

Copper-Graphite 브러시 내 흑연의 상대량에 따른 전기 신호 전달 특성에 관한 연구

박 형 규 · 장 호
고려대학교 재료금속공학부

Characteristics of Electric Signal Transmission according to Relative Amounts of Graphite in Copper-Graphite Brush

Hyung Kyu Park · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract—Electrical and tribological behaviours of a copper-graphite brush in a slipring-brush assembly were investigated to evaluate the characteristics of electric signal transmission between a slipring and a brush. Five brush materials containing different 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 a solid lubricant in a metal-graphite brush system. Microscopic observation and the surface analysis showed good agreements with this phenomena. In addition, the deviation of the friction coefficient and electric signal distortion has a close relationship with a microscopic mechanical vibration and the change of a real contact area.

Key words—signal distortion, slipring-brush, real contact area, graphite

1. 서 론

슬립링-브러시 어셈블리(slipring-brush assembly)에 사용되는 브러시(brush)는 상대재인 슬립링(slipring)과의 전기적 접촉(electrical contact)을 이용하여, 회전하는 구동체에 내장된 센서(sensor)에서 발생된 전기신호(electric signal)를 정지되어 있는 모듈(module)에 전송하는 역할을 하는 부품이다. 신호 전송 시 입력 신호는 양극 브러시(anode brush)로 들어가 슬립링을 거친 뒤 음극 브러시(cathode brush)를 통하여 출력신호의 형태로 모듈에 배출된다. 배

출된 신호는 사용자가 보유하고 있는 데이터 수신 시스템(data acquisition system)에 들어가 사용자가 정보를 받아들여 분석할 수 있게 한다. 또한, 장비에 장착되어 있는 양극 브러시에 신호를 입력시키고, 이 신호가 다시 슬립링을 거친 뒤 음극 브러시를 통해 센서로 출력되어 장비의 구동과 통제에 이용된다. 이러한 슬립링-브러시 시스템은 각종 전기모터, CT 스캐너, 자동 항법장치(navigator), 레이더(radar)를 비롯하여 각종 공학용 시험 장비의 제어에 폭넓게 이용되고 있다.

슬립링과 브러시의 전기적 접촉 시 재료 표면의 미소 거칠기 때문에 실제 접촉은 표면에 존재하는 asperity 의 접촉에 의한 실제 접촉 면적(real contact area)에서 발생한다[1]. 일반적으로 실제 접촉 면적은 겉보기 접촉 면적(apparent contact area)의 극히 일부분에 국한되며 재료 자체의 성질과 시스템에 가해지는 물리적 조건에 따라 다양하게 변화하게 된다[2]. 따라서, 슬립링과 브러시 사이의 계면에서 전류가 흐를 때 접합점(contact junction)에서 전류의 수축이 일어나 실제적으로 전기 신호 전달에 쓰이는 재료의 부피를 감소시켜 접합점에서의 저항을 증가시킨다. 이러한 전류의 수축에 의한 저항의 증가분을 수축저항(constriction resistance)이라 정의하며, 수축저항의 생성에 대한 개략도를 Fig.1 에 나타내었다[3,4]. 수축저항과 재료 자체의 비저항, 그리고 계면에서 생성되는 산화막 또는 윤활막의 비저항이 전체 시스템에서의 접촉저항을 결정하게 된다. 이러한 접촉저항에 의해 발생하는 전압강하가 슬립링과 브러시 사이의 전기신호 전달에 방해 요소로 작용하여 신호 떨림(signal distortion)현상이 나타나게 된다[5].

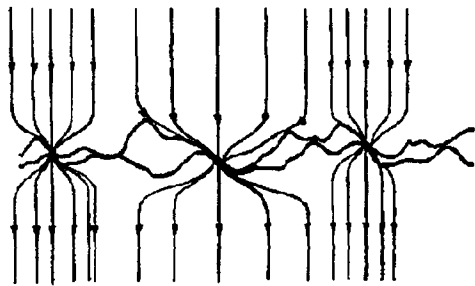


Fig. 1. A schematic diagram of bulk electrical interface[4].

전기 신호 전달의 정확도와 안정성을 위해서 브러시가 갖추어야 할 조건을 살

펴보면 첫째, 브러시를 구성하는 재료 자체의 전기전도도와 열전도도가 좋아야 하며 둘째, 다양한 속도와 가압력, 전기신호의 종류와 세기(intensity) 등의 조건에서 신호전달의 역할을 안정적으로 수행하여야 한다. 셋째, 장시간에 걸쳐 사용해도 마모량이 적어야 하고, 동시에 신호전달 또한 지속적으로 안정적이어야 한다. 이러한 여러가지 성질들을 만족시키기 위해서는 한 가지 물질만을 이용해서 브러시를 제작할 수 없으며, 3~5 종류의 원료 물질을 혼합하여 제작한다. 일반적으로 브러시에 사용되는 구성물질은 크게 금속성 전도체(metallic conductor), 고체 윤활제(solid lubricant), 결합제(binder)로 구분된다[4]. 브러시를 구성하는 물질 중 고체 윤활제는 슬립링-브러시 어셈블리 구동 시 슬립링과 브러시의 마찰 계면에 윤활막(transfer layer)을 형성하여 마찰 특성과 신호 전달 특성에 영향을 미치게 되는데, 브러시에 주로 사용되는 고체 윤활제로는 흑연(graphite)이 있으며, 고온이나 습도가 매우 낮은 조건에서는 MoS₂, BaF 를 소량 첨가하여 사용하기도 한다[4].

슬립링과 브러시 사이에서의 마찰 특성은 전기 신호의 전달에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 조건에서 고체 윤활제 함량의 변화에 따른 브러시의 마찰 특성과 전기 신호 전달 특성의 변화를 고찰하기 위해서 구성 물질 중 결합제의 성분비는 일정하게 유지한 채 고체 윤활제인 흑연과 전도체인 구리의 배합 비율(volume %)을 조절하여 5 가지 브러시 시편을 제작하였다. 마찰 및 전기 신호 전달 특성을 관찰하기 위해 가압력, 속도, 그리고 전기 신호의 형태와 세기의 조절이 가능한 plunger-brush 형태의 슬

슬립링-브러시 어셈블리를 제작하여 시험하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 브러시의 제작에는 구리분말(copper powder), 페놀수지(phenolic resin), 흑연(graphite)이 원료로 사용되었으며, 결합제(binder)는 변성페놀수지(Xyl-ok™, Mitsuiotsu Chemical Co.)를 사용하였다. 브러시는 페놀수지의 함량을 5 vol.%로 고정시키고, 구리와 흑연의 상대적인 함량을 변화시킨 5종의 시편을 제작하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 시편의 구체적인 조성과 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 각각의 시편은 원료 혼합, 본성형, 열처리의 과정을 거쳐 제조되었으며, 시편의 제조를 위해 사용된 제조공정을 Fig. 2에 나타내었다.

