

## Vapor Phase Lubrication을 통한 금속의 마찰 및 마멸 특성

양지철 · 심인하 · 김대은\*<sup>†</sup>

연세대학교 기계공학과 대학원  
\*연세대학교 기계공학부

## Characteristics of Friction and Wear of Metals Under Vapor Phase Lubrication

Ji-Chul Yang, In-Ha Sung and Dae-Eun Kim\*<sup>†</sup>

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate school of Yonsei University  
\*Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract** – Vapor phase lubrication can be used as an alternative lubrication method to overcome the demerits of liquid and solid lubrications. In this work, the tribological characteristics of metals are investigated under vapor phase lubrication. It was found that the friction coefficient and wear volume can be controlled efficiently by the amount of vapor phase lubricant delivered to the sliding interface. The friction coefficient could be reduced to about 0.1 under vapor lubrication. Also, depending on the amount of vapor lubrication delivered to the system, the width of the wear track could be varied between 50 to 250  $\mu\text{m}$ . It is shown that vapor phase lubrication mechanism is very effective to control the friction and wear phenomena without the use of excessive oil.

**Keywords** – vapor phase lubrication, friction, wear, tribology.

### 1. 서 론

일반적으로 마찰이 발생하는 두 표면사이의 저항을 줄이기 위해서 기존의 경우에는 보통 고체 윤활제와 유체 윤활제를 사용하여왔다. 그러나, 고체 윤활제의 사용에서는 증착된 윤활막의 수명에 한계가 있고, 고압이나 고속인 경우에 문제가 발생하는 것으로 보고되어지고 있다[1]. 유체 윤활의 경우는 온도 상승에 따른 열적 안정성의 문제와 interface간의 높은 온도에 의한 과도한 sludge의 발생, 그리고 윤활유의 degradation 현상 등의 문제가 발생하게 된다[2]. 또한, 이러한 유체 윤활을 지속적으로 해주기 위한 순환 system이 필요한 경우, cooling system이나 filtering system이 부착되어져야 하는 문제가 있다.

이러한 기존의 lubrication 방법의 단점을 극복하기

위하여 vapor phase lubrication(이하 VPL)이 등장하게 되었는데, 그 기본mechanism은 기존의 윤활 방식을 탈피하여, 윤활을 하고자 하는 부분에 증기 상태의 윤활유를 지속적으로 공급함으로써, 오염의 원인인 윤활유의 사용량을 최소화시키며, 기존에 발생하는 윤활 문제를 해결하고자 하는 것으로 설명 될 수 있다.

VPL에 대한 연구는 1990년대에 들어서 본격적으로 이루어지기 시작했다. 이에 대해 주도적으로 연구해온 Hanyaloglyu[3,4]의 연구에 의하면, 고온의 표면이 요구되어지는 곳의 경우에는 높은 온도에 의해 액체나 고체 윤활 사용시에 많은 문제가 발생하게 되는데, 특히 steel 표면에 대한 연구를 통하여, steel 표면을 보호하기 위해 표면의 화학 반응성을 고려하여 TCP(Tricresyl Phosphate)를 윤활면에 VPL 상태로 전달함으로써 윤활 효과를 얻는 방법을 연구하였다.

Klaus[5]는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 로 pre-coating 된 고온의 steel 표면에 TCP를 vapor화 시켜 화학 반응에 의해 생성된

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : kimde@yonsei.ac.kr

윤활 표면을 연구하였으며, 한편 고온의 세라믹 표면에 대해서 hydrocarbon gas를 주입시켜 윤활막을 증착 시킴으로서 이에 따른 윤활 현상이 연구 발표되기도 하였다[6,7].

본 연구에서는 기존의 system 들이 사용하고 있는 고온·고압 표면에서의 화학적 흡착(chemisorption)[8]이 아닌 자연적인 유체의 vaporization 현상을 이용해서 VPL을 형성한 후 전달 기체(carrier gas)의 강제 유동에 의해 마찰면에 전달함으로써, 이에 따른 표면에서의 물리적 흡착(physisorption)에 의한 윤활막의 영향을 고찰하였다.

본 실험을 통해서 이와 같은 증착 mechanism에 의한 VPL 막이 실제로 정상적인 윤활의 역할을 할 수 있는지와, 최소한의 VPL 공급에 의한 마찰 및 마멸 현상의 변화를 확인하였으며, VPL 공급량의 control을 통한 마찰 제어의 가능성을 고찰하였다.

