

# 구리 기지 복합재료의 전기적 접촉에 의한 마찰 마모 특성에 관한 연구

박형규·장호

고려대학교 재료금속공학부

## Tribology of Cu-based Electrical Contacts in Slipping-Brush Assembly

Hyung Kyu Park · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

**Abstract**—Friction characteristics and electrical resistance of sliding contacts in slipping-brush assembly were investigated. Four brush materials containing relative amounts of copper and graphite were studied. The result showed that a copper-graphite brush at a particular graphite content exhibited the most stable frictional and electrical behaviour suggesting an optimum amount of solid lubricant in metal-graphite brush system. Microscopic observation and the surface analysis showed good agreement with this phenomena.

**Key words**—electrical contacts, slipping-brush, voltage drop, graphite

### 1. 서 론

슬립링-브러시 어셈블리(slipping-brush assembly)는 슬립링과 브러시(electrical brush)사이의 전기적 접촉을 이용하여 회전하는 기계의 구성요소에서 발생된 전기적 신호를 정지되어 있는 모듈(module)에 전달하는 역할을 하는 중요한 부품이다. 일반적으로 브러시는 금속성 전도체(conductor), 고체 윤활제(solid lubricant), 결합제(binder)의 3 가지로 구성된 복합재료의 형태로 제조된다[1]. 슬립링과 브러시 사이의 실제적인 접촉은 겉보기 접촉면적(apparent contact area)의 극히 일부분에 국한되어 일어나며, 이 때 계면에서의 전류의 수축(constriction)으로 인해 수축저

항 (constriction resistance)이 발생하게 된다. 이러한 수축저항과 표면의 산화(oxidation)에 의한 저항을 접촉저항이라고 정의하며, 특별히 가혹한 환경이 아닌 경우에는 수축저항이 접촉저항의 대부분을 차지하게 된다[2,3]. 따라서, 수축저항과 마모율(wear rate)을 줄이고, 전달되는 전기신호의 안정성을 높이는 것이 브러시 제조의 기본방향이라 할 수 있다. 이러한 슬립링-브러시 어셈블리는 각종 시험장비와 공학기계를 비롯하여 전기를 구동력으로 하는 대부분의 기계에 광범위하게 걸쳐 사용되고 있으나, 그 중요성에 비해 연구가 다소 미흡한 것이 현재의 실정이다.

본 연구에서는 고체윤활제의 함량과 수

직항력에 따른 전압강하와 마찰계수의 크기 및 안정성을 표면 분석을 통해 고찰하고, 이들의 상관관계를 규명하였다.

## 2. 실험방법

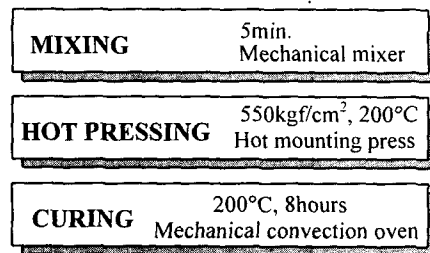
본 실험에서 사용된 브러시의 제작에는 구리분말(copper powder), 페놀수지(phenolic resin), 흑연(graphite)이 원료로 사용되었으며, 결합제(binder)는 변성페놀수지(Xylok™, Mitsuiotsu Chemical Co.)를 사용하였다. 브러시는 페놀수지의 함량을 5 vol.%로 고정시키고, 구리와 흑연의 상대적인 함량을 변화시킨 4종의 시편을 제작하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 시편의 구체적인 조성과 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 시편의 제조를 위해 사용된 제조공정을 Fig. 1에 나타내었다.

**Table 1. The ingredients and physical properties of electrical brush materials used in this work [vol. %].**

Raw materials	SP1	SP2	SP3	SP4
Copper	80	60	40	20
Graphite	15	35	55	75
Phenolic resin	5	5	5	5
Hardness(HV)	22	19	12	8
Electrical Resistivity( $\mu\Omega\text{cm}$ )	11	23	42	73

