

## 기계구동 부재의 마찰특성에 미치는 전류의 영향

전성재<sup>†</sup> · 조연상 · 박흥식<sup>\*‡</sup>

동아대학교 기계공학과 대학원, \*동아대학교 기계산업시스템공학부

### Effect of Electric Current on Friction Characteristics of Machine Driving Elements

Sung-Jae Jun<sup>†</sup>, Yon-Sang Cho and Heung-Sik Park<sup>\*‡</sup>

Graduate School, Dong-A University

\*Faculty of Mechanical & Industrial System Engineering, Dong-A University

**Abstract** – Whenever moving surfaces of machine driving elements interact in air and lubricating oil, oxidization film on the surfaces are generated. It is effect to prevent friction and wear on contact area. Since the electronic current progress the oxidization of metal, if the electronic flow be regulated, the thickness of oxidization film can be regulated and friction characteristics can be improved. But the electronic current can deteriorate friction characteristics, so various characteristics must be investigated on transforming of electronic current. Therefor, using the Norton equation in this study, short current were transformed between frictional materials using ball on disk type tester. It was studied on effect of electronic current for friction characteristics.

**Key words** – friction characteristics, oxidization film, electronic current, friction coefficient.

#### 1. 서 론

일반적으로 혼합윤활 및 경계윤활 상태에서 작동하는 마찰면 사이에 전류를 발생시키는 것에 의하여 표면막 형성, running-in 과정을 비롯하여 마찰마멸 특성에 영향을 준다는 것은 이미 보고되고 있다[1]. 특히 기계구동부를 구성하는 운동부재는 상호 접촉하여 작동하기 때문에 양 마찰재료 사이에서 발생할 수 있는 seizure를 방지하기 위한 목적으로 상호 융합이 가능한 적은 재료들의 조합이 많이 이용되고 있다. 이처럼 상호 융합이 적은 재료를 사용하게 될 경우 양 마찰재료 사이에는 접촉 전위차의 발생 및 마찰면 온도 상승에 수반하는 열기전력 등에 의하여 마찰면 사이의 전자상태는 복잡하게 된다[2,3].

이 결과로 상호 윤활마찰 운동하는 마찰면 사이에서 발생하는 전위차 및 온도상승에 의하여 윤활유 중의 계

면 활성물질이 표면에 흡착하여 마찰면에는 흡착층이 형성되고, 이 흡착층은 두 마찰표면의 직접접촉을 방해하여 마찰과 마멸을 저하시키는 작용을 하게 된다.

윤활유 중에서의 마찰면에 생성되는 흡착층은 접촉부의 열기전력과 접촉 압력에 의해 발생하는 산화물에 의하여 크게 영향을 받는다는 것은 잘 알려진 현상이다. 산화현상은 양 마찰재료 원자간의 전자기동에 의해서 진행된다는 것을 고려하여 이동하는 전자의 양을 조절할 수 있다면, 산화물 생성의 조절이 가능하게 되며, 이를 통하여 마찰·마멸특성의 개선이 가능하게 된다. 즉, 산화현상이 물질 원자간의 전자기동에 의해서 일어나는 점을 이용하여 물질사이에 흐르는 전류량을 적절히 변화시키면 산화정도의 조절에 의하여 흡착층의 생성 조절이 가능할 것으로 생각된다.

그러나 마찰면에 전류를 발생시키는 것에 의하여 마찰·마멸 특성을 개선할 수 있는 가능성은 있지만 이들의 상세한 내용은 아직 불명확한 것이 많다. 또한 윤활 마찰면에 전기에너지를 부가시키면 역으로 마찰·마멸특성을 악화시키는 경우[4-7]도 있기 때문에 전류

<sup>†</sup>주저자 : pauljun@smail.donga.ac.kr

<sup>‡</sup>책임저자 : parkhs@mail.donga.ac.kr

량의 변화에 따른 마찰특성의 변화를 조사할 필요가 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 각종 기계부품으로 가장 널리 사용되는 기계구조용 강인 SM45C를 이용하고, Norton 전류식을 사용하여 전류 변화에 따른 다양한 마찰 조건들을 ball on disk 형의 마찰·마멸 실험을 통하여 전류의 변화가 마찰특성에 미치는 영향을 조사하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1. 윤활마찰 및 마멸실험

본 실험에서 사용한 시험기는 정전류 상태에서의 윤활마찰·마멸시험기로서 접촉부 형상은 ball on disk 형으로 이를 Fig. 1에 나타내었다.