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

| Raw Materials | CG95 | CG80 | CG60 | CG40 | CG20 |
|---|------|------|------|------|------|
| Copper | 95 | 80 | 60 | 40 | 20 |
| Graphite | 0 | 15 | 35 | 55 | 75 |
| Resin | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Hardness (HV) | 31 | 22 | 19 | 12 | 7 |
| Electrical Resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$) | 6 | 11 | 23 | 42 | 73 |

본 성형은 혼합된 재료를 금형에 투입하여 200°C에서 550kgf/cm²의 압력으로 20분간 시행되었다. 성형된 브러시 시편의 크기는 직경 100mm의 디스크 형태이

며 슬립링-브러시 어셈블리에 장착할 수 있도록 10×10×5mm의 크기로 절단하여 실험에 사용하였다. 브러시의 상대재로는 직경 70mm, 폭 10mm, 두께 10mm로 가공된 구리재 슬립링을 사용하였다. 브러시의 경도(hardness)는 Vickers 경도기(HMV-2000, Shimadzu)를 이용하여 측정하였으며, 전기전도도는 four-point probe(C-MT-series, Chang-min Co.)를 이용하여 측정하였다.

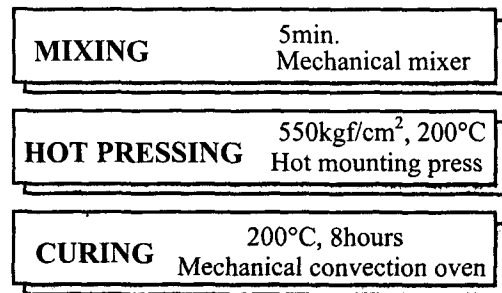


Fig. 2. Manufacturing process of electrical brush materials.

본 연구를 위해 plunger-brush 형태의 슬립링-브러시 어셈블리를 제작하였으며, 시험기의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 브러시에 가하는 수직항력은 브러시 홀더의 중심축에서 같은 거리에 추를 올려 놓는 dead weight 방식으로 조절하였으며, 마찰계수는 마찰 시 로드셀(load cell)로부터 출력된 마찰력과 수직항력의 비를 통하여 계산되었다. 전동 모터에서 발생하는 진동을 방지하기 위해 회전축을 자기 커플링(magnetic coupling)으로 연결하였다. 마찰 시 마찰 계면에서 발생하는 신호 뒤틀림(signal distortion)은 2개의 슬립링과 동종의 브러시를 회로로 연결하여 정전류의 전압강하를 통해 측정하였고, 회로의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다.

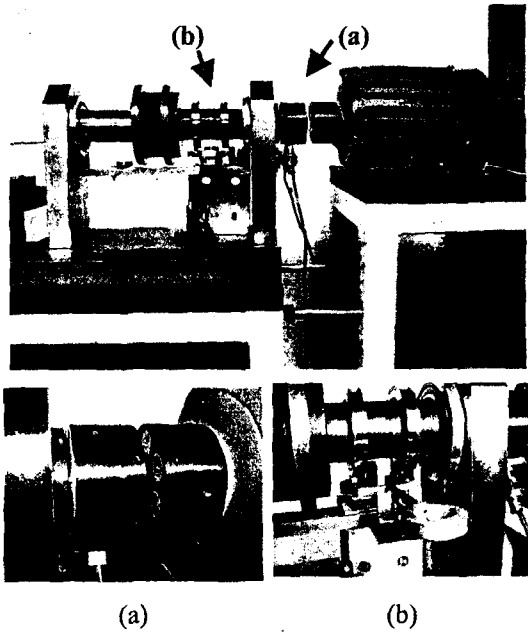


Fig. 3. Plunger-Brush type slipping-brush assembly: (a) Magnetic coupling, (b) Brush holder assembly.

입력 신호 발생 장치는 정전압 상태에서 저항을 변화시켜 전류 조절이 가능한 정밀 전원 장치(Hewlett Packard 6642A system DC power supply)와 switching transistor 를 연결하여 사용하였다.

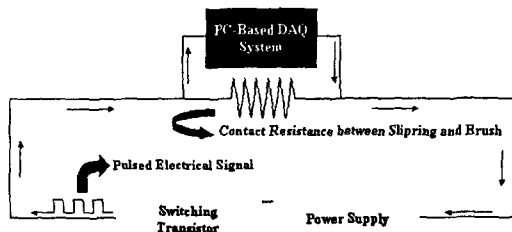


Fig. 4. A schematic diagram of signal distortion measurement system used in this work.

입력 신호는 주기가 0.2Hz 이고 신호 지속 시간이 5 초인 펄스(pulse)형태의 전류로 설정하였으며, 신호의 파형을 Fig. 5에

나타내었다. 시험 중의 마찰력, 회전 속도, 전압 강하는 PC-based DAQ(Lab-PC 1200, National Instrument Co.) 시스템을 이용하여 100Hz 의 데이터 처리 속도로 실시간 저장하였다.

