

# 스크류 소재의 마찰·마멸특성에 관한 실험적 연구

김청균·최동열·김성원·이종홍  
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## Experimental Study on the Friction and Wear of the Tribotreated Screw

Chung Kyun Kim · Dong Yul Choi · Seong Won Kim · Jong Hong Lee  
*Hongik University tribology research center*

**Abstract** - This paper presents tribological results of the screw materials, which include the conventional screw and newly developed one. The tribotreated screw is manufactured by applying the polymer power to the heat treated surface of the screw. The injection pressure which is developed between the screw and the cylinder has been applied to the rubbing surface of the specimen in a pin-on-disk wear tester. The measured results show that the friction coefficient and wear rate of a tribotreated screw are low compared to the conventional one.

**Key words** - screw, injection molding, tribotreated screw, friction, wear

### 1. 서론

스크류(screw)는 플라스틱 수지의 이송, 압축과 혼합, 용융을 담당하는 사출 성형기의 중요한 핵심부품으로 Fig. 1과 같이 실린더와 함께 압송장치를 구성한다. 스크류의 한쪽은 베어링에 의해 지지되고, 다른쪽은 자유단으로 유연성이 크다. 최근 스크류의 장축화에 따른 자유단의 변형거동이 크게 일

어나 사출압력이 불안정해지면 스크류와 실린더는 마찰이나 마멸을 발생한다.

유압모터에 의해 스크류가 회전하면서 호퍼(hopper)에서 공급된 플라스틱 알맹이는 스크류 내부로 유입되어 스크류의 블레이드와 실린더 사이의 밀폐된 공간을 따라서 이송하게 되고, 동시에 압축과 혼합이 잘되도록 하여 용융된 수지는 스크류 선단부로 이송된다. 스크류 선단부로의 이송과정에서 고

형체 수지, 반응용 혼합체 수지, 용융체 유동 수지는 스크류와 항상 미끄럼 마찰운동을 하므로 스크류는 불가피하게 마찰과 마멸현상을 경험하게 된다.

알맹이 형태로 유입된 플라스틱 고행체 수지는 스크류와 실린더의 공간을 따라서 이송하는 과정에서 용융되고, 수지의 색상은 균일하게 혼합되어 유동성이 우수한 용융 수지로 변해야 사출제품은 정밀도와 생산성을 높게 유지할 수 있다. 또한, 스크류에서 토출하는 용융 수지의 양을 증가시키기 위해서 스크류의 회전속도를 증가시키면 과도한 전단력과 높은 마찰온도가 발생하게 된다. 즉, 고행체 수지가 실린더와 스크류의 표면과 미끄럼 마찰을 심하게 일으키게 되면 스크류는 고온상태에서 기계적 특성이 약화되고, 실린더에 설치된 가열기로부터 전도된 열과 마찰열에 의해 발생된 조합열에 의해 스크류가 팽창하면서 스크류의 동적 특성은 저하하게 된다.

따라서 본 실험적 연구에서는 사출기 전용으로 사용하는 소재에 대한 마찰·마멸특성을

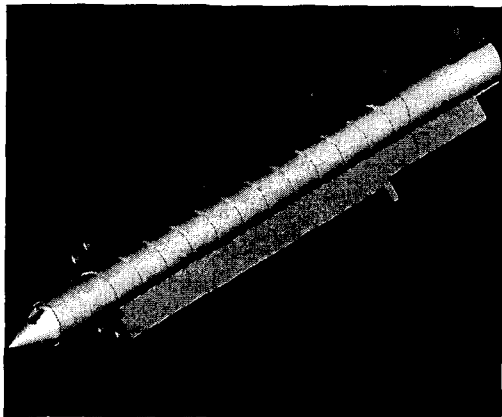


Fig. 1 Screw and cylinder assembly

시험하고, 스크류 소재의 초기 마찰과 마멸 특성을 향상시킬 수 있는 새로운 트리보 표면처리 기술을 적용하여 장차 새로운 스크류 기술개발을 추진하고자 한다.

## 2. 실험조건 및 사용소재

### 2-1. 실험장치와 실험방법

본 실험에서는 열처리 그룹과 트리보 표면처리 그룹의 2종류 스크류 시편을 제작하여 사출 성형기에서 제기될 수 있는 스크류-실린더-플라스틱 고행체 사이의 마찰환경을 고려한 트라이볼로지 특성 실험을 수행하였다.

