

## 윤활하에서의 마찰 특성에 미치는 전류의 영향

전성제\*, 강인혁, 류미라, 조연상(동아대 대학원), 박홍식(동아대)

### Effect of Electric Current on Friction of Hydraulic Members

S. J. Jun\*, I. H. Kang, M. R. Lyu, Y. S. Cho, H. S. Park

**Abstract** - Generally, Oxidization film are generated by friction and wear in lubricant oil. It is effect that the heat and pressure act on contact area. Because the electrons movement progress the oxidization, if the electrons movement be regulated, the thickness of oxidization film can be regulated and friction characteristics can be improved. But electronic current can deteriorate friction characteristics, so various characteristics must be investigated on transforming of electronic current. Therefor, using the Norton equation, short current were transformed between ball and disk. Also, an experiment was carried out using ball on disk type tester. So, we studied up on effect of current for friction characteristics.

**Key Words** : Friction characteristics(마찰특성), Oxidization film(산화막), Electronic current(전류), Friction coefficient(마찰계수)

#### 1. 서론

일반적으로 유압구동부를 구성하는 구동부재는 상호 접촉하여 구동하기 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.<sup>(1-3)</sup>

이러한 마찰면 사이에서 발생하는 전위차 및 온도상승에 의하여 윤활유중의 계면 활성 물질이 표면에 흡착하여 마찰면에는 경계층이 형성되며, 이 경계층은 두 마찰표면의 직접접촉을 방해하여 마찰과 마멸을 저하시킨다.

이처럼 윤활유 중에서의 마찰·마멸 현상은 마찰표면의 경계층이 접촉부의 열기전력과 접촉 압력에 의해 발생하는 산화층에 의하여 크게 영향을 받는다는 것은 잘 알려진

현상이다. 산화는 양 마찰재료 원자간의 전자이동에 의해서 진행된다는 것을 고려하여 이동하는 전자의 양을 조절할 수 있다면, 산화막 생성정도의 조절이 가능하게 되며, 이를 통하여 마찰·마멸특성의 개선이 가능하게 된다.

즉, 산화현상이 물질 원자간의 전자이동에 의해서 일어나는 점을 이용하여 물질사이에 흐르는 전류량을 조절하면 산화정도의 조절에 의하여 경계층 생성의 조절이 가능할 것으로 생각된다.

그러나 마찰면에 전기에너지의 부가는 역으로 마찰·마멸특성을 악화시키는 경우도 있기 때문에 전류량의 변화에 따른 마찰특성의 변화를 조사할 필요가 있다.<sup>(4-7)</sup>

이를 위하여 본 연구에서는 유압 피스톤 로더로 널리 사용되는 기계구조용 강인 SM45C를 이용하고, Norton 전류식을 사용하여 전류 변화에 따른 다양한 조건들을 ball on disk 형의 마찰·마멸 실험장치에서의 실험을 통하여 전류의 변화가 마찰특성에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 윤활마찰·마멸실험

본 실험에서 사용한 시험기는 정전류하에서의 윤활마찰·마멸시험기로서 접촉부 형상은 ball on disk형으로 이를 Fig. 1에 나타내었다.

실험은 디스크에 볼을 접촉시켜 가압하는 형식이므로 여기에 사용된 볼 시험편은 직경 5.0 mm의 고탄소 크롬 베어링 강구인 STB2(Hv760)를, 디스크 시험편은 직경 50 mm, 두께 10 mm로 가공한 기계구조용강 SM45C를 사용하였다. 디스크 시험편은 emery paper #1200으로 표면조도를  $0.2\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 로 일정하게 정밀 연마하여 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 유압구동유를 사용하였으며, Table 1에 그 성상을 나타내었다.

윤활실험은 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 silicon 관를 통하여 양 시험편 접촉점에 공급하였다. 실험조건으로 미끄럼속도는 7.23 mm/s로 일정하게 회전하는 디스크 시험편에 사하중을 3 kg, 5 kg, 7 kg 및 9 kg으로 설정하였고, 미끄럼거리는 0~78m(3 시간)로 설정하여 실험을 행하였다.