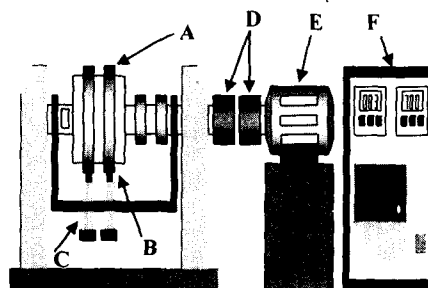
Hot mounting press에 의해 성형된 브러시의 크기는 50mm 직경의 디스크 형태이며, 슬립링-브러시 어셈블리에 장착할 수 있도록 10 10 5mm의 크기로 절단하여 실험에 사용하였다. 브러시의 상대재로는 70mm의 직경과 10mm의 폭과 10mm의

두께로 가공된 구리제 슬립링을 사용하였다. 브러시의 경도(hardness)는 Vickers 경도기(HMV-2000, Shimadzu)를 이용하여 측정하였으며, 전기전도도는 four-point probe(C-MT-series, Changmin Co.)를 이용하여 측정하였다.



**Fig. 1 Manufacturing process of electrical brush materials.**

본 연구에서는 plunger brush 형태의 슬립링-브러시 어셈블리를 이용하였으며 시험기의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.



**Fig. 2 A schematic diagram of plunger-brush type slipring-brush assembly. A: Slipring, B: Electrical brush, C: Brush holder, D: Magnetic coupling, E: Electric motor, F: Electronic control panel.**

브러시 장착부(holder)에는 탄성계수가 일

정한(3gf/mm) 스프링을 내장하여 브러시가 슬립링에 가하는 수직항력을 조절하도록 하였다. 마찰계수는 마찰시 로드셀(load cell)로부터 출력된 마찰력과 수직항력의 비를 통하여 계산되었다. 전동모터에서 발생하는 진동을 방지하기 위해 회전축을 자기 커플링(magnetic coupling)으로 연결하였고, 각 부의 기반에 방진고무를 설치하여 시스템의 기계적 진동을 최소화하였다. 마찰시 마찰계면에서 발생하는 전압강하는 2 개의 슬립링과 동종의 브러시를 회로로 연결하여 정전류의 전압강하를 통해 측정하였다. 정전류는 정전압상태에서 저항을 변화시켜 전류 조절이 가능한 정밀전원장치(Hewlett Packard 6642A system DC power supply)를 이용하였다. 시험 중의 마찰력, 회전속도, 전압강하는 PC-based DAQ(Lab-PC-1200, NI) 시스템을 이용하여 100Hz 의 데이터 처리 속도로 실시간 저장하였다. 마찰시험 전에 슬립링과 브러시와의 접촉계면의 안정성을 도모하기 위해 100gf 의 수직항력으로 60 초 동안 끌기를 하여 burnishing 을 실시하였다. 마찰시험은 각각 70, 100, 130gf 의 수직항력 조건에서 입력전류를 1A 로 고정시키고 500rpm 의 속도에서 60 초 동안의 끌기시험을 시행하여, 각 조건에서의 마찰거동과 전기적 거동을 관찰하고 분석하였다. 마찰시험후 브러시의 표면은 광학현미경(LEICA MZ6)을 이용하여 관찰하였으며, 시편의 표면 거칠기(surface roughness)는 표면조도 측정계(Tenor Co. Alpha-step 500 surface profiler)를 사용하여  $R_a$ (roughness average)로서 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 고체 윤활제의 함량과 수직항력에 따른 마찰계수와 전압강하의 크기.

수직항력과 고체윤활제의 함량이 마찰계수와 전압강하의 크기에 미치는 영향을 고찰하기 위해 입력전류는 1A 로 고정시키고 수직항력을 70,100,130gf 로 변화시키며 500rpm 에서 60 초동안 끌기시험을 시행하였다.

각 조건에 따른 네 시편의 평균마찰계수를 비교한 결과, 흑연의 상대량이 많은 시편일수록 평균마찰계수는 점차 감소하는 전형적인 경향을 나타내었다(Fig. 3). 이는 마찰시 고체 윤활제의 상대량이 증가할수록 윤활층에 함유된 흑연의 함량도 상대적으로 증가하여 계면에서의 전단강도를 감소시키기 때문인 것으로 알려져 있다[4]. 또한, 수직항력이 증가함에 따라서 마찰계수가 증가하였다. 이러한 현상은 수직항력이 증가함에 따라 계면에서의 실제접촉면적(real contact area)이 넓어지기 때문에 일어나는 것으로 판단된다[5].