사용된 마찰/마멸 시험기는 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 핀-디스크 타입으로 시편 상부에 있는 스프링에 의해 시편이 회전함에 따라 발생될 수 있는 하중적용 문제를 해결하여 균일한 초기 하중이 항상 시편에 가하도록 하였다. 또한, 회전 시편에 핀으로부터 가하는 하중이 항상 균일하도록 3점에서 접촉하도록 Fig. 3과 같이 설계되어 있다.

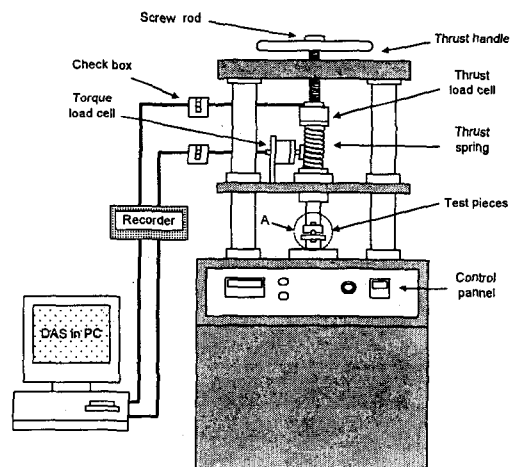


Fig. 2 Pin-on-disk type friction and wear tester

마찰·마멸특성 실험에서 시편에 가한 하중은 40, 60, 75, 90N의 4가지이고, 이들 하중은 시편에 스프링으로 하중을 가하는 메카니즘으로 회전중에도 시편에는 항상 균일한 하중이 작용하도록 하중 조건의 안정성을 확보토록 하였다.[3][4] 디스크 시편에는 0.2m/s의 안정된 회전속도를 설정하여 스크류의 회전속도와 유사하도록 하였고, 상부에서 가하는 스프링 정하중과 디스크의 회전에 따른 마찰 토크는 로드셀로 측정하여 환산한 결과를 마찰계수로 제시하고 있다. 또한, 시편의 마멸량은 시험을 하기 전과 후의 변화된 무게를 초정밀 하중계로 측정하였다.

스크류는 고흥체 수지, 반응용체 수지, 고온·고압의 용융체 수지와 항상 접촉하면서 스크류 선단부로 이송하는 관계로 폴리머 유동현상을 이론적으로 해석하는데는 한계가 있다. 따라서 실험 결과의 효용성을 확보하기 위해서 1) 기존에 스크류를 제작하는 열처리와 연마가공에 따라 시편을 동일한 공정으로 제작하고, 2) 트리보 표면처리 스크류

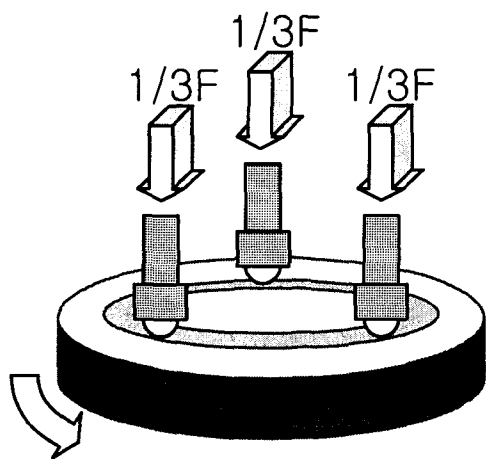


Fig. 3 Three point contact loading

(tribotreated screw) 시편은 기존의 스크류 시편에 트리보 표면 처리법으로 표면의 가공정밀도를 균일한 시편이다.

## 2-2. 사용소재

스크류 소재로 널리 사용하는 AISI 4140에 대한 물리적, 열적 특성치를 Table 1에서, 화학적 성분은 Table 2에서 각각 제시하고 있다. 이 밖에도 스크류 소재로 AISI 4340, Nitralloy 135-M, 300 Stainless, 17-4 PH Stainless 등 다양하게 사용하지만, 본 실험에서 사용한 AISI 4140 소재는 기계적 강도와 화염 강화(flame hardening) 또는 표면강화 용접(hard surface welding) 특성이 우수하기 때문에 압출 스크류(extrusion screw)와

Table 1. Mechanical and thermal properties of the screw material

Material type	AISI 4140
Young' s modulus, MPa	205,000
Poisson' s ratio	0.25
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	7850
Thermal expansion coefficient at 20°C, μm/m · K	12.2
Thermal conductivity, W/m · K	42.6
Specific heat, J/kg · K	473

Table 2. Chemical compositions of the screw material

Compositions	C	Cr	Fe	Mn	Mo	P	S	Si
Component (%)	0.37~0.44	0.98	97	0.88	0.2	Max 0.035	Max 0.04	0.25

사출 스크류(injection screw)의 80% 이상을 점유하고 있다[1].