마찰실험에서 마찰계수의 측정은 볼 시험편에 스트레인 게이지를 부착고, 이때 발생된 마찰력의 신호는 증폭기를 통하여 PC를 통하여 실시간으로 저장하였다.

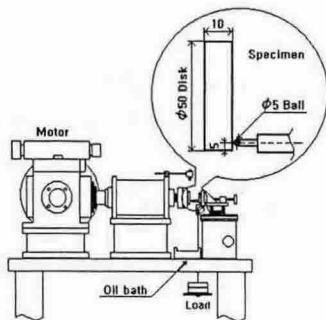


Fig 1. Schematic diagram of ball on disk type tester

Table 1. Physical properties of lubricant

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

### 2.2 전류량 변화

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

마찰실험에서 양 마찰재가 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.

이와 같이 접촉부에 흐르는 전류량을 조절하기 위해서는 전압인가 장치에서 저항 ( $R$ )을 조절 할 수 있어야 하며, 이를 통해서 산화흡착물의 생성정도를 조절하는 것이 가능하게 된다.

본 실험에서 전류를 가하기 위해서 사용한 전압인가 장치의 회로도를 Fig. 2에 간략히 나타내었다. 이 경우 양호한 마찰특성을 달성하기 위해서는 디스크 표면에 산화흡착물을 형성하도록 하기 위하여 디스크가 anode(양극)이 되는 방향으로 전류를 흐르도록 하였다.

또한, 시험기에서 접촉부의 저항인  $R_x$ 는 단락 되어있는 상태에서 Norton 전류식을 이용하여  $R_x$ 를 계산하기 때문에 이를 위하여, Fig. 3에 나타나는 것과 같이 볼 시험편의 지지부 뒤에 절연판을 부착하여, 볼과 디

스

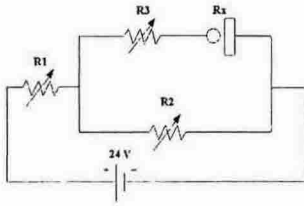


Fig. 2 전류인가 회로의 개요도

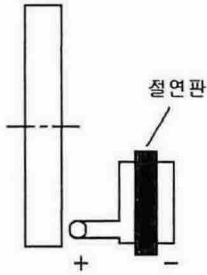


Fig. 3 Insulated unit of ball

크를 완전히 절연시켰다. 여기서 저항( $R$ ) 들은 저항값의 조절이 가능한 가변저항들이다. 이러한 저항값들은 Norton 전류계산식에 의해 저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 의 값들을 계산하였으며, 계산에 사용된 Norton 전류계산식<sup>(8)</sup>은 다음과 같다.

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

여기서,  $R_x$  는 접촉부 저항,  $v_s$  는 인가전압(12V),  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  는 저항,  $i_N$  는 접촉부에 흐르는 전류값이다.

본 실험에서 설정한 초기전압( $v_s$ )은 24V로 고정하였고, Norton 전류계산식을 사용하여 계산된 가변저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 를 Digital multi testor를 사용하여  $R$  값들을 조절하였고, 이를 통해 접촉부( $R_x$ )에 흐르는 전류( $i_N$ )을 조절하였으며, 전류량은 1mA, 3

mA, 5mA, 7mA 및 9mA로 각각 변화시켰다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 마찰계수에 미치는 작용하중의 영향

Fig. 4 에는 전류를 인가하지 않은 0mA로 하고 미끄럼거리를 78mm로 한 경우 각 작용하중의 증가에 따른 마찰계수를 나타내었다. 작용하중이 증가함에 따라 마찰계수는 서서히 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 작용하중이 증가함에 따라 볼과 디스크의 접