## 2. 실험 내용 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

상대 운동을 하는 마찰 표면에 윤활제를 VPL 상태로 공급하기 위해 밀폐된 플라스크 내에 윤활유를 넣고, electric heater를 사용하였다. 또한 발생하는 증기 상태의 윤활제가 사용하고자 하는 영역에 원활하게 공급되게 하기 위해 전달 기체로서 압축 공기를 이용하였다. 전달 기체는 VPL의 공급량 조절을 위해, 공급단에 밸브와 유량계를 설치하여 전달 기체의 양(cc)의 조절에 따라 VPL의 공급량이 조절되도록 하였으며, 실시간으로 그 양을 측정할 수 있게 하였다.

시료의 온도를 측정하기 위하여 적외선 온도 측정기

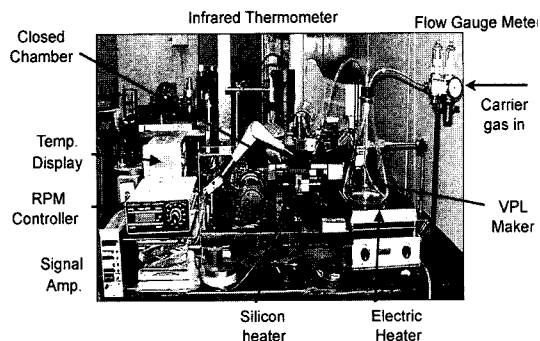


Fig. 1. Experimental set-up.

를 장착하였으며, 또한 증기 상태로 전달된 VPL이 시편 표면에서 급격하게 응축하여 액화되는 것을 막기 위하여, 20°C-230°C 범위로 조절 가능한 silicon rubber heater를 시편 하단에 부착하여 시편 표면의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. VPL이 공급되는 부위에서 VPL이 산란되는 것을 막기 위해 윤활 부위를 밀폐된 chamber내에 위치하도록 하였다.

본 실험의 목적인 VPL의 적용에 따른 마찰 및 마멸 현상의 파악을 위해, strain gage를 이용하여 마찰 계수를 측정할 수 있는 pin-on-reciprocator 방식의 직선 왕복운동의 마찰 실험 장치를 이용하여, 불과 plate 형태의 시편을 접촉시켜 상대 운동 시켰다. 실험 조건에 대한 자세한 정보는 Table 1에 정리하였다. 실험 조건은 선속도 0.04 m/s, 접촉 하중 100 gf(dead weight)으로 설정하였고, VPL을 위한 윤활제는 SAE 80 W/90으로 디젤 엔진에 사용되는 엔진 오일로서, 동점도(cSt)는 40°C/100°C에서 각각 137.5/333.4를 가지고 있으며, 인화점은 220°C인 특성을 가지고 있다. VPL의 형성을 위해 플라스크내의 온도는 80°C로 설정하여 자연스러운 증발 현상을 이용하여 증발 과정에서의 윤활제의 물성 변화를 최소화하였으며, 시편의 온도는 80°C로 설정하여 VPL이 증착 시에 급격한 상변화를 일으키지 않도록 설정하였다.

Table 1. Experimental details

	Tribo-tester	Ball-on-reciprocator
Load(dead weight)		100 gf
Sliding speed		0.04 m/s
Lubricant temp.(°C)		80
Plate temp.(°C)		80
Lubricant		내연기관용 엔진오일 SAE 80W/90
동점도 (cSt)(at 40/100°C)		137.5/333.4
점도 지수 (viscosity index)		110
인화점 (°C)		220

Table 2. Specification of specimens

	Material	Hardness (Hv)	Average Roughness (Ra, $\mu\text{m}$ )
Plate	Aluminum	180±10	0.5
	SUS304	280±20	0.12
	Silicon	600	0.003
	DLC	1160±20	0.004
Ball	STB2	700	0.06

다양한 재료에서의 VPL 효과를 살펴보기 위하여, Table 2와 같이 볼시편은 직경 5 mm의 STB2 ball을 사용하였고, plate 형태의 시편으로는 Aluminum, SUS 304, bare silicon, DLC 등을 이용하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3-1. VPL의 양에 따른 마멸 특성