### 3. 실험결과 및 고찰

스크류는 플라스틱 수지의 용융과 이송 과정에서 마찰접촉을 하고, 동시에 실린더-스크류-용융수지 사이에서 발생된 사출 유동 압력의 불균일성으로 인한 마찰손실의 증가, 마멸량 발생에 의한 수명단축, 발생된 마멸 입자가 플라스틱 수지로 혼합됨으로 인한 불량 사출물 등이 발생하게 되면 사출 성형기는 여러 가지 문제점을 갖게 된다. 그래서, 본 연구에서는 스크류 소재의 표면처리를 통하여 트라이블로지 문제를 실험적으로 고찰하고자 한다.

#### 3-1 시편과 경도실험

본 실험에 사용된 시편은 핀-디스크 실험에 적합한 형상을 갖는 볼과 원판으로 Fig. 4와 같다. 정지하고 있는 핀은 세라믹 볼을 사용하였고, 회전하는 디스크는 Table 1에서 제시한 AISI 4140으로 네가지 종류의 시편이

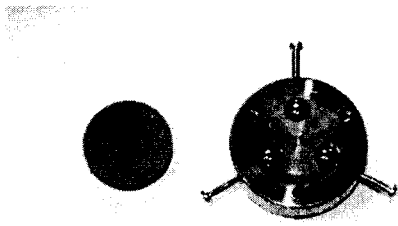


Fig. 4 Ball and disk specimens of the screw

준비되었다. 즉,

(1) 열처리 연마가공 시편 : Hv=1,010

(2) 비열처리 연마가공 시편 : Hv=800

(3) 열처리 시편에 트리보 표면처리를 추가한 시편 : Hv=1,037

(4) 비열처리 시편에 트리보 표면처리를 추가한 시편 : Hv=448

준비된 4종의 시편을 3차원 디지털 비커스 경도계로 측정된 데이터를 상기에서 제시한 것처럼 시편의 경도값은 열처리와 표면을 가공하는 방법에 따라 다르다. 기존의 스크류는 표면을 질화처리하여 표면의 경도를 Hv=1,010처럼 높게 유지하지만, 본 연구에서 제시한 시편은 표면을 특수 표면처리 한 시편의 경도값은 Hv=1,037로 약간 높게 측정되었다.

여기서 시편을 트리보 표면처리 할 경우 가공이나 열처리 과정에서 발생할 수 있는 각종 기공, 결함, 버(burr) 등을 탈락시키거나 미세 크랙을 닫아주어 약간의 경도 증가를 기할 수 있고, 또한 표면을 균일하게 유지할 수 있다는 사실이다.

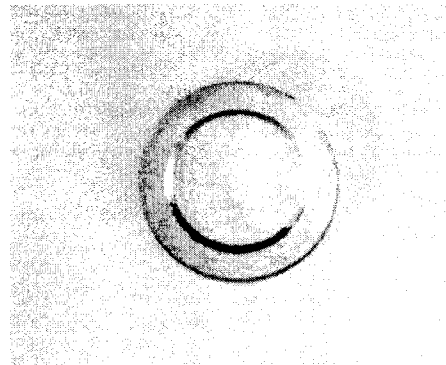


Fig. 5 Typical wear track of the screw specimen

### 3-2. 마찰 및 마멸시험

세라믹 볼로 4가지 종류의 시편에 대하여 수행한 마찰/마멸 실험이 정상적인 건조마찰을 하게 되면 원형의 마멸트랙은 동심원에서 Fig. 5와 같이 항상 균일하게 나타난다. 여기서 균일하게 발생된 마멸트랙은 트라이볼로지 특성평가에 대한 신뢰성을 높여주는 기준이 된다.

#### (1) 기존 스크류 시편의 마찰 및 마멸특성

핀-디스크 방식의 건조마찰(dry friction) 실험에서 스크류 표면을 질화처리하여 경도를 부여하고, 버핑 연마가공한 기존 스크류 시편의 경도가 Hv=1,010일 경우에 마찰거동 실험결과를 Fig. 6에서 제시하고 있다. 이 때에 시험편의 회전속도는 0.2m/s이고, 스프링에 의해 시험편에 가한 정하중이 45, 60, 75, 90N일 경우에 대한 실험을 수행하였다.