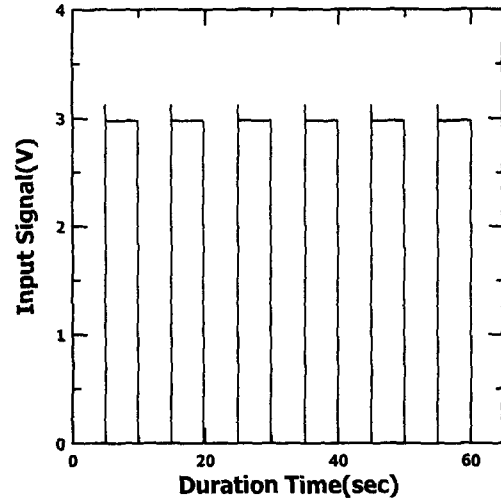


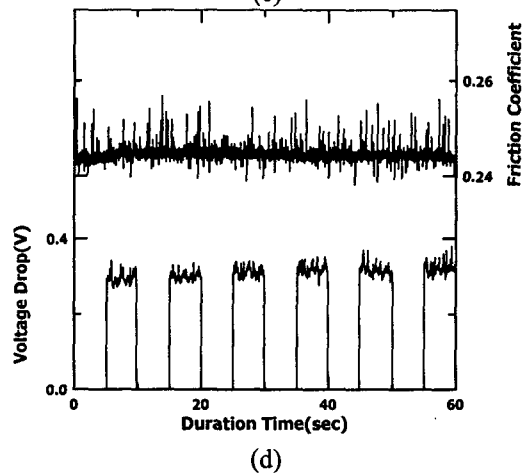
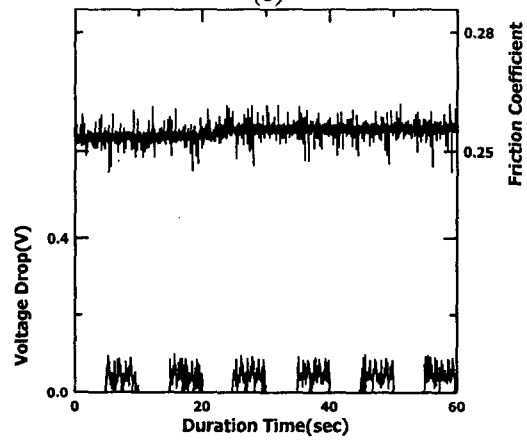
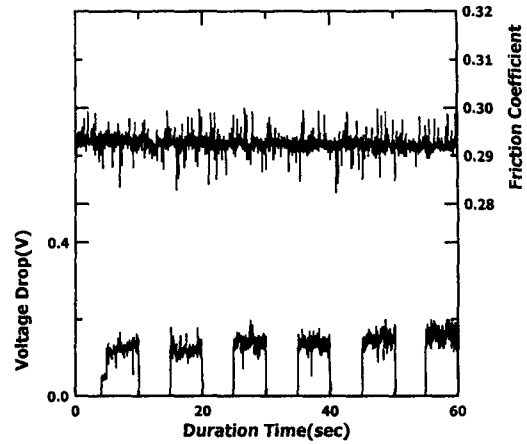
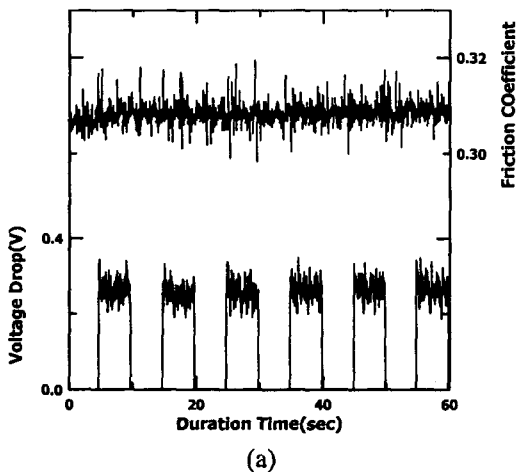
Fig. 5. Pulse type input electric signal.

전기 신호 전송 시험 전에 슬립링과 브러시와의 접촉계면의 안정성을 도모하기 위해 200gf 의 수직항력으로 1000rpm 의 속도에서 3 시간동안 끌기를 하여 burnishing 을 실시하였다. 전기 신호 전송 시험은 전류의 세기와 속도는 각각 1A 와 30rpm 으로 고정시키고, 수직항력을 140, 170, 200gf 로 변화시키며 각 조건에서의 마찰 거동과 전기적 거동을 관찰하고 분석하였다. 시험 후 브러시의 표면은 광학 현미경(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 함량에 따른 마찰계수와 에너지 손실(energy loss)의 크기.

고체윤활제의 함량이 마찰계수와 전기 신호 전달에 미치는 영향을 고찰하기 위해 입력전류와 수직항력은 각각 1A 와 140gf 로 고정시키고 30rpm 에서 60 초 동안 끌기시험을 시행하였다. 각각의 시편의 마찰계수와 전압강하의 변화를 Fig. 6 에 나타내었으며, 전체적인 경향성을 파악하기 위해 흑연의 함량에 따른 각 시편의 평균마찰계수를 Fig. 7 에 나타내었다. 다섯개의 시편을 모두 비교한 결과, 흑연의 상대량이 많은 시편일수록 평균마찰계수는 점차 감소하는 전형적인 경향을 나타내었다. 이는 마찰시 고체 윤활제의 상대량이 증가할수록 윤활층에 함유된 흑연의 함량도 상대적으로 증가하여 계면에서의 전단강도를 감소시키기 때문인 것으로 알려져 있다[6]. 입력 신호의 파형(Fig. 5) 과 출력 신호의 파형의 차이는 Fig. 6 과 같은 전압강하의 파형으로 나타나며, X 축으로부터 전압강하의 파형을 적분한 넓이 ($VIt: V: \text{voltage}(v), I: \text{current}(A), t: \text{time}(sec)$) 를 에너지 손실(J)로서 Fig. 8 에 나타내었다.



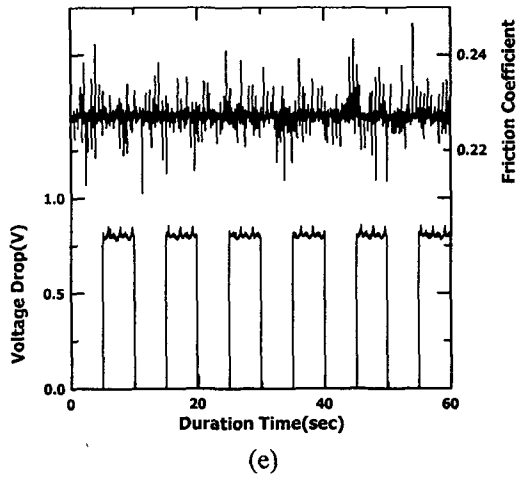


Fig. 6. Friction coefficient and contact voltage drop of brush specimens: (a) CG95(Cu 95vol. %), (b) CG80(Cu 80vol. %), (c) CG60(Cu 60vol. %), (d) CG40(Cu 40vol. %), (e)CG20(Cu 20vol. %).

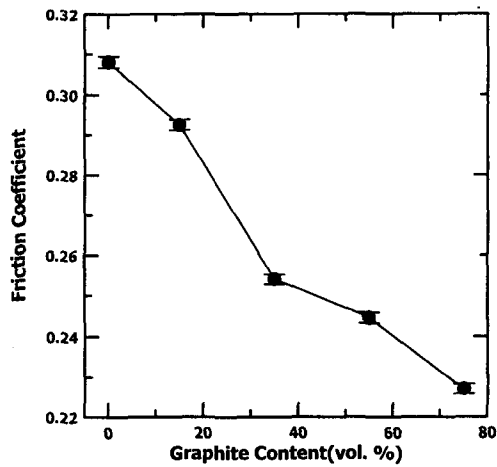


Fig. 7. Friction coefficient as a function of graphite content.