VPL이 재료에 따른 마멸 특성에 미치는 영향을 보기 위하여, Aluminum과 SUS304에 대하여 VPL의 양에 따른 wear track을 평가하였다. VPL 양은 전달 기체량(cc)에 의해 조절하였다. 예를 들어 Fig. 2(b)의 100 cc는 분당 공급되는 전달 기체의 유량으로서 실험이 진행되는 동안 지속적으로 주입하였다. 또한 실험 시간은 모두 500초로 진행하였고, 모든 실험 조건은 Table 1과 같다. 기본적으로 윤활의 목적은 마멸량의 최소화이기 때문에, 마멸의 평가는 VPL의 tribological

특성 평가에 있어서 중요한 평가 요소이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 VPL의 양의 증가에 따른 Aluminum과 SUS304의 wear track의 광학 현미경 사진이다. 사진으로부터 연성 재질인 Aluminum의 경우 약 600 cc 부근에서는 wear track이 거의 발생하지 않는 반면, SUS의 경우는 약 400 cc에서 wear track이 거의 사라지는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 4는 VPL 양의 증가에 따른 wear track의 폭과 깊이를 surface profiler로 측정된 결과이다. Aluminum의 경우가 SUS304에 비해 VPL의 양의 증가에 따라 wear track의 폭 및 깊이가 더 심한 기울기를 가지고 감소하는 것을 알 수 있다. 상대적으로 경한 재질인 SUS의 경우 더 적은 양의 VPL에 의해 안정된 윤활 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 현상의 원인은 Al의 경우에는 연성 재질인 이유로 마멸이 상대적으로 심하게 일어나므로, 이에 따른 wear particle 생성과 접촉 표면적 증대에 의한 윤활 손실 효과가 큰

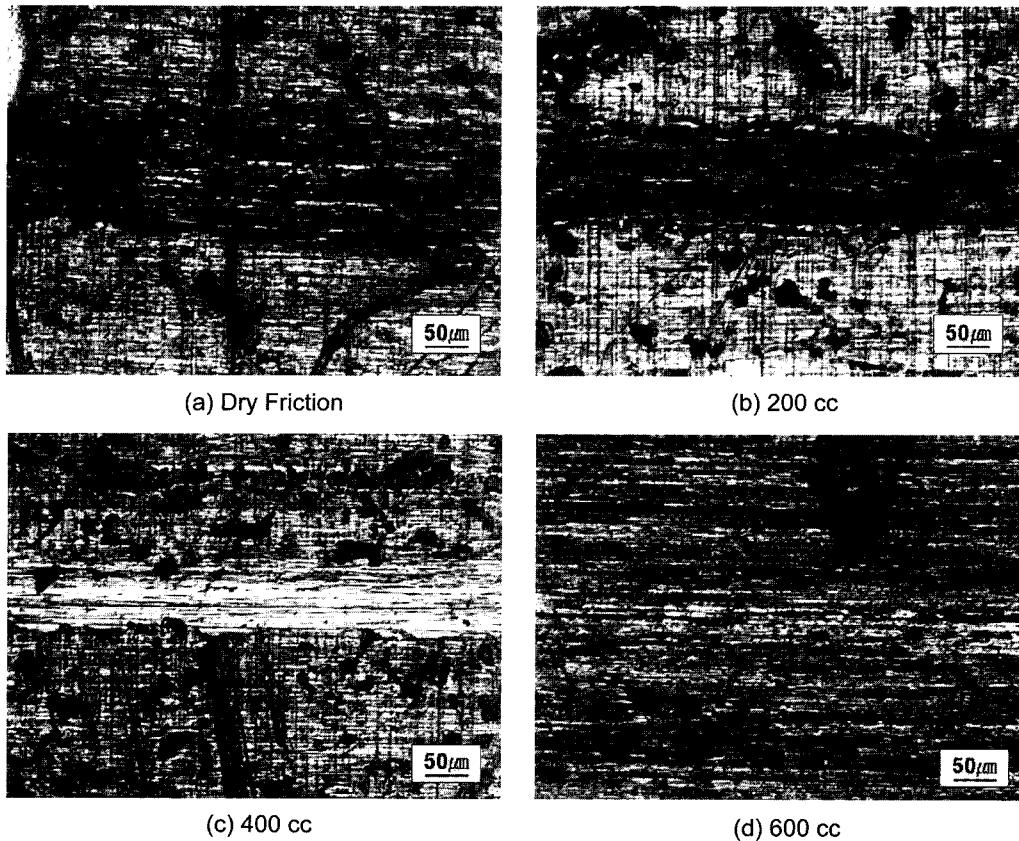


Fig. 2. Wear track of Aluminum with respect to VPL amount.