Fig. 6의 실험결과에 의하면 기존 스크류의 마찰계수는 가해진 하중에 대해 시간이 지나면서 미끄럼 마찰접촉 조건이 길들이기

과정(running-in period)을 지나면서 완만하게 마찰 안정화 단계에 도달한다. 기존 스크류 시편의 마찰조건 평형상태는 400초 정도 걸리고, 이 때의 마찰계수는  $f=0.5\sim 0.65$ 이다. 시편의 경도가 Hv=1,010인 소재의 경우는 75N 이하에서 마찰계수  $f=0.5$ 로 안정적인 마찰상태를 보여주지만, 90N 이상의 경우는 마찰계수  $f=0.65$ 의 높은 마찰상태를 보여주고 있다.

또한, 스크류 시편의 경도가 약간 낮은 Hv=800일 경우에 대한 마찰거동 실험결과를 Fig. 7에서 제시하는데, 길들이기 마찰과정이 급속하게 상승하여 마찰 안정화 단계에 빨리 도달하는 마찰패턴이 Fig. 6의 시편(Hv=1,010)과는 다른 마찰거동 특성을 보여주고 있다. Hv=800을 갖는 시험편에서 마찰조건 평형상태는 180초 정도로 2배 이상 빠르게 안정화를 이루었고, 이 때의 마찰계수는  $f=0.5\sim 0.6$ 이다. 시편의 경도가 Hv=800인 소재의 경우는 75N 이상에서 마찰계수  $f=0.5$ 로 안정적인 마찰상태를 보여주지만, 60N 이하의 경우는 마찰계수  $f=0.6$ 의 높은 마찰상태를 보여주고

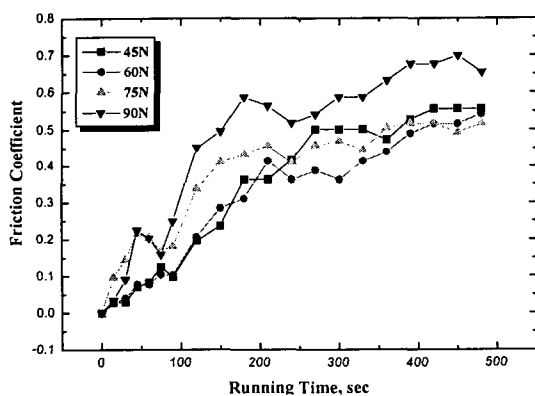


Fig. 6 Friction coefficients of the conventional screw with a vicker's hardness, Hv=1,010

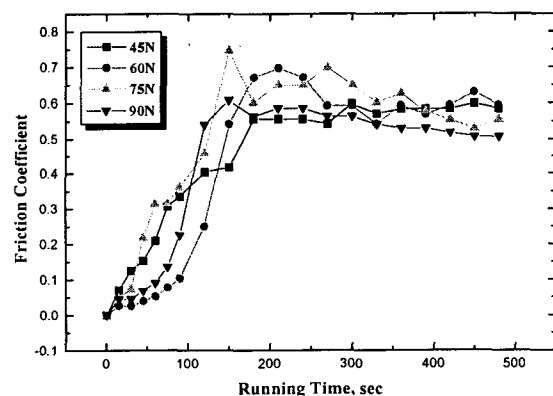
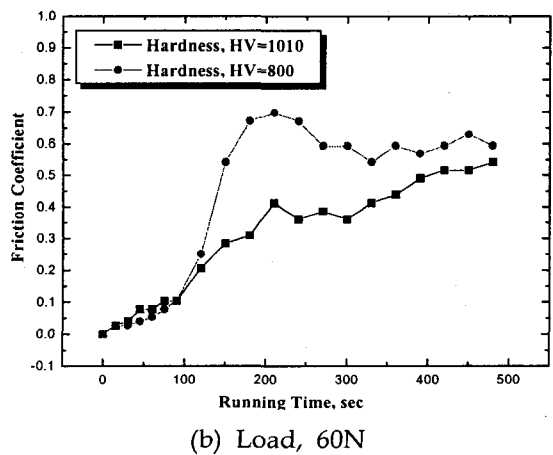
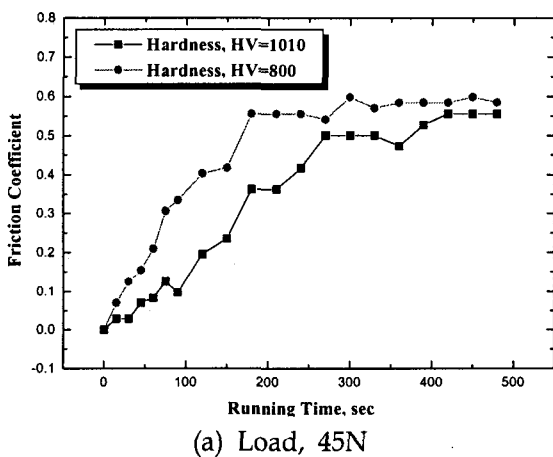


Fig. 7 Friction coefficient of the conventional screw with a vicker's hardness, Hv=800

있다.