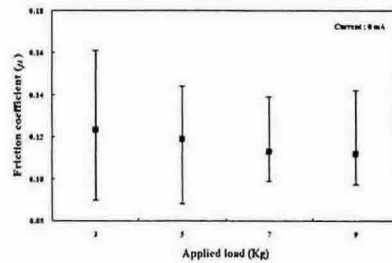
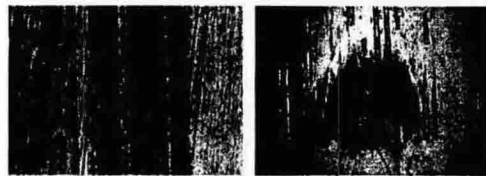
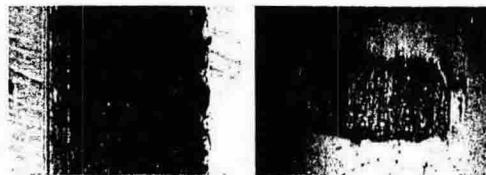


Fig. 4 Relation between applied load and friction coefficient



(a) 3 kg



(b) 7 kg

Fig. 5 Photo. of the rubbed surface. (a) 3 kg, (b) 7 kg

축부에 급유되는 윤활유 점도가 마찰면의 온도상승으로 인하여 마찰과정에서는 그 점도가 저하하며, 또한 윤활유 분자가 전단응력의 영향을 받아 전단방향으로 향하기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 0mA에서 작용하중 (a) 3kg, (b) 7kg의 경우 디스크와 볼의 마찰면을 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 3kg의 디스크와 볼의 마찰면은 부분적으로 abrasive 마멸이 진행된 흔적을 볼 수 있지만 (b) 7kg의 디스크와 볼의 마찰면은 마찰트랙의 폭도 크며, (a) 3kg의 abrasive 마멸은 거의 보이지 않고 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 마찰계수에 미치는 전류의 영향

Fig. 6은 작용하중 3kg, 미끄럼거리를 78m(통전시간 3시간)로 한 경우 전류의 증가에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 마찰계수는 0mA의 경우보다 전류를 1mA로 한 경우 그 감소 폭이 크며 5mA 이상에서는 미소하게 증가하며 9mA가 되면 마찰계수가 거의 통전하지 않은 0mA의 경우와 유사한 값을 가진다는 것을 볼 수 있다.

특히 전류가 고 전류인 7mA와 9mA의 경우는 마찰계수의 상한값과 하한값의 변화 폭이 저 전류보다 변화 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 전류가 마찰계수에 주는 영향에 대하여 생각해 보면 전류는 디스크측에서 볼측으로 흐르기 때문에 디스크측 마찰면이 anode(양극)이 되고, 볼측 마찰면이 cathode(음극)이 된다.

일반적으로 금속은 anode 부에서 산화되어 이온화가 되지만 무극성을 가지는 윤활유 중에서는 이온으로서 안정하게 존재할 수 없기 때문에 분위기 중에 존재하는 산소와 즉시 반응하여 산화물로 되어 이것이 마찰면을 덮어 산화흡착물을 형성하게 된다. 결국 0mA 경우 보다 1mA의 전류로 통전하였을 때 마찰계수가 크게 감소한 것은 anode가 되는 디스크측에 산화흡착물이 형성된 결과라고 생각된다. 그러나 전류가 더욱 증가하

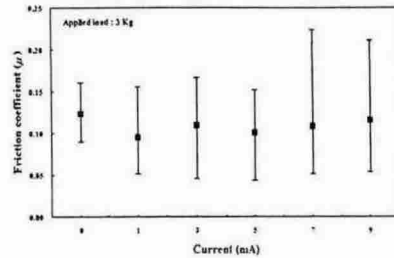


Fig. 6 Effect of current on friction coefficient for 3kg

여 3mA 이상이 되면 생성된 산화물의 두께가 증가하여 이것이 절연효과를 나타나 통전의 효과는 없게 되어 생성된 산화물층이 소성유동하여 파단되기 때문이다. 그리고 전류가 과대하여 7mA 이상이 되면 마찰계수의 상한값과 하한값의 변동이 크게 되는 것은 이러한 현상이 보다 가속화 된 결과라고 생각된다.