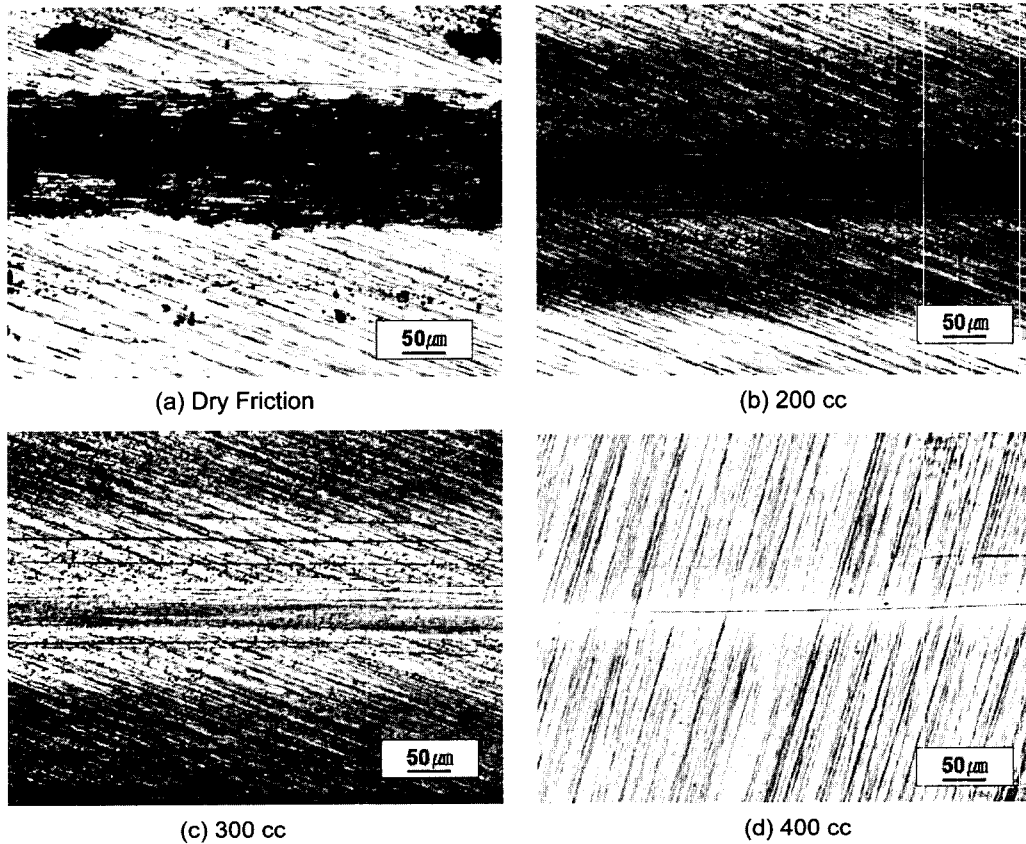


Fig. 3. Wear track of SUS304 with respect to VPL amount.

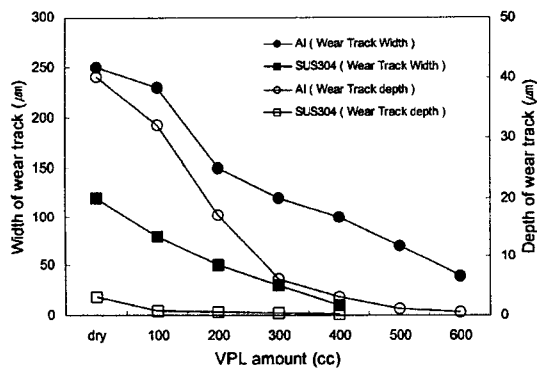


Fig. 4. Variation in width and depth of wear track with respect to VPL amount.