이러한 현상은 경도가 높은 소재(Hv=1,010)에서 마찰접촉이 안정화를 이루는 과정(400초 이상)에서 시편에 가한 하중(75N)이 일정 값에서는 하중이 작을수록 마찰계수가 증가하고, 일정하중(90N) 이상에서는 마찰계수가 크게 증가하는 다른 현상을 보여준다. 그러나, 경도가 상대적으로 낮은 소재(Hv=800)에서 마찰접촉의 안정화가 급속하게 이루는 과정(180초 이상)에서 일정하중(90N) 이하에서는 하중이 작을수록 마찰계수가 일관되게 증가하는 현상을 보여준다.



경도에 따른 마찰특성을 Fig. 8에서 제시한 실험결과에 의하면 경도와 하중사이의 마찰특성이 분명하게 나타난다. 즉, 시험편에 가한 스프링 정하중이 75N 이하일 경우는 경도가 낮을수록 마찰계수가 높게 나타나는데, 이것은 소재의 소성변형이 발생하면서 마찰계수가 증가한다는 이론과 부합된다. 그러나, 가해진 하중이 90N 이상으로 높을 경우는 경도가 높을수록 마찰계수가 높게 나타난다.

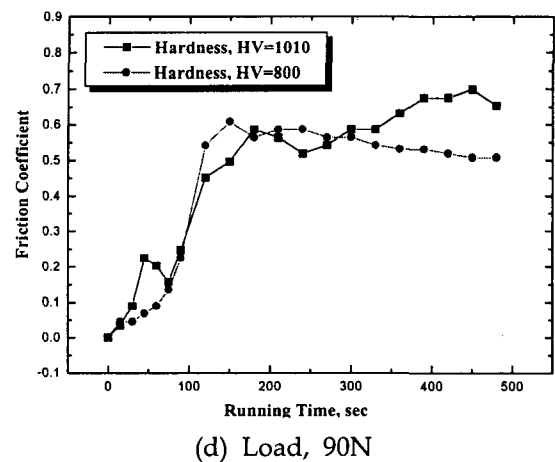
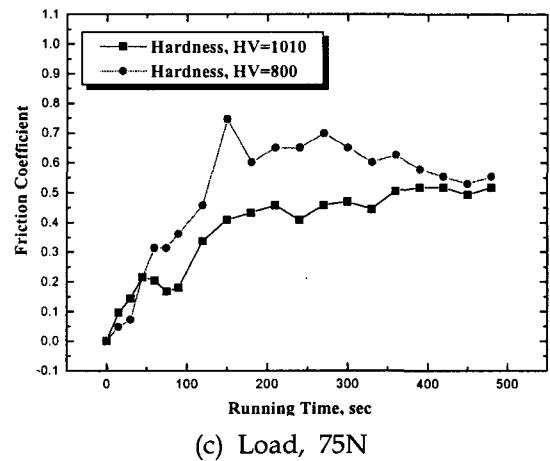


Fig. 8 Friction coefficients of the conventional screw for various vicker's hardness

Fig. 9는 서로 다른 경도를 갖는 기존의 스크류 시편에 대해 마멸량 발생을 하중에 따라 고찰한 결과이다. Fig. 9의 실험결과에 의하면 하중이 증가할수록 마멸량은 증가하고, 경도가 높은 소재의 마멸량 발생은 경도가 낮은 것에 비하여 작다. 이것은 건조마찰 상태에 대한 실험결과를 제시한 것으로 Archard의 마멸이론과 부합된다[2].