Fig. 7은 작용하중 3kg의 경우 (a) 0mA, (b) 1mA, (c) 3mA 및 (d) 7mA로 통전하였을 때의 마찰면의 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 0mA 경우의 마찰면에는 부분적으로 응착마멸과 abrasive 마멸이 혼재하여 존재하는 것을 볼 수 있지만 통전한 (b) 1mA 경우는 산화흡착물이 전 마찰면 표면을 덮고 있다. 그리고 (c) 3mA 경우는 abrasive 마멸과 생성된 산화물층이 소성유동하여 파단이 일어나며, 전류가 (d) 7mA에서는 이 파단이 더욱 가속화되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 과대한 전류는 오히려 마찰특성을 악화시키는 결과를 초래하므로 마찰특성을 개선하기 위한 전류의 한계값이 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 작용하중별로 전류의 증가에 따른 마찰계수의 평균값의 변화를 나타내었다. 그림에서 보면 Fig. 5의 0mA의 경우와 유사하게 작용하중이 3kg 보다 5kg의 마찰계수는 작용하중과 전류의 증가와 함께 대체로 감소하지만 작용하중이 7kg과 9kg의 경우는 작용하중이 증가함에 따라 마찰계수는 저하중인 3kg 보다 유사하거나 오히려 큰

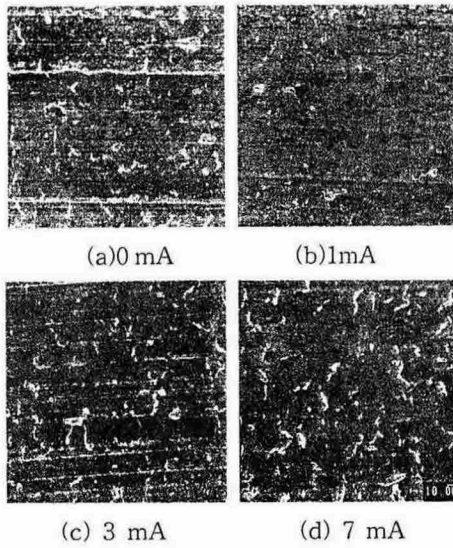


Fig. 7 Photo. of the rubbed surface for 3kg. (a) 0 mA, (b) 1 mA, (c) 3 mA, (d) 7 mA

값을 가진다는 것을 볼 수 있다. 이것은 0 mA의 경우와 반대로 작용하중이 증가하면 통전에 의하여 생성된 산화물층이 미끄럼 방향으로 이 산화물층의 소성유동에 따른 저항이 작용하여 마찰계수의 변화 폭이 크게 나타난 결과라고 생각된다.

Fig. 9는 통전의 효과가 큰 1 mA의 작용하중 (a) 3 kg, (b) 5 kg 에서의 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림에서 작용하중이 (a) 3 kg 과 (b) 5 kg의 경우는 산화물층이 마찰면에 덮혀 있지만 작용하중이 증가하여 (a) 7 kg와 (b) 9 kg의 경우는 생성된 산화물층의 소성유동이 크게 진행된 것을 볼 수 있다.