것으로 판단된다. 이에 비해 상대적으로 경도가 강한 SUS의 경우는 적은 양의 VPL로도 오랜 시간동안 윤활 효과가 유지 가능한 것으로 판단된다. 이상의 마멸 특성에 대한 고찰로부터, VPL에 의해 기존의 액체 상

태의 윤활제를 이용하는 것과 같은 정상적인 윤활 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, 마멸량의 조절이 가능하다는 것도 알 수 있었다.

### 3-2. VPL 적용에 따른 마찰 특성

Aluminum, SUS304, silicon, DLC 각각에 대해 VPL이 마찰 계수의 변화에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 5는 각 재료에 대해 VPL의 효과를 상대 비교하기 위하여 건식 마찰 실험 및 동일한 액체 윤활제에 의한 경계 윤활 실험을 실시하여 얻은 마찰 계수 선도이다. 실험에서 VPL의 양은 전달 기체 양에 의해 300 cc로 설정하였다.

실험 결과로부터, 모든 재질에 있어서 VPL과 유체 윤활에서의 마찰 계수가 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이러한 실험의 결과는 VPL이 정상적으로 윤활제로서의 역할을 할 수 있다는 것과, VPL량의 조절을 통해서 안정적인 윤활 효과를 가질 수 있다는 것을 보

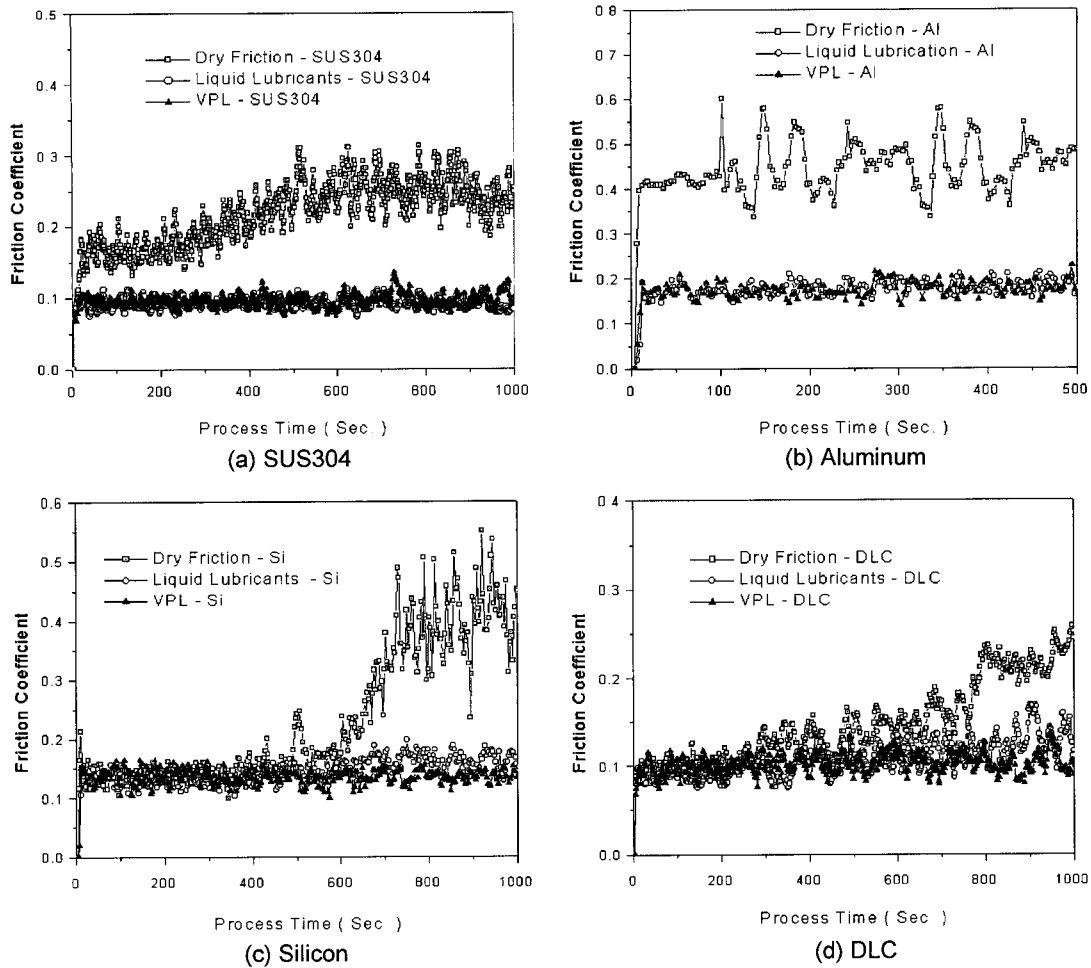


Fig. 5. Friction coefficient variation of various materials under different sliding conditions.