윤활 마찰·마멸실험은 디스크 시험편에 불을 접촉시켜 가압하는 형식으로 여기에 사용된 불은 직경

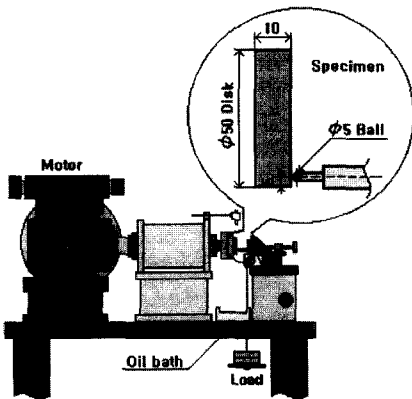


Fig. 1. Schematic diagram of ball on disk type tester.

Table 1. Physical properties of lubricant

비 중 (15/4°C)	0.8732	
인화점 (COC, °C)	222	
유동점 (°C)	-40 이하	
동점도	40 (°C)	47.29
	100 (°C)	8.671
점도지수	164	
전산가 (mq KOH/g)	0.45	
색상 (ASTM D-1500)	0.5	
방청성능시험 (ASTM D-665)	PASS	
기포성시험	PASS	
동판부식시험 (100°C/3 hr)	La	

5.0 mm의 고탄소 크롬베어링 강구인 STB2(Hv 760)를, 디스크 시험편으로는 직경 50 mm, 두께 10 mm로 가공한 기계구조용강 SM45C를 사용하였다. 실험 전 디스크 시험편은 emery paper #1200으로 표면조도를 0.2 μm Rmax로 일정하게 정밀 연마하여 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 유압구동유를 사용하였으며, Table 1에 이의 성상을 나타내었다.

윤활실험은 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 silicon 관을 통하여 양 시험편 접촉점에 공급하였다. 실험조건으로 미끄럼 속도는 7.23 mm/s로 일정하게 회전하는 디스크 시험편에 작용하중을 3 kg, 5 kg, 7 kg 및 9 kg으로 단계별로 변화시켰고, 총 미끄럼거리는 0~78 m(총 실험시간 3 시간)로 설정하여 실험을 행하였다.

### 2-2. 전류량 변화

본 실험에서의 마찰·마멸 실험은 경계윤활 또는 혼합윤활 상태에서, 일반적인 윤활유 중에서의 유체윤활 실험과는 달리 접촉부에서 발생하는 압력과 온도에 의해 전자를 잃는 과정들이 반복되면서 산화가 진행된다.

마찰실험에서 양 마찰재료가 접촉하는 접촉부에 전류를 흘려주게 되면 전자의 이동이 많아지기 때문에 보다 신속하고 간단하게 산화반응을 촉진시켜 산화흡착물을 얻을 수 있으며, 이 경우 흐르는 전류의 양을 조절하게 되면 산화물의 생성정도를 조절할 수 있을 것으로 생각된다. 이처럼 접촉부에 흐르는 전류량을 조절하기 위해서는 전압인가 장치에서 저항(R)의 변화를 통하여 산화흡착물의 생성정도를 조절하는 것이 가능하게 된다.

본 실험에서 전류를 가하기 위해서 사용한 전압인가 장치의 회로도들 Fig. 2에 간략히 나타내었다. 이 경우 양호한 마찰특성을 얻기 위해서는 디스크 표면에 산화

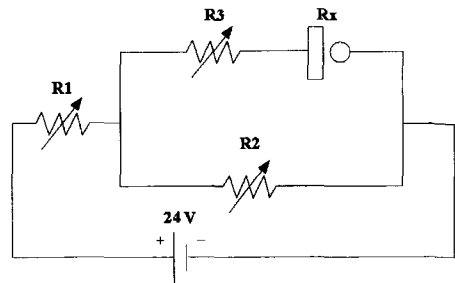


Fig. 2. Electric circuit for external voltage.