여기서 마찰계수가 높다는 의미는 플라스틱 수지와 스크류 사이에 마찰 에너지 손실이 높고, 경도가 높다는 사실은 마멸량 발생을 줄일 수 있다는 사실이다. 앞의 실험결과에서 제시한 것처럼 경도가 높으면 일정하중 이하에서는 마찰거동 특성이 안정적이지만, 일정하중 이상에서는 마찰거동 특성이 불안정해지기 때문에 마찰 에너지를 줄이면서 마멸량 발생을 극소화하기 위해서는 스크류의 경도를 높히면서 마찰계수가 낮게 유지될 수 있는 최적의 작동조건을 구해야 하고, 보다 중요한 것은 스크류와 수지 사이의 마찰상태를 건조마찰이나 경계마찰을 유체마찰 상태로 유지하도록 설계하는 것이 대단히 중요하다.

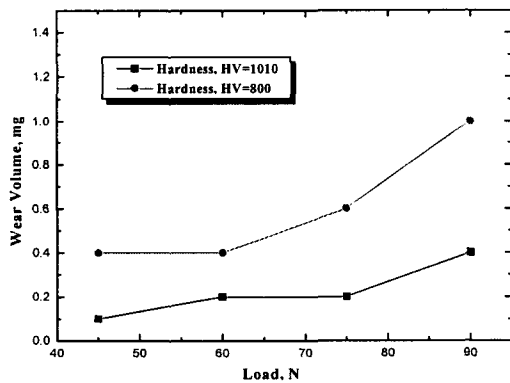


Fig. 9 Wear volume of the conventional screw for various vicker's hardness

## (2) 트리보 표면처리 스크류 시편의 마찰 및 마멸특성

핀-디스크 방식의 건조마찰(dry friction) 실험에서 스크류 표면을 질화 열처리하여 경도를 부여하고, 트리보 표면처리 스크류 시편의 경도가 Hv=1,037일 경우에 대한 마찰거동 실험결과를 Fig. 10에서 제시하고 있다. 이 때에 시험편의 회전속도는 0.2m/s이고, 스프링에 의해 시험편에 가한 정하중은 45, 60, 75, 90N으로 핀-디스크 마찰접촉에 대한 실험을 수행하였다.

Fig. 10의 실험결과에 의하면 트리보 표면처리 스크류의 마찰계수는 가해진 하중에 대해 시간이 지나면서 미끄럼 마찰접촉 상태가 길들이기 과정을 지나면서 완만하게 마찰 안정화 단계에 도달한다. 트리보 표면처리 스크류 시편의 마찰조건 평형상태는 하중이 낮은 45N의 경우는 400초 정도 걸리고, 작용하중이 60N에서 90N으로 높아질수록 평형상태에 걸리는 시간은 350초에서 200초로 빨라지는 결과를 제시하고 있으며, 이 때의 마찰

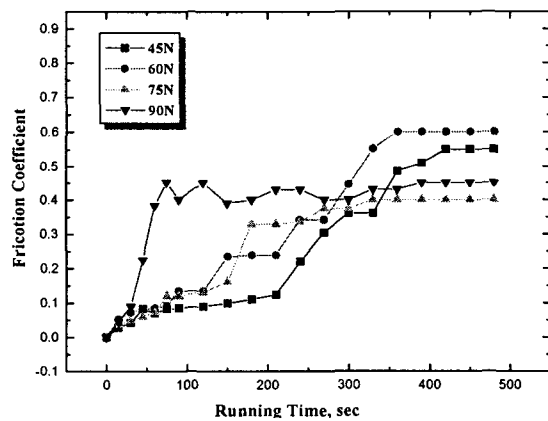


Fig. 10 Friction coefficients of the tribotreated screw with a vicker's hardness, Hv=1,037

계수는  $f=0.4\sim 0.6$ 이다. 시편의 경도가 Hv=1,037인 소재의 경우는 75N과 90N의 하중에서는 마찰계수가  $f=0.4\sim 0.43$ 으로 안정적인 마찰상태를 보여주지만, 60N인 경우는 마찰계수  $f=0.6$ 으로 높은 마찰계수를 보여주고 있다.

또한, 트리보 표면처리 스크류 시편의 경도가 낮은 Hv=448일 경우에 대한 마찰거동 실험결과를 Fig. 11에서 제시하는데, 길들이기 마찰과정이 대단히 빠르게 상승하여 마찰안정화 단계에 도달하는 패턴이 Fig. 10의 시편(Hv=1,037)과는 다른 마찰거동 특성을 보여주고 있다. Hv=448을 갖는 시험편에서 마찰조건의 평형상태가 50초 정도에서 빠르게 마찰거동 안정화를 이루었고, 이 때의 마찰계수는  $f=0.1$ 로 대단히 낮게 나타났지만, 지속적인 마찰계수 증가로 제2의 마찰계수 안정값인  $f=0.22\sim 0.32$ 로 평형을 이룬다. 이것은 스크류 샘플의 표면처리 경도가 Hv=448로 낮기 때문에 발생하는 마찰조건이다.