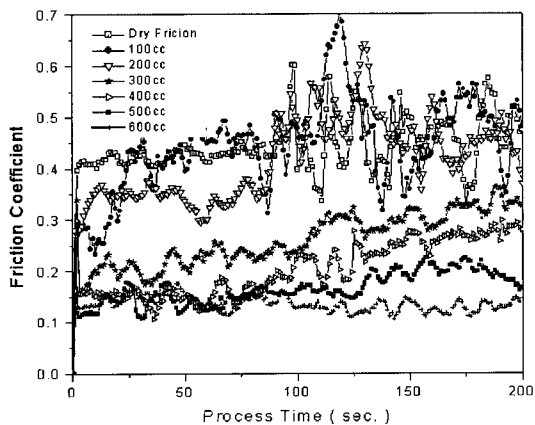


Fig. 6. Friction coefficient variation of Aluminum with respect to VPL amount.

여준다. 이러한 고찰로부터, VPL의 공급량 변화에 따른 마찰 계수의 변화를 살펴보았다.

Fig. 6,7은 각각 Al, SUS304에 대한 마찰 계수의 변화 그래프이다.

Fig. 6의 Al에 대한 결과에서, VPL의 양이 소량으로 공급되고 있는 부분에서는 마찰 초기부터 마찰 계수가 증가하는 것을 확인 할 수 있는데, 이렇게 지속적으로 진행되던 상황이 약 100초 부근에서 불규칙적으로 마찰계수의 fluctuation이 발생하여 불안정한 상태가 됨을 확인할 수 있었다. 이것은 소량의 윤활막이 본질적으로 파괴되어, 윤활 공급량이 부족함으로 인해 나타나는 윤활막 파괴 현상으로 이해 할 수 있으며, 200 cc의 정도까지는 그러한 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 점차 VPL의 양이 증가함에 따라,

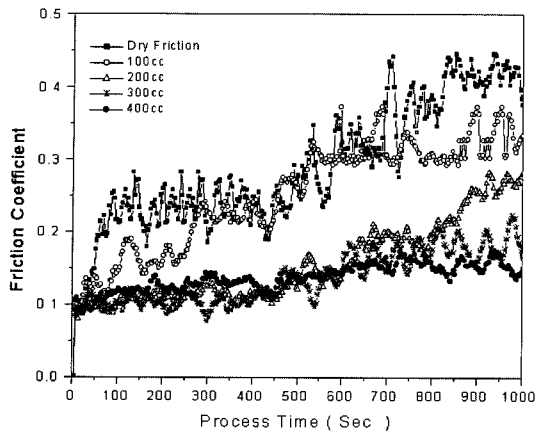


Fig. 7. Friction coefficient variation of SUS304 with respect to VPL amount.

초기의 급격한 마찰 계수의 증가 현상은 사라지는 것을 확인하였고, 마찰로 인한 system의 진동 현상 및 소음이 사라지면서, 전체적으로 안정된 미끄럼 접촉 상황을 유지할 수 있었다. 실험 결과 Aluminum의 경우에는 500 cc 이상에서는 안정된 마찰 계수의 확보가 가능한 것을 확인하였다.

반면 Fig. 7의 상대적으로 경한 재질인 SUS304의 마찰 계수 선도에서는, AI의 결과와 유사한 경향을 보이나 VPL의 양의 측면에선 서로 차이가 있음을 확인하였다. SUS의 경우에는 약 400 cc정도라도 안정된 마찰계수를 오래 유지할 수 있음을 확인 할 수 있었다. Wear track에 대한 고찰에서도 언급하였지만, 재질에 따른 VPL의 적정량은 마찰 실험 결과에서도 유사하게 나타남을 알 수 있으며, 경한 재료의 경우에 더 적은 양의 VPL로 안정된 마찰 계수를 유지할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