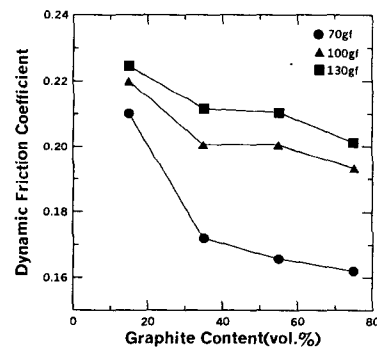


Fig. 3 Dynamic friction coefficient as a function of graphite content at three different applied

ied loads.

흑연의 양에 따른 전압강하를 Fig. 4 에 나타내었다. 수직항력이 증가함에 따라 전압강하는 감소하는 경향을 보였다. 이는 동일한 입력전류세기 하에서 수직항력이 증가하면 실제로 접촉하고 있는 asperity 의 수가 많아지고, asperity tip 의 접촉면적도 넓어져서 계면에서의 전류밀도를 낮추어 수축저항을 감소시키기 때문인 것으로 평가된다[1]. 또한, 흑연의 상대적 함량이 증가할수록 시편의 전기전도도는 감소하여 전압강하를 전반적으로 증가시킬 것으로 예상되었으나, 흑연이 상대적으로 많이 함유된 시편 SP2(35vol. %)의 경우 오히려 SP1(15vol. %)보다 낮은 전압강하를 나타내었다.

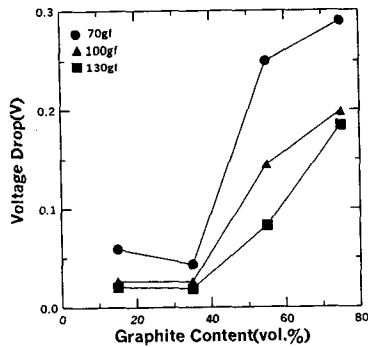
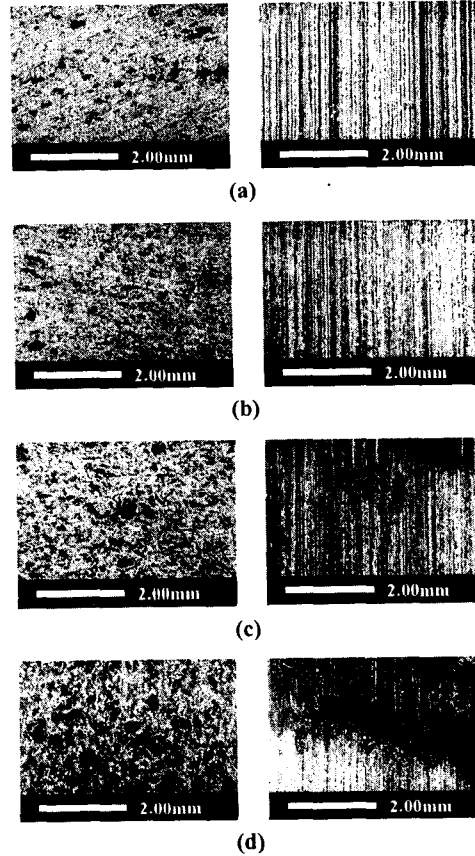


Fig. 4 Contact voltage drop as a function of graphite content at three different applied loads.

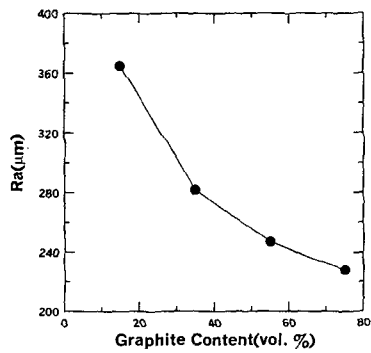
일반적으로 전기적 접촉시 발생하는 수축저항은 재료 자체의 전기 전도도뿐만 아니라, 재료표면의 거칠기(surface roughness)와 계면에서 생성되는 윤활막의 분포에

도 영향을 받는 것으로 알려져 있다[6]. 시편의 표면에 생성되는 윤활막이 전압강하에 미치는 영향을 고찰하기 위해 마찰시험 전후에 각 시편의 표면을 광학현미경으로 관찰하여 Fig. 5 에 나타내었다. SP1 과 SP2 의 경우에는 흑연의 양이 상대적으로 적어 윤활막이 관찰되지 않았다. 그러나, 흑연의 함량이 증가한 SP3(55 Vol. %)는 표면에서 불균일한 윤활막이 관찰되었으며 흑연의 함량이 가장 많은 SP4(75 Vol. %)에서는 윤활막의 분포가 가장 불균일하였다.