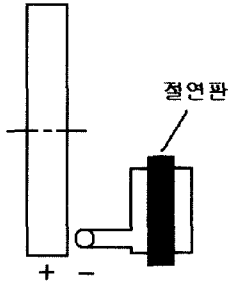


Fig. 3. Insulated unit of ball.

흡착물을 형성하도록 디스크 시험편이 anode(양극)이 되는 방향으로 전류가 흐르도록 하였다. 또한, 시험기에서 접촉부의 저항인  $R_3$ 는 단락되어 있는 상태에서 Norton 전류식을 이용하여  $R_3$ 를 계산하기 때문에 이를 위하여 Fig. 3에서 처럼 볼 시험편의 지지부 뒤에 절연판을 부착하여, 볼과 디스크를 완전 절연시켰다. 여기서 저항( $R$ )은 저항값의 조절이 가능한 가변저항들이다. 이러한 저항값들은 Norton 전류계산식에 의해 저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 의 값들을 계산하였으며, 계산에 사용된 Norton 전류계산 식(8)은 다음과 같다.

$$R_3 = \frac{u_s}{i_N} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

여기서,  $R_3$ 는 접촉부 저항,  $u_s$ 는 인가전압(12 V)이며,  $R_1$ ,  $R_2$  및  $R_3$ 는 저항,  $i_N$ 은 접촉부에 흐르는 전류값이다.

본 실험에서 설정한 초기전압( $u_s$ )은 24 V로 고정하였고, Norton 전류계산식을 사용하여 계산된 가변저항,  $R_1$ ,  $R_2$  및  $R_3$ 를 Digital multi tester를 사용하여  $R$  값들을 조절하였고, 이를 통해 접촉부( $R_3$ )에 흐르는 전류( $i_N$ )을 조절하였으며, 전류량은 1 mA, 3 mA, 5 mA, 7 mA 및 9 mA로 각각 변화시켜 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 마찰계수에 미치는 작용하중의 영향

Fig. 4에는 전류가 흐르지 않는 상태인 0 mA로 하고 미끄럼거리를 78 m로 한 경우 각 작용하중의 증가에 따른 마찰계수를 나타내었다. 작용하중이 증가함에 따라 마찰계수는 서서히 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 작용하중이 증가함에 따라

윤활유 분자가 전단응력의 영향을 받아 마찰방향으로 향하게 되고[8], 또한 마찰면의 온도상승으로 인하여

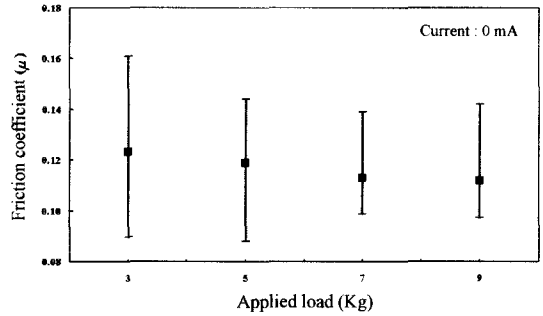


Fig. 4. Relation between friction coefficient and applied load.

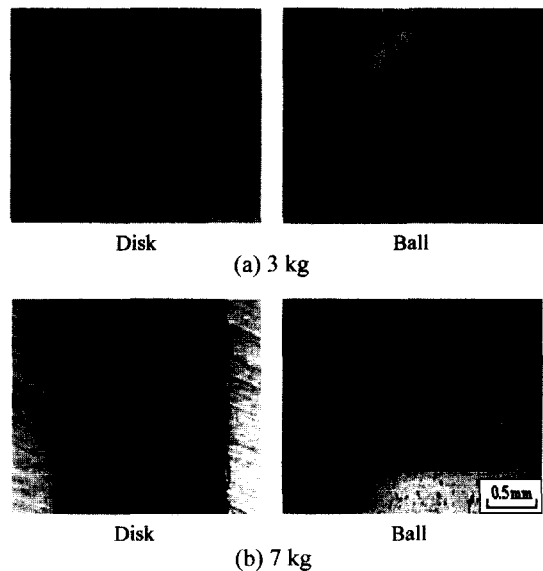


Fig. 5. Photo of the rubbed surface.