경도에 따른 마찰특성을 Fig. 12에서 제시

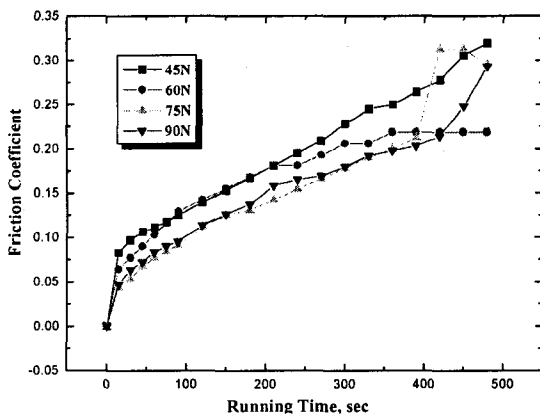
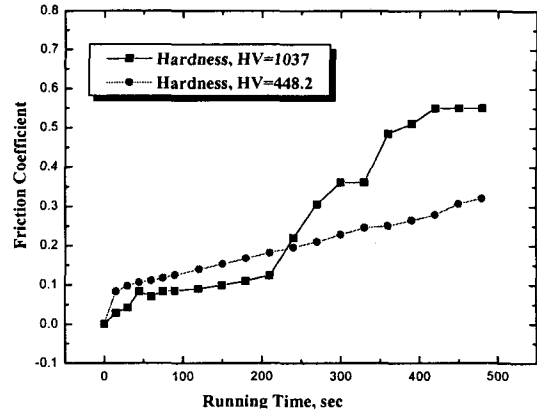
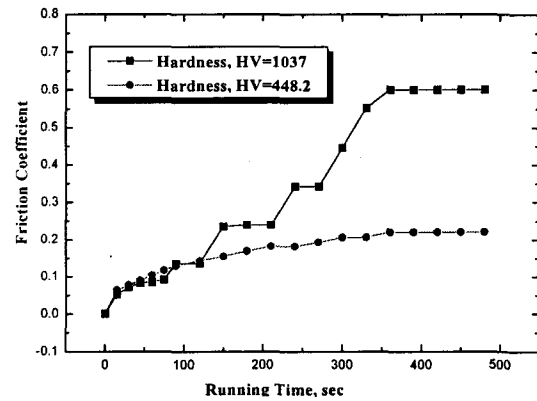


Fig. 11 Friction coefficient of the tribotreated screw with a vicker's hardness, Hv=448

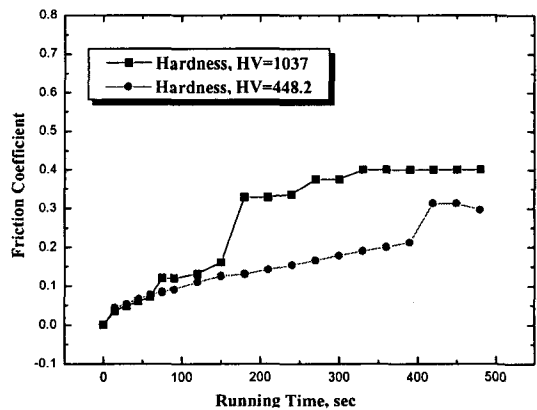
한 실험결과에 의하면 경도와 하중사이의 마찰특성이 분명하게 나타난다. 즉, 시험편에



(a) Load, 45N

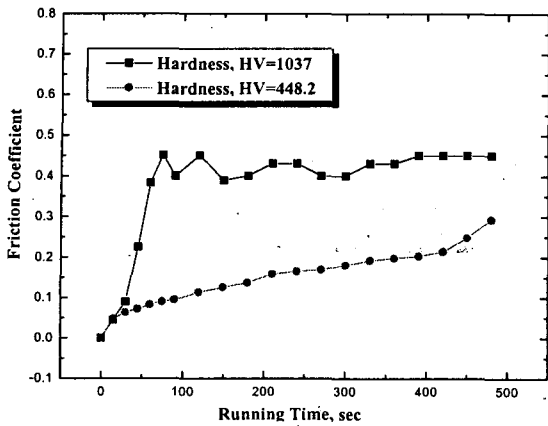


(b) Load, 60N



(c) Load, 75N





(d) Load, 90N

Fig. 12 Friction coefficients of the tribotreated screw for various vicker's hardness