**Fig. 5 Optical micrographs of brush specimen surfaces(left: before test, right: after test), (a) SP1, (b) SP2, (c) SP3, (d) SP4**

또한, 재료표면의 거칠기가 전압강하에 미치는 영향을 고찰하기 위해 네 시편의 표면 거칠기를 측정하였다. 시편에 함유되어 있는 흑연의 양이 많아질수록 표면의 거칠기가 감소하였다.(Fig. 6)



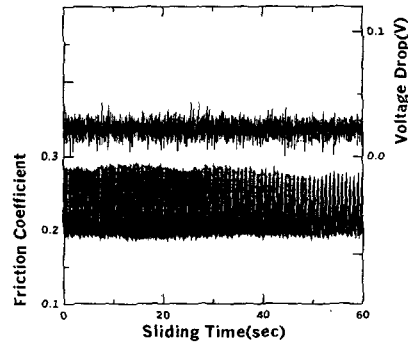
**Fig. 6 Surface roughness( $R_a$ ) of brush specimens as a function of graphite content.**

전압강하에 영향을 미치는 3 가지 요인을 고찰해본 결과, SP2의 경우에 전기전도도는 SP1보다 낮게 나타났으나 표면 거칠기가 작아서 슬립링과 접촉하고 있는 실제 접촉면적이 상대적으로 넓은 것으로 사료된다. 두 시편의 윤활막의 분포에는 차이가 관찰되지 않았다. 따라서, 표면의 거칠기가 재료 자체의 전기전도도보다 우세하게 작용하여, SP2가 SP1보다 낮은 전압강하를 나타내는 것으로 판단된다. 흑연의 함량이 증가한 SP3(55Vol. %)와 SP4(75Vol. %)는 다른 두 시편에 비해 표면의 거칠기는 작으나 전기전도도가 낮고, 표면에 불균일한 윤활막을 생성하였다.

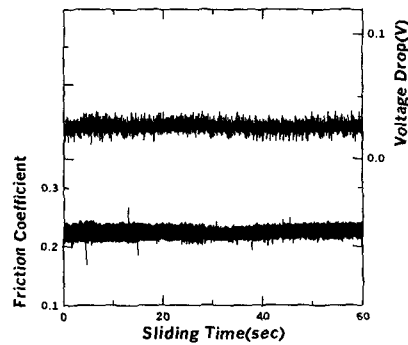
따라서, 전압강하는 매우 높은 값을 나타내는 것으로 판단된다. 흑연의 함량이 가장 많은 SP4가 가장 높은 전압강하를 나타내었다.

### 3-2. 고체윤활제의 함량에 따른 마찰계수와 전압강하의 안정성

고체윤활제의 함량에 따른 마찰계수와 전압강하의 안정성을 고찰하기 위해 전류세기와 수직항력은 각각 1A, 100gf로 고정시키고 60초동안 끌기시험을 시행하였다.



(a)



(b)

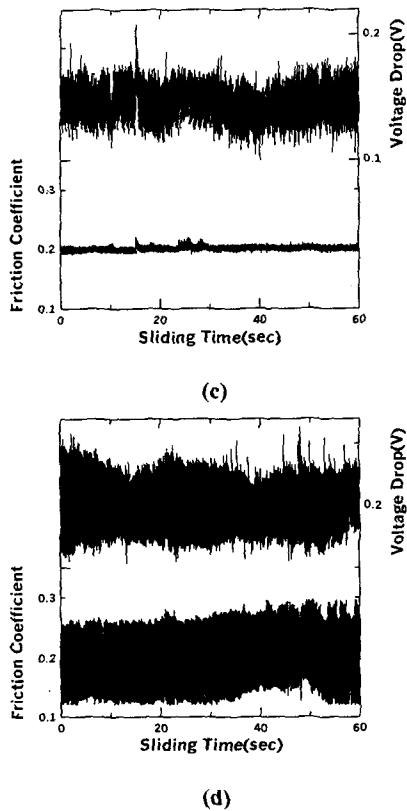


Fig. 7 Amplitude of dynamic friction coefficient and contact voltage drop of brush specimens. (a) SP1, (b) SP2, (c) SP3, (d) SP4.