볼과 디스크의 접촉부에 급유되는 윤활유 점도가 저하하기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 0 mA에서 작용하중 (a) 3 kg, (b) 7 kg의 경우 디스크와 볼의 실험 종료 후의 마찰면을 나타낸 것으로, 작용하중에 관계없이 마찰면에는 산화물로 덮혀 있다는 것을 알 수 있다. 그림에서 (a) 3 kg의 디스크와 볼의 마찰면은 응착마멸과 부분적으로 abrasive 마멸이 진행된 것을 볼 수 있고, 특히 볼의 경우는 볼의 접촉부 외부에서도 깊은 abrasive 마멸이 진행된 것을 볼 수 있다. (b) 7 kg의 디스크와 볼의 마찰면은 3kg의 경우보다 마찰트랙의 폭도 크며, 디스크의 마찰면에는 응착에 의하여 표면층이 소성유동된 흔적을 볼 수 있지만 (a) 3 kg에서 나타나 있는 abrasive 마멸은

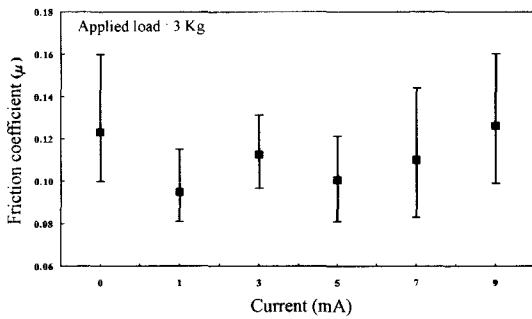


Fig. 6. Effect of current on friction coefficient for 3 kg.

훨씬 적게 나타나 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 볼의 경우는 주로 용착마멸이 주로 진행된 것을 알 수 있다.

3-2. 마찰계수에 미치는 전류의 영향

Fig. 6은 작용하중 3 kg, 미끄럼거리를 78 m로 한 경우 전류의 증가에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 마찰계수는 0 mA의 경우보다 전류를 1 mA로 한 경우가 가장 낮은 값을 가지며, 3 mA 이상에서는 미소하게 증가하며 9 mA가 되면 마찰계수가 거의 통전하지 않은 0 mA의 경우와 거의 유사한 값을 가진다는 것을 볼 수 있다. 특히 전류가 고 전류인 7 mA와 9 mA의 경우는 마찰계수의 상한값과 하한값의 변화폭이 저 전류 보다 변화 폭이 크다는 것을 알 수 있다.

전류가 마찰계수에 주는 영향에서, 전류는 디스크측에서 볼 측으로 흐르기 때문에 디스크측이 양극(anode)이 되고, 볼측이 음극(cathode)이 된다. 일반적으로 금속은 양극에서 산화되어 이온화가 되지만 무극성을 가지는 윤활유 중에서는 이온으로서 안정하게 존재할 수 없기 때문에 윤활유 중과 분위기 중에 존재하는 산소와 즉시로 반응하여 두께가 얇은 부동태막이 형성되어 [5], 이것이 마찰면을 덮어 산화흡착물이 생성된다. 이 산화흡착물은 마찰면간을 흐르는 전류뿐만 아니라 마멸분이 분위기 중의 산소와 반응하여 생성되지만 Fig. 5에서 처럼 통전하지 않을 때 생성되는 산화물은 통전에 의한 전기화학적 반응으로 생성되는 부동태막인 산화물에 비하여 파단되기 쉽다[5,8]. 따라서 결국 통전하지 않은 0 mA 경우 보다 1 mA의 전류로 통전하였을 때 마찰계수가 감소한 것은 양극이 되는 디스크측에 산화반응이, 음극인 볼측에는 환원반응이 생성되어 생성된 산화흡착물이 디스크 마찰면을 보호하는 역할을 하게 된다. 한편 볼측에도 산화물이 생성되지만 이