3-3. VPL을 통한 마찰 계수 제어

VPL의 적용으로 마찰 계수의 감소 및 마멸량 감소를 확인하였으며, 또한 재질에 따른 VPL 공급량의 data를 확보할 수 있었다. 따라서, 실시간으로 마찰 계수의 변화를 monitoring하면서 VPL의 양을 control 할 수 있다면, system에 최소한의 윤활제를 공급함으로써 가장 효과적인 윤활 형태를 이룰 수 있을 것이다. 공급된 윤활제가 마찰 표면에서 제거되는 시점에 다시 윤활제를 공급하고, 정상적인 윤활 작용을 확인한 후 다시 공급을 멈추는 system은 윤활 현상을 이용하는 모든 system에 가장 바람직한 개념의 윤활 방법일 것이다.

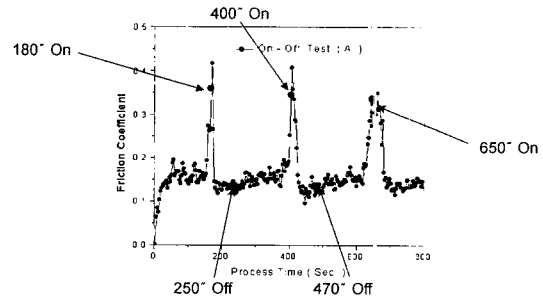


Fig. 8. Control of friction coefficient of Aluminum by VPL on-off method.

이러한 개념으로 마찰 계수가 증가하여 일정 수치이상으로 되면, VPL을 공급시킴으로써 마찰 계수를 저하시키는 VPL 공급에 대한 on-off 실험을 실시하였다.

먼저 Aluminum의 실험 결과는 Fig. 8과 같다. 안정적인 마찰 계수는 0.15로 설정하였으며, VPL의 공급량은 500 cc로 설정하고, 실험 시작 전에 약 100초간 VPL 공급을 실시하였다. 실험을 시작한 후, 약 170초 부근에서 급격히 마찰 계수가 증가하였으며, 이에 따라 VPL의 공급을 70초 동안 실시하였다. 이로 인해 안정적인 마찰 계수가 유지되던 것이 다시 불안정한 상태로 증가하였고, 400초에서 약 70초 동안 재공급하였다. 재공급으로 다시 안정적인 마찰 계수가 약 150초 가까이 유지되는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 9는 SUS304의 마찰 계수의 제어 실험 결과이다. 실험 과정은 VPL 공급량은 400 cc로 설정하고, 초기 상태의 100초간 VPL 공급을 실시하였고 운동 진행에 따라 마찰 계수가 증가하여 350초에서 재공급을 실시한 후 600초 동안 공급하였다. 이러한 공급에 의해 약 3000초 정도의 안정적인 마찰 계수를 유지하였고 이러한 반복적인 VPL 공급의 on-off를 통해 유사한 형태의 마찰계수의 변화를 확인 할 수 있었다.

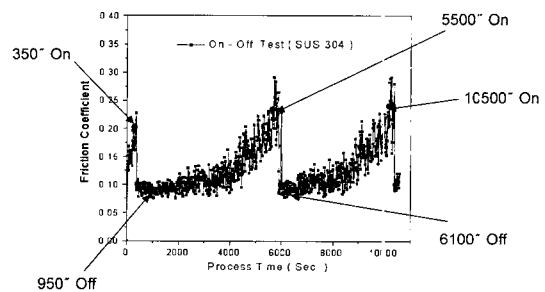


Fig. 9. Control of friction coefficient of SUS304 by VPL on-off method.

또한, Fig. 8, 9로부터 경한 재질과 연한 재질에서의 결과를 비교해 보면, 연성 재질의 경우는 마찰 계수의 상승이 급격하게 이루어지는 반면에 경한 재질의 경우에는 서서히 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상도 앞서 마멸 특성에 대한 고찰에서 언급한 것과 마찬가지로 윤활막의 제거 mechanism과 wear particle의 크기 및 거동과 관계가 있는 것으로 판단된다[9].