흑연의 상대적 함량이 증가할수록 시편의 비저항값이 증가(Table 1)하여 전압강하를 전반적으로 증가시키기 때문에 높은 에너지 손실이 유발될 것으로 예상되었으나, 흑연의 함량이 35 vol.%이하인

CG80(15 vol.%)과 CG95(0 vol.%)의 경우에는 오히려 흑연의 함량이 감소할수록 높은 에너지 손실을 나타내었다.

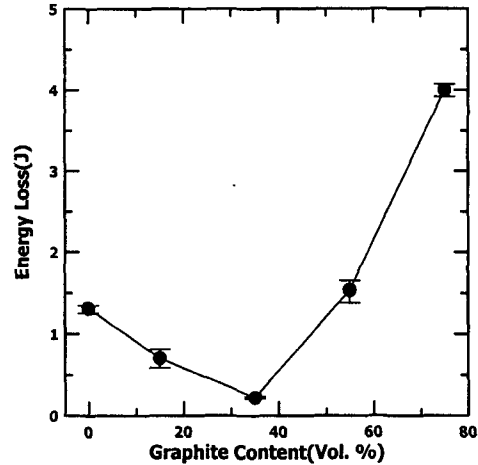


Fig. 8. Energy Loss as a function of graphite content.

흑연의 함량이 0vol.%에서 35vol.%로 증가함에 따라 에너지 손실이 감소하는 것은 다음과 같이 설명되어질 수 있다. 일반적으로 전기적 접촉시 발생하는 접촉저항은 재료 자체의 비저항 뿐만 아니라, 수축저항에도 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 수축저항값은 실제 접촉점(contact spot)의 개수와 다음과 같은 관계를 만족한다[5].

$$R_c \propto 1/\sqrt{n} \quad [5]$$

(R_c : Constriction resistance, n : Contact spot number)

브러시 시편 내의 흑연의 함량이 35vol.%(CG60)에서 0vol.%(cg95)로 감소함에 따라, 슬립링과 브러시 사이의 구리간 접촉(copper-to-copper contact)이 증가하게 된다. 이에 따라 슬립링과 브러시 사이의 계면에서 재료간의 compatibility가 증가하고[6], 흑연에 의한 윤활작용이 저하되어 마찰거동이 불안정하게 되므로 접촉의 안

정성(stability)이 떨어지게 된다(Fig. 13). 이러한 슬립링과 브러시의 불안정적인 접촉은 수축저항을 증가시키고, 그에 따라 전압강하가 증가하여 에너지 손실이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 흑연의 함량이 35vol.%에서 0vol.%로 감소하게 되면, 상대적으로 시편에 함유된 구리의 함량이 많아지므로 시편의 경도가 증가하게 된다(Table 1). 따라서, 같은 크기의 수직항력이 브러시에 가해질 때, 표면에 존재하는 asperity 들이 변형을 일으키게 되는 압점의 깊이(indentation depth)는 경도가 낮은 CG60(Cu 60vol.%)에서 높은 CG95(Cu 95vol.%)로 갈수록 낮아지게 된다. 그에 따라 실제 접촉 면적이 감소하게 되므로 접촉점의 개수가 줄어들어 수축저항이 증가한 것으로 생각된다. 이러한 과정의 모식도를 Fig. 9에 나타내었다.

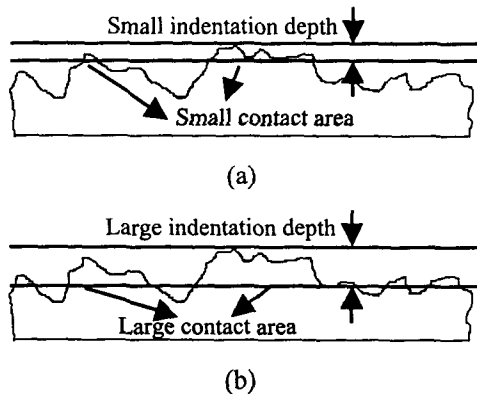


Fig. 9. The change of a real contact area according to indentation depth: (a) Hard material, (b) Soft material.

또 한가지 이유로는 흑연의 함량이 증가함에 따른 표면 거칠기(surface roughness)의 변화를 들 수 있다. 표면 거칠기가 수축저항에 미치는 영향을 고찰하기 위해 표면 조도 측정계를 사용하여 각 시편의 표면 거칠기를 측정한 뒤 각각의 R_a 를

Fig. 10에 나타내었다. 시편에 함유되어 있는 흑연의 양이 많아질수록 표면의 거칠기가 감소하였다. 흑연은 lamellar layer structure를 가지고 있으며, 각 층간 결합은 secondary bonding인 Van der Waals 결합을 이루고 있기 때문에 작은 전단 응력에 의해서도 쉽게 결합이 분해되는 것으로 알려져 있다[7]. 따라서, 약한 결합력을 갖는 흑연이 슬립링과의 마찰 시에 트랙(track)을 따라서 구리 기지 조직의 asperity 사이에 도포함에 따라 브러시와 슬립링의 표면 거칠기가 낮아진 것으로 판단된다.

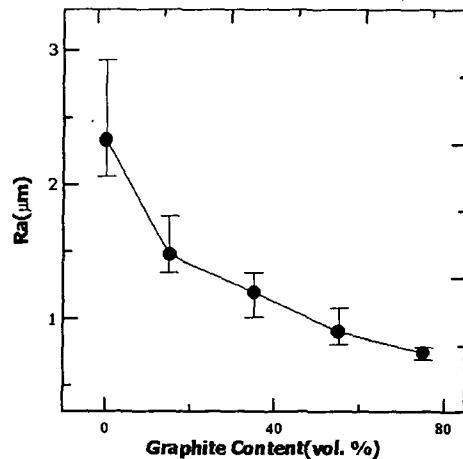


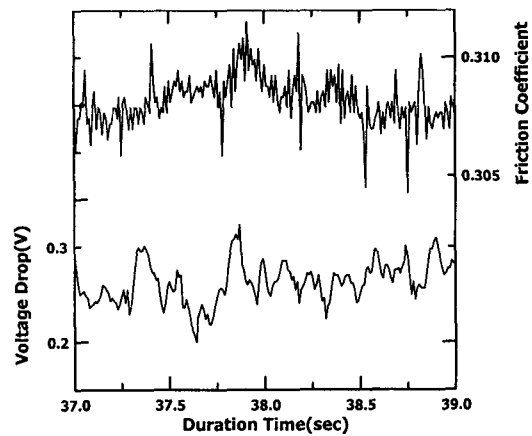
Fig. 10. Surface roughness(R_a) of brush specimens as a function of graphite content.