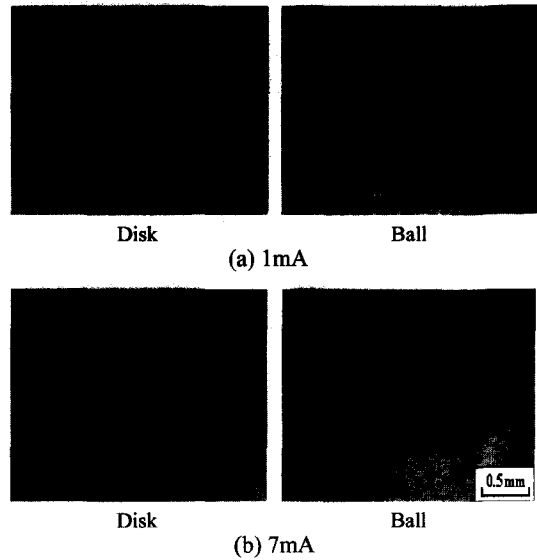


Fig. 7. Photos of the rubbed surface for 3 kg.

산화물은 부동태막이 아니기 때문에 마찰에 의하여 파단되기 쉽게 되며, 이로 인하여 실험결과 후의 볼측의 마찰면에는 금속광택을 나타내고 있었다. 그러나 전류가 더욱 증가하여 3 mA 이상이 되면 생성된 산화물의 두께가 증가하게 되고 생성된 산화물층의 전단저항이 증대하기 때문이다. 그리고 전류가 과대하여 7 mA 이상이 되면 마찰계수의 상한값과 하한값의 변동이 크게 되는 것은 생성된 두꺼운 산화물층이 미끄럼 방향으로 소성유동되면서 불규칙하게 생성 및 파단이 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 7은 3 kg에서 (a) 1 mA, (b) 7 mA의 경우 디스크와 볼의 실험 종료 후의 마찰면을 나타낸 것으로, 전류가 큰 (b) 7 mA가 (a) 1 mA 보다 디스크 마찰면에는 산화물층이 두껍게 덮혀 있으며, 볼의 경우에는 (b) 7 mA가 환원반응이 보다 진행되어 (a) 1 mA 보다 마멸면적이 크게 나타나 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 전류변화에 따른 마찰면을 조사하기 위하여 작용하중 3 kg의 경우 (a) 0 mA, (b) 1 mA, (c) 3 mA 및 (d) 7 mA로 통전하였을 때의 실험 종료 후 디스크 마찰면의 주사전자 현미경 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 0 mA 경우의 마찰면에는 용착마멸에 의하여 부분적으로 깊이 파인 홈과 abrasive 마멸에 의한 가늘고 긴 마멸분이 혼재하여 존재하는 것을 볼 수 있지만, 통전한 (b) 1 mA 경우는 산화흡착물이 전 마찰면 표면을 덮고 있다. 그리고 (c) 3 mA 경우는

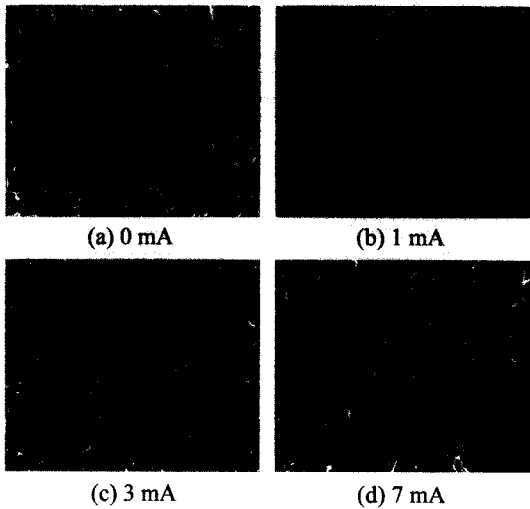


Fig. 8. Photos of the rubbed surface for 3 kg.

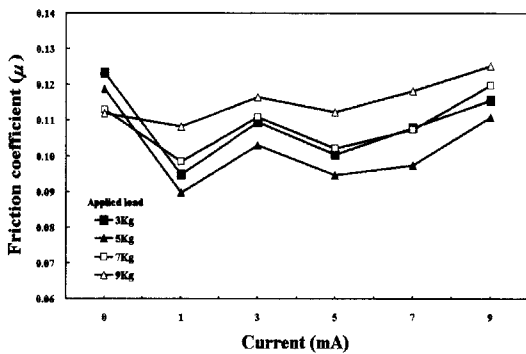


Fig. 9. Relation between friction coefficient and current.