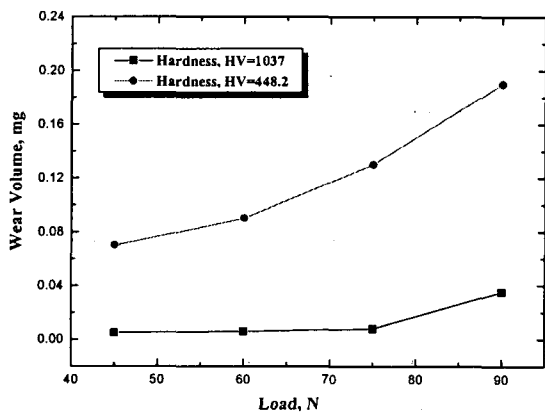


Fig. 13 Wear volume of the tribotreated screw for various vicker's hardness

가한 스프링 정하중 45, 60, 75, 90N에 대해 경도가 높을수록 마찰계수가 높게 나타나는데, 이것은 소재의 경도(Hv=1,037)가 높아서 표면의 소성변형이 잘 일어나지 않기 때문에 마찰계수가 작아질 우려가 높다. 그러나, 스크류는 트리보 표면처리로 초기의 가공면이 균일하기 때문에 실제접촉면적(real contact area)이 크게 증가함에 따라 마찰계수가 증가한다는 이론과 부합된다.

Fig. 13은 서로 다른 경도를 갖는 트리보 표면처리 스크류 시편에 대해 마멸량 발생을 하중에 따라 고찰한 결과이다. Fig. 13의 실험결과에 의하면 하중이 증가할수록 마멸량은 증가하고, 경도가 높은 소재의 마멸량 발생은 경도가 낮은 것에 비하여 작다. 이것은 건조마찰 상태에 대한 실험결과를 제시한 것으로서 Archard의 마멸이론과 부합된다[2].

여기서 마찰계수가 높다는 의미는 플라스틱 수지와 스크류 사이에 마찰 에너지 손실이 높고, 경도가 높다는 사실은 마멸량 발생을 줄일 수 있다는 사실이다. 앞의 실험결과에서 제시한 것처럼 경도가 높으면 일정하중에서는 마찰거동 특성이 안정적이지만, 또다른 하중에서는 마찰거동 특성이 불안정해지기 때문에 마찰 에너지를 줄이면서 마멸량 발생을 극소화하기 위해서는 스크류의 경도를 높히면서 마찰계수가 낮게 유지될 수 있는 최적의 작동조건을 구하고, 보다 중요한 것은 스크류와 수지 사이의 마찰상태를 건조마찰이나 경계마찰을 유체마찰 상태로 유지하도록 설계하는 것이 대단히 중요하다.

#### 4. 결론

핀-디스크 방식의 건조마찰(dry friction) 실험에서 열처리와 연마가공 스크류와 트리보 표면처리 스크류에 대한 경도와 마찰특성과 마멸특성을 비교하면 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉,

(1) 표면경도를 보면 기존의 열처리와 연마가공 스크류보다는 표면을 균일하게 가공하여 결함을 없앤 트리보 표면처리 스크류의

표면경도가 3% 정도 약간 높다.

(2) 마찰계수 측면에서 보면 트리보 표면 처리 스크류가 20%~8%의 감소효과가 있다. 이것은 스크류 소재에서 마찰계수의 저하가 플라스틱 수지의 유동성을 크게 향상시켜주는 요인으로 작용할 수 있다.

(3) 마멸량 측면에서 보면 트리보 표면처리 스크류가 열처리와 연마가공 스크류에 비하여 50%~13%의 감소효과가 있다.

스크류에서 마찰계수가 높다는 의미는 플라스틱 수지와 스크류 사이에 마찰 에너지 손실이 높다는 것이고, 경도가 높다는 사실은 마멸량 발생을 줄일 수 있다는 사실이다.

#### 참고 문헌

- [1] "Plasticating Components Technology," Spirex Co., 1992.
- [2] Chung Kyun Kim, "Introduction To Tribology," CheongMoonGak Pub., 1997.
- [3] Kapelski, G., Platon, F. and Boch, P., 1988, "Unlubricated Wear and Friction Behaviour of Alumina and Silicon Carbide Ceramics," Proc. 15th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, pp.349~354.
- [4] Jang, Sun-Tae and Lee, Young Z., 1997, "Friction and Wear Behavior of Ceramics under Various Sliding Environments," J. of the KSTLE, Vol. 10, No. 1, pp.11~13.