흑연이 브러시와 슬립링의 표면 거칠기를 낮춤에 따라 실제 접촉 면적이 넓어져서 접촉점의 개수가 많아지기 때문에 전기 신호 전송 시 계면에서의 전류 수축이 적어져서 수축저항이 감소하게 되는 것으로 판단된다. 따라서, 브러시 내 흑연의 함량이 35vol.%에서 0vol.%까지 감소함에 따라 재료 자체의 비저항은 감소하지만, 계면에서의 윤활작용의 감소로 인한 접촉의 불안정 그리고 강도와 표면 거칠기의 증가에 따른 접촉 면적의 감소로 인해 수축저항이 증가

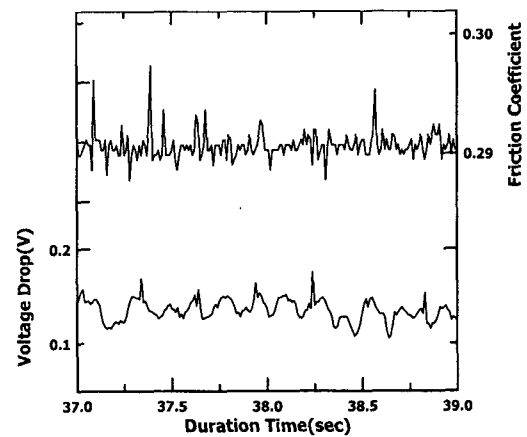
하여 전체 접촉 저항의 크기가 증가한 것으로 판단된다. 그러나, 흑연의 함량이 35vol.% 이상인 CG40(55vol.%)과 CG20(75 vol.%)의 경우에는 흑연의 함량이 증가함에 따라 에너지 손실이 증가하였는데, 이는 흑연의 양이 지나치게 많아져서 수축 저항의 감소보다 재료 자체의 비저항의 증가가 더 우세하게 작용하였기 때문으로 판단된다. 흑연의 함량이 가장 많은 CG20 이 가장 높은 에너지 손실을 나타내었다.

3-2. 고체윤활제의 함량에 따른 마찰계수와 전기 신호 전달의 안정성

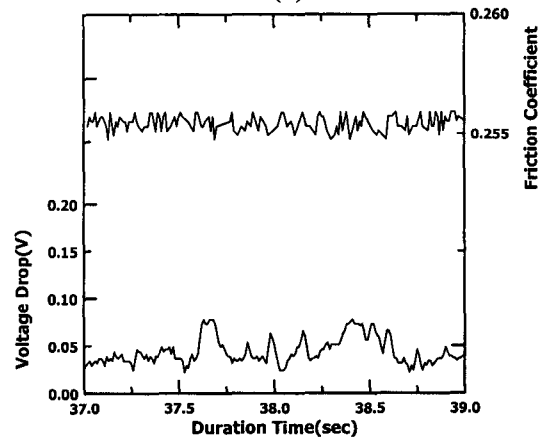
1A 의 전류 세기와 140gf 의 수직항력, 그리고 30rpm 의 조건에서 각각의 시편에 대한 마찰 계수와 전압강하의 변화를 Fig. 11 에 나타내었다. 5 개 시편 모두의 경우에 마찰 계수는 지속적으로 진동하는 양상을 나타내었는데, 이것은 시스템의 기계적 진동과 재료가 계면에서 나타내는 성질에 따른 것으로 판단된다. 또한, 모든 시편에서 전압 강하의 폭, 즉 출력 신호 진동의 크기가 마찰 계수의 진폭에 따라 증가하는 양상을 보였으며, 60 초동안 끝 기 시험을 한 뒤, 각 시편에 따른 마찰계수와 전압강하의 진폭의 평균값을 Fig. 12 에 나타내었다. 마찰 계수의 진폭의 증가는 슬립링과 브러시의 마찰 시 계면에서의 접촉이 원활하게 이루어지고 있지 않다는 것을 의미한다. 따라서, 마찰 시 진동에 의한 불균일한 접촉이 계면을 통한 전기 신호의 전달에 방해 요소로 작용하여 출력 신호의 불균일한 진동을 유발시킨 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

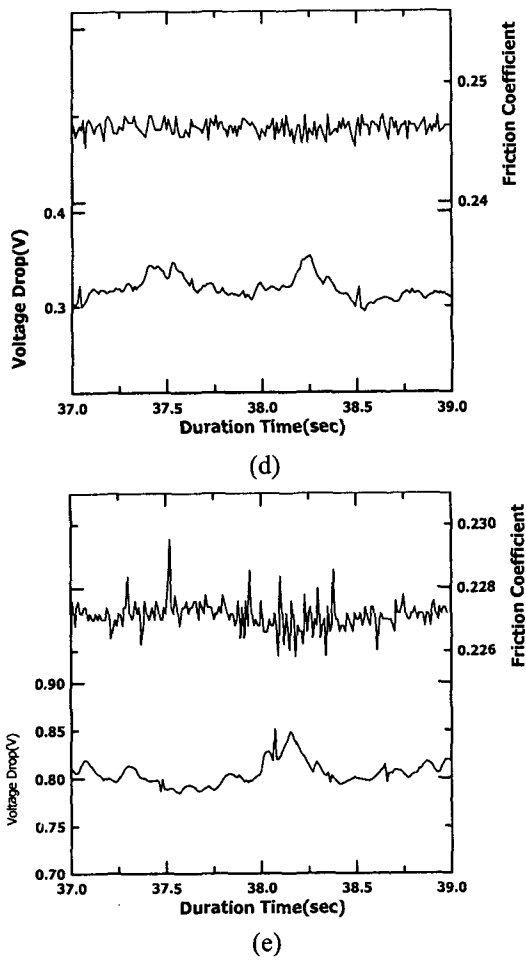


Fig. 11. Friction coefficient and contact voltage drop of brush specimens: (a) CG95, (b) CG80, (c) CG60, (d) CG40, (e) CG20.

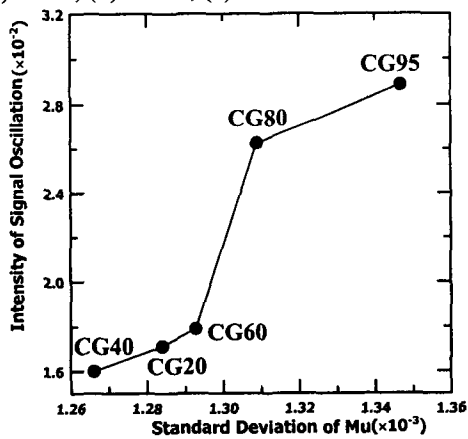


Fig. 12. Intensity of signal oscillation as a function of standard deviation of friction coefficient.