흑연의 상대적인 함량에 따른 마찰계수와 전압강하의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 흑연의 함량이 15vol.%(SP1)에서 35vol.%(SP2)로 증가함에 따라 마찰계수와 전압강하의 진폭이 감소하였다. 마찰계수의 진폭이 감소하는 것은 흑연의 양이 많아짐에 따라 슬립링과 브러시 계면에서의 윤활효과가 증대되어 stick-slip 현상이 감소했기 때문으로 판단된다. 이에 따라, 실

제접촉면적의 변화폭이 적어지므로 전압강하가 안정화된 것으로 판단된다. 그러나, 흑연의 함량이 55vol. %로 증가한 SP3의 경우에 마찰계수의 진폭은 눈에 띄게 감소했으나 전압강하의 진폭은 오히려 증가하였다. 흑연의 함량이 증가하면서 윤활막의 생성이 활발해져 마찰계수는 안정화되는 경향을 보인 것으로 평가되나, 계면에서 윤활막이 브러시의 끌기방향(sliding direction)으로 편석(segregation)되는 것이 관찰되었다(Fig. 5(c)). 따라서, 표면의 두께와 전기전도도가 불균일해져서 마찰시 전압강하가 불안정해진 것으로 판단된다. 브러시 표면에서 윤활막의 분포는 흑연의 함량이 가장 많은 SP4(75vol. %)의 경우에 더욱 불균일해졌다(Fig. 5(d)). 이로 인해 마찰계수도 평균값은 낮아졌으나 윤활막의 지나치게 불균일한 분포로 인해 진폭이 SP3보다 크게 증가하였고 전압강하의 진폭 역시 증가하였다. 반면에, 윤활막의 불균일한 분포가 관찰되지 않은 SP1(Fig. 5(a))과 SP2(Fig. 5(b))는 안정된 마찰 거동과 전기적 접촉 거동을 나타내었으며 SP2가 SP1보다 우수한 거동을 나타내었다.

#### 4. 결론

Plunger brush 형태의 슬립링-브러시 어셈블리를 사용하여 전기적 접촉시의 마찰마모 특성을 고찰하였다. 시험시 마찰계수와 전압강하를 측정한 결과, 고체윤활제인 흑연의 함량이 35vol. %인 브러시가 가장 안정된 마찰거동과 전기신호전달 거동을 나타내었다. 마찰거동과 전기신호전달의 안정성에 영향을 미치는 인자(factor)인 시편

의 표면 거칠기, 표면 형상(surface morphology), 그리고 전기전도도를 모두 고찰해 본 결과, 흑연의 함량이 35vol. %인 브러시가 슬립링과 브러시의 계면에 가장 균일한 윤활막을 생성시킴을 확인하였다. 따라서, 구리를 전도체로 사용하는 브러시의 경우에 저압의 조건에서 가장 안정되고 균일한 윤활막을 형성하여 마찰거동과 전기신호 전달거동을 안정화시키는 흑연의 최적의 조성이 존재하는 것으로 판단된다.

and Manufacturing Technology, Vol. 11 No. 1, 1988.

#### 참 고 문 헌

1. E.I. Shobert, Carbon Brushes : The Physics and Chemistry of Sliding Contacts, Chemical Publishing Company, New York, 1965.
2. T.R. Thomas, Rough Surfaces, Longman, New York, 1982.
3. R. Holm, Electrical Contacts : Theory and Applications, Springer-Verlag, 1976.
4. 이정주, "자동차용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제의 변화에 따른 제동특성에 관한 연구", 고려대학교 석사학위논문, 1998.
5. P. Barkan, E.J. Tuohy, "A Contact Resistance Theory for Rough Hemispherical Silver Contacts in Air and in Vacuum", IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 84, No. 1132, 1965.
6. K. Okada, M. Yoshida, "Contact Voltage Drop and Wear of Self-Lubricating Ag-Pd Alloy Base Composite Materials", IEEE Transactions on Components, Hybrids,