생성된 산화물층이 마찰방향으로 소성유동하여 파단이 일어나며, 전류가 (d) 7 mA에서는 소성유동 폭이 크게 넓어지면서 파단이 더욱 진행되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 마찰면에 전류의 흐름이 크게 되면 오히려 마찰특성을 악화시키는 결과를 초래하므로 마찰특성을 개선하기 위한 전류의 한계값이 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 작용하중별로 전류의 증가에 따른 마찰계수의 평균값의 변화를 나타내었다. 그림에서 보면 Fig. 4의 0 mA의 경우와 유사하게 작용하중이 3 kg 보다 5 kg의 마찰계수는 작용하중과 전류의 증가와 함께 대체로 감소하지만 작용하중이 7 kg과 9 kg의 마찰계수는 저하중인 3 kg 보다 유사하거나 오히려 큰 값을 가진다는 것을 볼 수 있다. 이것은 0 mA의 경우와 반대로 작용하중이 증가하면 통전에 의하여 생성된 산화물

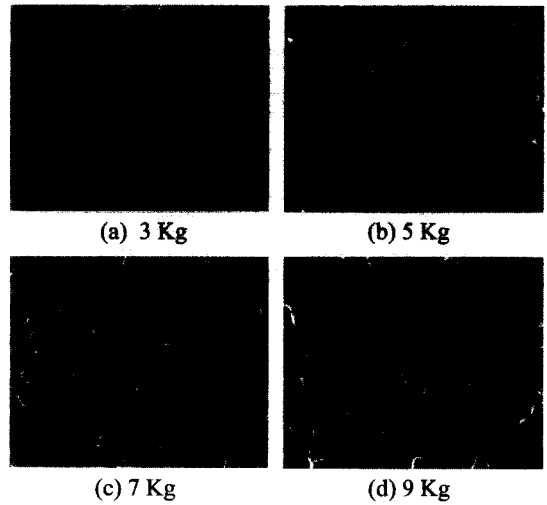


Fig. 10. Photos of the rubbed surface for 1 mA.

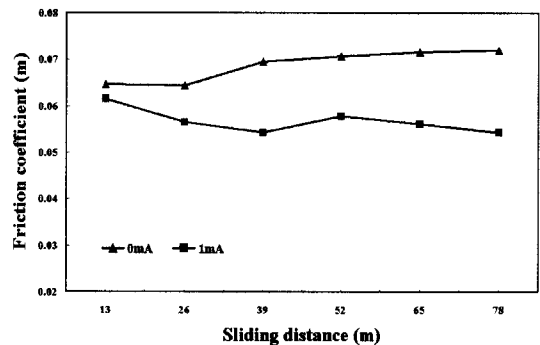


Fig. 11. Effect of sliding distance on friction coefficient for 3 kg.

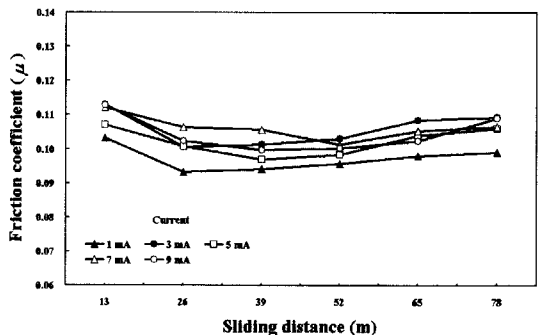


Fig. 12. Relation between friction coefficient and sliding distance for 7 kg.

층이 미끄럼 방향으로 이 산화물층의 소성유동에 따른 저항이 작용하여 마찰계수의 변화 폭이 크게 나타난

결과라고 생각된다.

Fig. 10은 통전의 효과가 큰 1 mA의 경우, 작용하중 (a) 3 kg, (b) 5 kg, (c) 7 kg 및 (d) 9 kg에서의 마찰면을 나타낸 것이다. 그림에서 작용하중이 (a) 3 kg과 (b) 5 kg의 경우는 산화흡착물이 마찰면에 덮혀 있지만 작용하중이 증가하여 (a) 7 kg와 (b) 9 kg의 경우는 생성된 산화물층의 소성유동이 크게 진행되어 이것이 미끄럼 방향으로 파단된 흔적을 볼 수 있다.