흑연의 함량에 따른 마찰 계수의 진폭과 전압 강하에 의한 진폭(신호 진동의 세기)을 Fig. 13에 나타내었다.

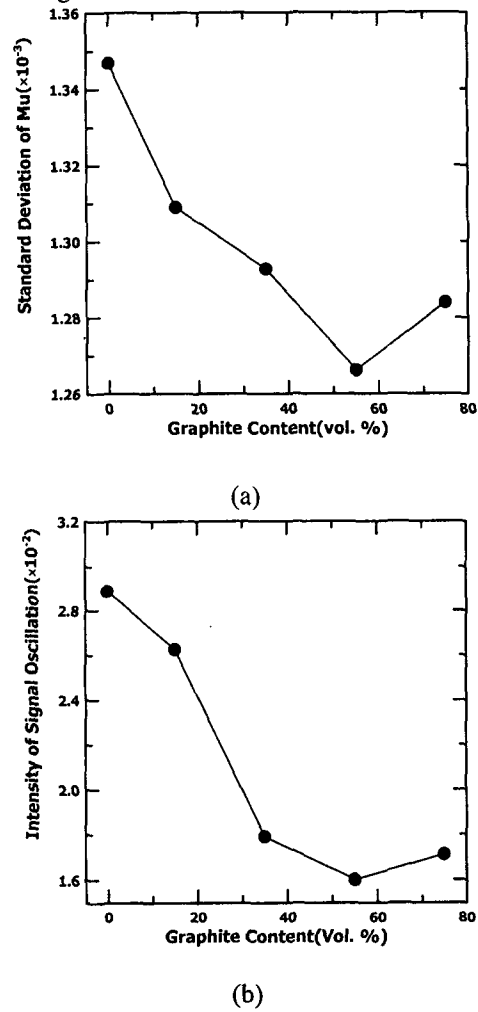
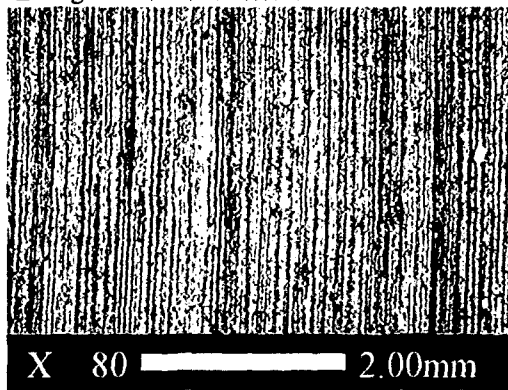


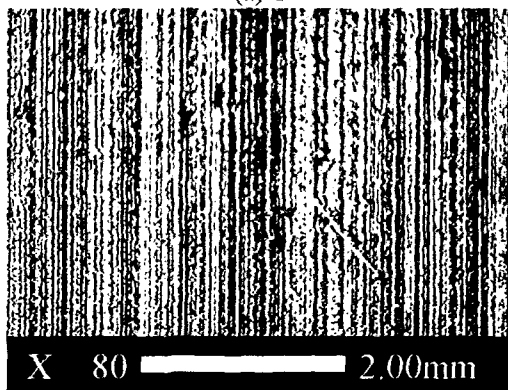
Fig. 13. Standard deviation as a function of graphite content: (a) STD of friction coefficient, (b) Intensity of signal oscillation.

흑연의 함량이 증가함에 따라 마찰계수는 전반적으로 감소하는 경향을 나타내었는데,

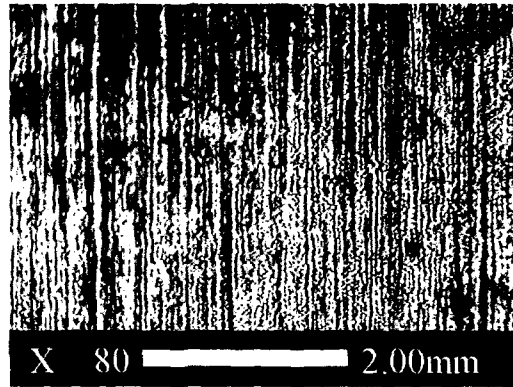
이는 슬립링과 브러시와의 계면에서 흑연의 양이 증가함에 따라 윤활작용이 원활하게 이루어졌기 때문으로 생각된다. 마찰계수 진폭의 감소에 따라 전압 강하의 진폭도 줄어들어 신호의 진동(signal oscillation) 또한 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나, 흑연의 함량이 가장 많은 CG20(75 vol.%)의 경우에는 마찰계수와 전압 강하의 진폭이 CG40(55vol.%)보다 높은 값을 나타내었다. 전기 신호 전송 시험 후의 브러시와 슬립링의 표면 형상을 Fig. 14에 나타내었다.