#### 4. 고찰

이번 실험을 통하여 각각의 material에 따른 최적의 VPL deposition 양이 존재할 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

이러한 현상은 deposition 되는 VPL의 성분과 material 간의 상호 작용 및 material 자체의 물성 차이에 의해 이루어지는 현상으로 생각되어 진다. 즉, 표면의 형상 및 표면 에너지 차이에 의해 interface 면에서의 VPL의 양적 차이가 material에 따라 존재할 수 있는 것이다. 또한, 경한 재질의 경우 연성 재질에 비해 마찰이 이루어짐에 따른 run-in으로 인한 접촉 면적 증대가 상대적으로 적은 이유에서, 적은 양의 VPL을 가지고도 효과적인 윤활을 할 수 있다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

또한, VPL의 양의 증가를 통한 마찰 및 마멸의 저감 효과를 구현 할 수 있다는 것이다. 재료에 따라 안정적인 미끄럼 접촉을 유지 할 수 있는 적절한 VPL 양이 있음이 파악되었으므로, 마찰계수와 마멸량을 적정값으로 정밀하게 제어하고자 하는 경우, 실제로 이러한 VPL량의 증감에 따른 마찰 마멸 특성 변화를 이용할 수 있다. 따라서 VPL은 그 응용 범위가 무척 넓다고 할 수 있다.

마지막으로 on-off에 의한 VPL 공급으로 마찰 제어가 가능하다. 기존에 사용하고 있는 system의 대부분은 일정량을 일정 시간에 공급한다든지 하는 open loop 개념의 윤활 방식이 대부분이었다. 그러나, 이번 실험을 통해서 VPL system은 closed loop 개념으로 마찰 제어가 가능함을 확인하였다. 마찰 계수의 변화 발생 시 VPL 공급을 조절함으로써, 효과적인 윤활 시스템을 구성할 수 있다. Monitoring system과 system algorithm에 의해서 tribo-system의 마찰 및 마멸 특성을 적정 상태로 유지할 수 있는 윤활 system의 구성이 가능할 것이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 VPL에 대하여 여러 가지 조건에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경계 윤활과 VPL 윤활 사이의 마찰 계수는 거의 유사하게 나타난다.
2. VPL의 양의 증가는 마멸량을 감소시키며, 또한 마찰 계수의 안정화 및 저감 효과에도 직접적인 영향이 있다.
3. VPL의 작동을 조절함으로써, 마찰 계수를 제어할 수 있다.

이러한 결론을 바탕으로 볼 때, vapor phase lubrication 방법을 통해 최소한의 윤활제의 양으로 마멸 현상을 억제시킬 수 있고, 마찰 제어가 가능한 것으로 확인되었다. 이러한 실험 결과는 향후 효과적이고 새로운 윤활 시스템으로서 vapor phase lubrication이 사용 가능함을 제시한다는 점에서 의미가 있다.

#### 후기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어개발사업 중 “지능형마이크로시스템개발사업단”의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

#### 참고문헌

1. E. R. Booser, *CRC Handbook of lubrication*, CRC press, 1983, 269-288.
2. H. P. Jost, *Modern tribology past and future*, *Lubrication Eng.*, 50, 1994, 159-166.
3. B. F. Hanyaloglyu and E. E. Graham, *Effect of surface temperature on vapor phase lubrication*, *Lubrication Eng.*, 49, 1993, 227-232.
4. B. F. Hanyaloglyu, D. C. Fedor, E. E. Graham, *Vapor phase lubrication of a Ni-based superalloy*, *Lubrication Eng.*, 51, 1995, 252-258.
5. E. E. Klaus, G. S. Jeng, J. L. Duda, *A study of tricesyl phosphate as a vapor delivered lubricant*, *Lubrication Eng.*, 45, 1989, 712-723.
6. J. L. Lauer, S. R. Dwyer, *Tribochemical lubrication of ceramics by carbonaceous vapor*, *Tribol. Trans.*, 34, 1991, 521-528.
7. W. Liu, E. E. klaus, *Wear behaviour of steel-on-si3n4 and Si3N4-on-Si3N4 systems with vapor phase lubrication of oleic acid and TCP*, *Wear*, 214, 1998, 207-211.
8. N. J. Barnick, T. A. Blanchet, *High temperature*

lubrication of various ceramics and metal alloys via directed hydrocarbon feed gases, *Wear*, 214, 1998, 131-138.

9. D. H. Hwang, D. E. Kim, and S. J. Lee, Influence of wear particle interaction in the sliding interface on friction of metals, *Wear*, 225, 1999, 427-439.