patent application No. 2018-0120019, 2018.