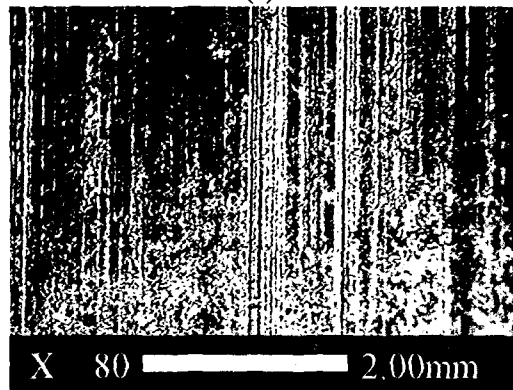
(a)-1



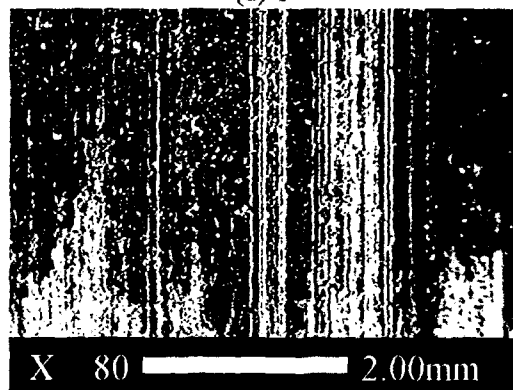
(b)-1



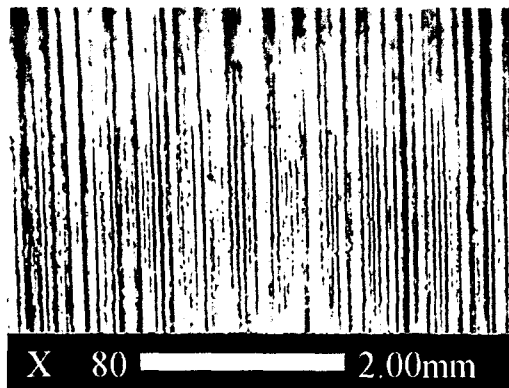
(c)-1



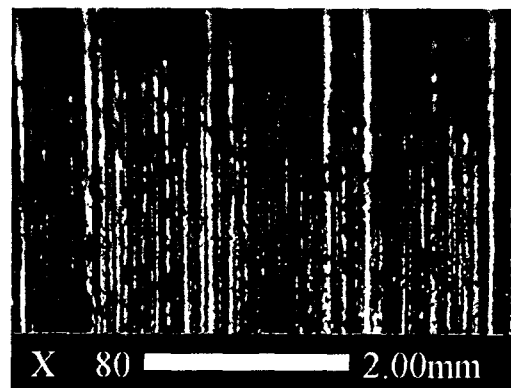
(d)-1



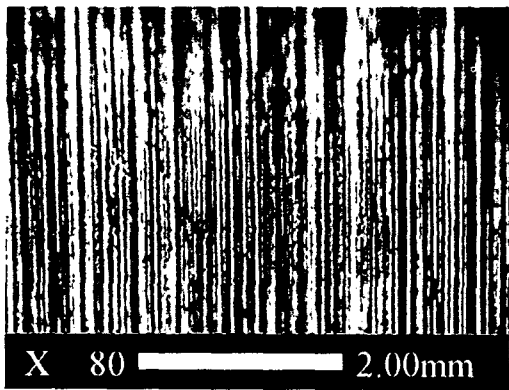
(e)-1



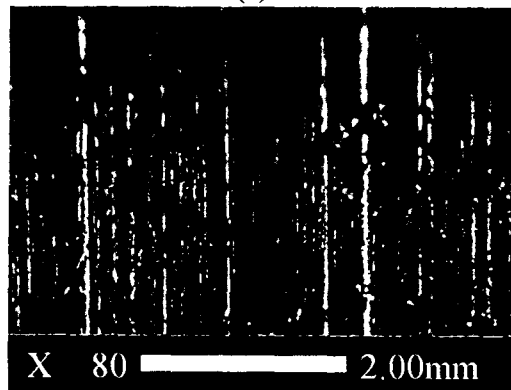
(a)-2



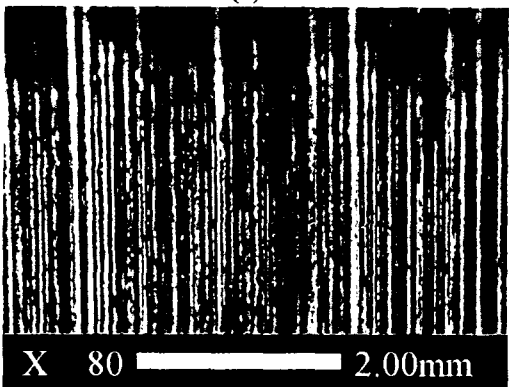
(d)-2



(b)-2



(e)-2



(c)-2

Fig. 14. Surface morphology of brushes and a slipring: (a)-1 CG95(Cu 95vol.%) brush, (b)-1 CG80(Cu 80vol.%) brush, (c)-1 CG60(Cu 60vol.%) brush, (d)-1 CG40(Cu 40vol.%) brush, (e)-1 CG20(Cu 20Vol.%) brush, (a)-2 slipring rubbed with CG95 brush, (b)-2 slipring rubbed with CG80 brush, (c)-2 slipring rubbed with CG60 brush, (d)-2 slipring rubbed with CG40 brush, (e)-2 slipring rubbed with CG20 brush.

흑연의 함량이 증가함에 따라 브러시와 슬립링 표면에 흑연의 윤활막이 점차 생겨나는 것이 관찰되었다. 그러나, 흑연의 함량이 가장 많은 CG20(75 vol.%)의 경우에는 브러시와 슬립링의 표면에 윤활막이 지나치게 불균일하게 생성되어 표면의 굴곡을

만들게 되어 마찰계수는 낮아졌으나 진폭은 오히려 증가한 것으로 판단되며, 그에 따라 전압강하의 진폭도 증가하여 신호 진동의 세기가 증가된 것으로 판단된다.

3-3. 수직항력에 따른 마찰계수와 에너지 손실의 크기

수직항력에 따른 마찰 계수와 에너지 손실의 변화를 고찰하기 위해 전류세기는 1A 로 고정시키고, 수직항력을 140, 170, 200gf 로 변화시켜 가며 30rpm 의 속도에서 60 초 동안 끌기 시험을 시행하였다.

수직 항력의 증가에 따른 마찰 계수와 에너지 손실의 변화를 Fig. 15,16 에 나타내었다.

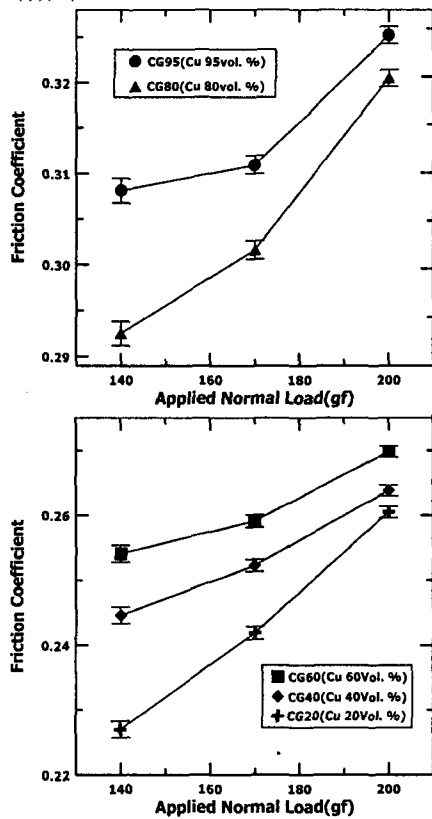


Fig. 15. Friction coefficient as a function of applied loads.