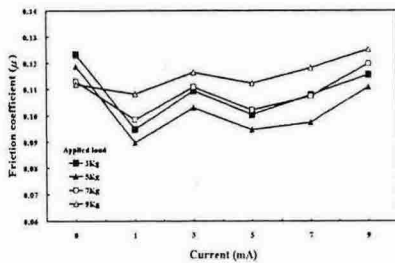


Fig. 8 Relation between of current and friction coefficient

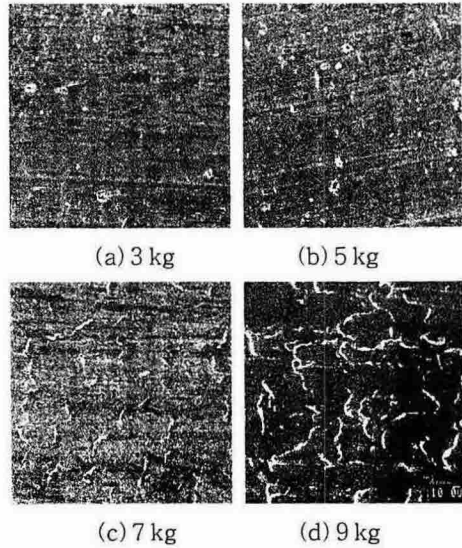


Fig. 9 Phtos. of the rubbed surface for 1mA (a) 3 kg (b) 5 kg (c) 7 kg (d) 9 kg

### 3.3 미끄럼거리에 따른 마찰계수

Fig. 10 에는 작용하중 3 kg에서 전류 0 mA와 전술한 통전의 효과가 큰 1 mA의 조

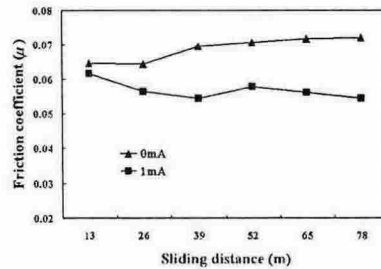


Fig. 10 Effect of sliding distance on friction coefficient for 3 kg

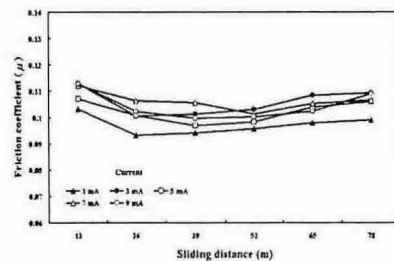


Fig. 11 Relation between sliding distance and friction coefficient for 7 kg

건에서 미끄럼거리 0~78m까지의 마찰계수 변화를 나타내었다. 그림에서 1mA의 마찰계수가 0mA보다 미끄럼거리가 증가하여도 전체적으로 저하하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전체의 미끄럼거리에서 통전의 영향이 나타나는 것을 알 수 있으며, 또한 1mA의 미소전류만으로도 마찰특성 개선이 가능하다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 실험에 사용한 장치가 간단하다는 것을 감안하면 현재 산업현장에 사용되고 있는 유압 구동제에도 간단한 전류장치만을 부착함으로써 마찰특성의 개선이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 작용하중이 5kg일 때 미끄럼거리의 증가에 따른 각 전류별 마찰계수 값의 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 실험에서는 ball on disk 마찰·마멸시험기에서 3, 5, 7 및 9kg의 작용하중에서 전류를 0mA~9mA까지 변화시키고, 미끄럼거리 0~78m까지에서 윤활 마찰·마멸시험을 행하여 전류의 변화에 따른 마찰계수를 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전류가 흐르지 않을 경우 작용하중의 증가와 함께 마찰계수는 감소한다.
2. 산화흡착물의 영향으로 1mA에서 마찰특성의 개선이 향상되지만 7mA 이상의 과대 전류가 흐르게 되면 오히려 산화흡착물의 파단을 촉진시켜 마찰계수는 증가한다.

3. 작용하중이 7kg 이상이 되면 산화물층의 소성유동 저항이 작용하여 마찰계수는 증가한다.
4. 미끄럼거리가 증가하여도 통전의 효과는 유지되지만 마찰면 온도상승으로 마찰계수는 미소하게 증가한다.

#### 참고문헌

1. Postnikov, S. N, 1978, "Electrophysical and Electrochemical Phenomena in Friction, Cutting and Lubrication", Van Nostrand Reinhold, New York.
2. 山本雄二, 1993, "電場・磁場による摩擦・摩耗のアクティブ制御", トライボロジースト, 第38卷, 第8号, pp.678-684.
3. 小野文慈, 山本雄二, 1994, "摩擦・磨耗に及ぼす印加電場の影響", トライボロジースト, pp. 837-840.
4. 小野文慈, 山本雄二, 1993, "電壓印加によるなじみの改善(第3)", トライボロジースト, pp.389-392.
5. 山本雄二, 八木雄一, 日垣秀彦, 1991, "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540号, p2734-2739.
6. 竹内彰敏, 佐藤光正, 1997, "通電下の摩擦摩耗特性", トライボロジースト, 第43卷, 第11号.
7. Har Prashad, 1987, "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.
8. Rizzoni and Giorgio, 1996, "Principles and applications of electrical engineering / Giorgio Rizzoni. -2nd ed.", IRWIN.