### 3-3. 미끄럼거리에 따른 마찰계수

Fig. 11에는 작용하중 3 kg에서 전류 0 mA와 1 mA의 조건에서 미끄럼거리 0~78 m까지의 마찰계수 변화를 나타내었다. 그림에서 1 mA의 마찰계수가 0 mA보다 미끄럼거리가 증가하여도 전체적으로 저하하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전체의 미끄럼거리에서 통전의 영향이 나타나는 것을 알 수 있으며, 또한 1 mA의 미소전류 만으로도 마찰특성 개선이 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험에 사용한 장치가 간단하다는 것을 감안하면 현재 산업현장에 사용되고 있는 기계구동 부재에도 간단한 전류장치만을 부착함으로써 마찰특성의 개선이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 작용하중이 7 kg일 때 미끄럼거리의 증가에 따른 각 전류별 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 미끄럼거리가 증가함에 따라 마찰계수는 대체로 감소하다가 다시 지속적으로 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 통전에 의하여 생성된 산화흡착물이 미끄럼거리가 증가함에 따라 마찰면의 온도상승에 의하여 흡착물의 생성과 파단이 계속 진행되어 마찰계수의 상한값과 하한값의 범위가 크게 변하기 때문이라고 생각된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 윤활유 중에서 운동하는 구동시스템에서 마찰특성의 개선을 위한 전류의 영향을 알기 위하여 ball on disk 윤활 마찰시험기를 통하여 여러 작용하중 조건하에서 전류를 0 mA~9 mA까지 변화시켜 마찰계수와 마찰면을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 통전하지 않을 경우 작용하중의 증가와 함께 마찰계수는 감소한다.
2. 산화흡착물의 영향으로 1 mA에서 마찰특성이 향상되지만 7 mA 이상의 과대 전류가 흐르게 되면 오히려 산화흡착물의 소성유동에 의한 파단을 촉진시켜 마찰계수는 증가한다.
3. 통전의 경우에도 작용하중이 7 kg 이상이 되면 산화물층의 소성유동 저항이 작용하여 마찰계수는 증가한다.
4. 미끄럼거리가 증가하여도 통전의 효과는 유지되지만 마찰면 온도상승으로 마찰계수는 미소하게 증가한다.

## 참고문헌

1. S. N. Postnikov, "Electro-Physical and Electrochemical Phenomena in Friction, Cutting and Lubrication," Van Nostrand Reinhold, New York, 1978.
2. 山本雄二, "電場・磁場による摩擦・摩耗のアクティブ制御," 트라이보로지스트, 第38卷, 第8호, pp.678-684, 1993.
3. 小野文慈, 山本雄二, "摩擦・摩耗に及ぼす印加電場の影響," 트라이보로지스트, pp.837-840, 1994.
4. 小野文慈, 山本雄二, "電壓印加によるなじみの改善(第3)," 트라이보로지스트, pp.389-392, 1993.
5. 山本雄二, 八木雄一, 日垣秀彦, "摩擦・摩耗特性に及ぼす電場印加の影響," 日本機械學會論文集(C), 第57卷, 第540호, pp.2734-2739, 1991.
6. 竹内彰敏, 佐藤光正, "通電下の摩擦・摩耗特性," 트라이보로지스트, 第43卷, 第11호, pp.987-994, 1998.
7. H. Prashad, "Effect of Operating Parameters on the Threshold Voltages and Impedance Response of Non-Insulated Rolling Element Bearings under Action of Electrical Currents," Wear, 117, pp.223-240, 1987.
8. A. Takeuchi, M. Satou and H. Aoki, "Effect of Electric Current on Advance of Running-in," Tribologist, Vol.35, No.12, pp.878-883, 1990.
9. 杉田康司, "滑り接觸における潤滑油の油膜形成能力に関する研究," 日本修士論文, pp.223-240, 1994.
10. Rizzoni and Giorgio, "Principles and applications of electrical engineering," 2nd ed., IRWIN, pp.35-125, 1996.