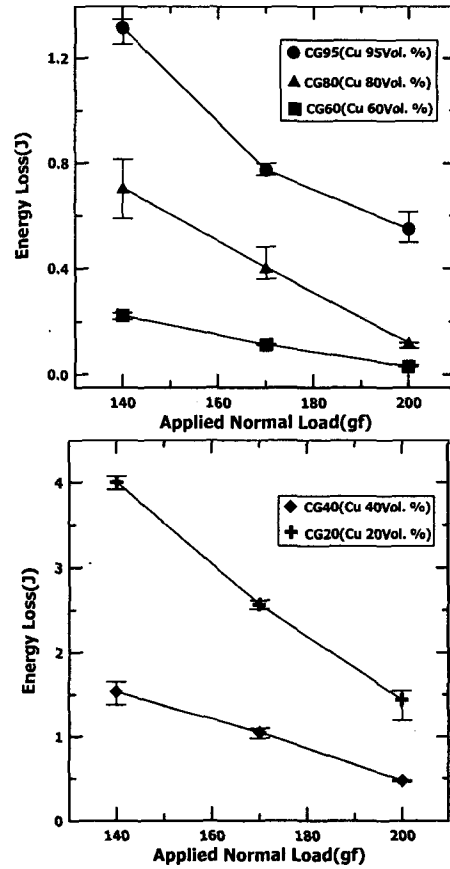


Fig. 16. Energy loss as a function of applied normal loads.

모든 시편의 경우 수직 항력이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 것이 관찰 되었다. 이러한 현상은 수직항력이 증가하게 되면 계면에서 끌기 방향으로의 전단 강도가 증가하고, 구리간 접촉(copper-to-copper contact)이 증가하게 되므로 마찰력이 증가하였기 때문에 일어나는 것으로 판단된다 [7]. 또한, 수직항력이 증가하게 되면 전기 신호 전송 시 에너지 손실이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 수직항력이 증가함에 따라 슬립링과 브러시의 마찰계면에서의 실제 접촉 면적이 넓어지고, 구리간 접촉

이 증가하여 수축저항이 줄어들었기 때문으로 사료된다[8].

수직항력의 증가에 따른 마찰계수와 전압강하의 진폭을 Fig. 17, 18 에 나타내었다.

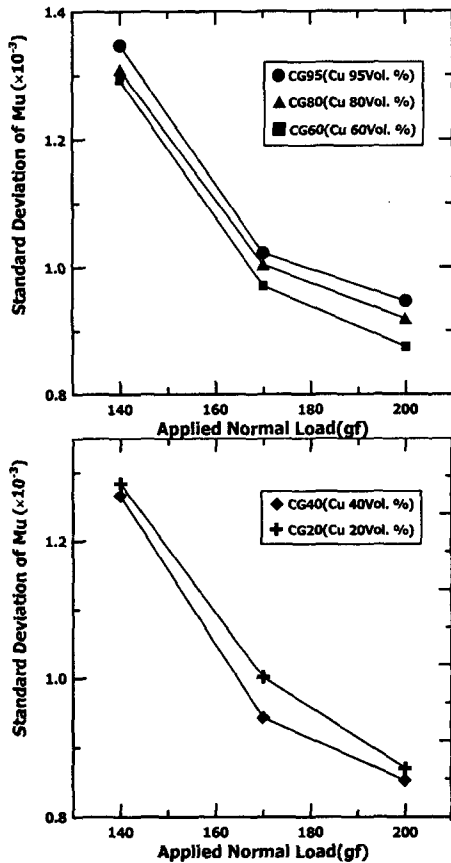


Fig. 17. Standard deviation of friction coefficient as a function of applied loads.

수직 항력이 증가함에 따라서 마찰계수의 진폭은 감소하였다. 이는 수직 항력이 증가하게 되면 슬립링과 브러시의 마찰계면에서의 실제 접촉 면적이 증가하므로 접촉의 안정화가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 마찰 계수의 진폭이 수직 항력에 따라 감소하므로 전압강하의 진폭 또한 감소하였다(Fig. 18).

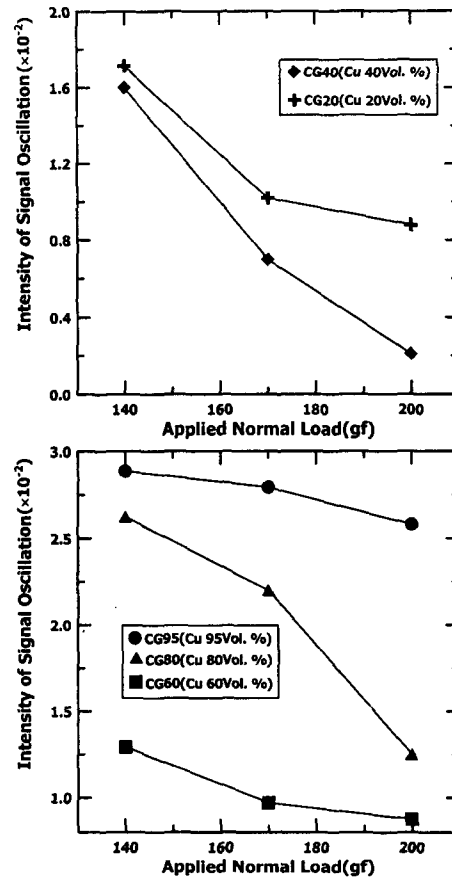


Fig. 18. Intensity of signal distortion as a function of applied loads.

4. 결론

Plunger brush 형태의 슬립링-브러시 어셈블리를 사용하여 전기적 접촉 시의 마찰 특성 및 전기 신호 전달 특성을 고찰하였다. 고체 윤활제인 흑연의 함량이 증가함에 따라 슬립링과 브러시 계면에서의 마찰계수는 감소하였으나 전기 신호 전달 시 에너지 손실은 흑연의 함량이 35vol.%인 브러시가 가장 낮은 값을 나타내었다. 또한, 마찰 계수의 진폭이 감소함에 따라 브러시의 신호 전달 거동 또한 안정화 되어 갔으며, 흑연의 함량이 55vol.%인 브러시가 가장

안정적인 전기 신호 전달 거동을 나타내었다. 수직항력이 증가함에 따라서 마찰 계수는 증가하였으나 에너지 손실은 감소하였고, 마찰 계수와 전압강하의 진폭 또한 감소하였다.

후 기

본 연구는 1998 년도 한국 과학 재단 지원 특정 기초 연구(과제 번호: 98-0200-02-01-3)에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. T.R.Thomas, Rough Surfaces, Longman, New York, 1982.
2. J.A.Greenwood, J.B.P Williamson, Contact of Nominally Flat Surfaces, Proc Roy Soc A, New York, 1966.
3. R.Holm, Electrical Contacts : Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1976.
4. P.G.Slade, Electrical Contacts: Principles and Applications, Marcel Dekker, New York, 1999.
5. E.I.Shobert, Carbon Brushes: The Physics and Chemistry of Sliding Contacts, Chemical Publishing Company, New York, 1965.
6. E.Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, J.Wiley and Sons, INC, New York, 1995.
7. 이정주, “자동차용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제의 변화에 따른 제동 특성에 관한 연구”, 고려 대학교 석사 학위 논문, 1998.
8. 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.