

스크류 소재의 마찰·마멸특성에 관한 실험적 연구

김청균*, 김성원⁺, 박균명⁺⁺

(논문접수일 2002. 6. 19, 심사완료일 2002. 10. 16)

Experimental Study on the Friction and Wear of Tribotreated Screw

Chung Kyun Kim*, Seong Won Kim⁺, Gyun Myoung Park⁺⁺

Abstract

The friction/wear testing has been carried out for investigating the tribological characteristics between a conventional screw and tribotreated one. The tribotreated screw is manufactured by blasting a fine polymer power to the heat-treated surface of the conventional screw. The injection molding pressure that is developed between the screw and the cylinder has been applied to the rubbing surface on 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 relatively low compared with the conventional one. This means that the tribotreated screw may be recommended for using an injection mold machine.

Key Words : Screw(스크류), Injection Molding(사출성형), Friction(마찰), Wear(마멸), Tribotreated Screw(트리보 표면처리 스크류)

1. 서론

사출 성형기의 나선형 스크류는 고형체 플라스틱 수지의 이송, 압착과 혼합, 용융을 담당하는 핵심부품으로 스크류의 한쪽은 베어링에 의해 지지되고, 다른쪽은 자유단으로 수지가 이송하면서 용융체에 의해 발생된 압력으로 유체 베어링처럼 스크류가 중심을 잡으면서 회전하도록 설계되어 있다. 사출기는 강력한 사출압력발생과 수지의 완벽한

용융을 위해 스크류의 장축화를 추구하기 때문에 스크류 자유단의 변형거동이나 응력이 커지고⁽¹⁾, 이것은 스크류와 실린더의 마찰손실과 마멸량 증가로 이어진다.

스크류는 유압모터에 의해 회전력을 받아 호퍼에서 공급되는 플라스틱 수지를 연속적으로 내부로 유입시키고, 수지는 스크류의 나선을 따라서 이송한다. 스크류는 실린더와의 작은 공간에서 압축과 마찰작용에 의해 용융된 수지는 스크류 선단부로 압송된다. 유입된 수지가 스크류 선

* 주저자, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 (ckkim@wow.hongik.ac.kr)

주소: 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1

+ 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

++ 한국생산기술연구원 생산기반기술본부

단부로의 이송과정에서 고행체 수지, 반응용 혼합체 수지, 용융체 수지는 스크류 표면과 항상 미끄럼 마찰운동을 하므로 스크류는 불가피하게 마찰과 마멸현상을 경험하게 된다.

고형체 수지가 실린더와 스크류의 표면과 미끄럼 마찰을 심하게 일으키게 되면 스크류는 고온상태로 변화면서 기계적 특성이 약화된다. 또한, 실린더의 히팅밴드에서 공급된 전도열과 미끄럼 마찰과정에서 발생된 마찰열은 스크류를 팽창시키기 때문에 스크류의 동특성은 저하되고, 열탄성 변형에 마멸이 발생하게 된다. 스크류가 정지된 경우는 히터 열로 표면 용융이 진행되지만, 회전하는 경우는 수지가 그루부내에서 전단 마찰력이 크게 발생되면서 용융과 혼합이 진행되고, 동시에 각종 마멸현상이 진행되는 것으로 알려져 있기 때문에 스크류 소재의 마찰/마멸 특성에 대한 연구는 대단히 중요하다⁽²⁾.

따라서, 스크류 소재에 대한 마찰·마멸특성을 실험하기 위하여 스크류 소재의 초기 마찰과 마멸특성을 향상시킬 수 있는 트리보 표면처리 기술을 적용함으로써 새로운 스크류 표면처리 기술의 유용성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험에 사용된 마찰/마멸 시험기는 Fig. 1의 핀-디스크 타입 입으로 시편 상부에 있는 스프링에 의해 시편이 회전함에 따라 발생될 수 있는 하중분제를 스프링에 의해 초기 하중이 시편에 항상 균일하게 가해지도록 하였다. 또한, 핀으로

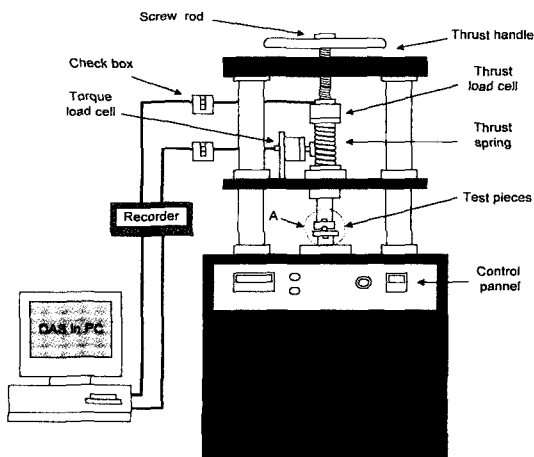


Fig. 1 Pin-on-disk type friction and wear tester

부터 가해진 하중이 회전 시편에 3점에서 균일하게 접촉하도록 설계되어 있다.

2.2 실험방법

시편에 가해진 하중은 45, 60, 75, 90N으로 항상 균일하게 시편에 작용하도록 하여 동하중의 안정성을 확보하였다. 시편에는 0.2m/s의 안정된 속도를 설정하여 스크류의 실제 회전속도와 유사하도록 하였고, 상부에서 가하는 스프링 하중과 디스크 회전에 따른 마찰 토크는 로드셀로 측정하여 환산 결과를 마찰계수로 제시하고 있다. 또한, 시편의 마멸량은 시험을 하기 전·후의 무게를 초정밀 하중계로 측정하였다.

2.3 소재 및 시편

스크류 소재로 널리 사용하는 AISI 4140을 실험소재로 선정하였고, 이 소재에 대한 화학성분은 Table 1에서 제시하고 있다. 본 실험에서 사용한 AISI 4140 소재는 기계적 강도와 화염경화 또는 표면강화 용접성이 대단히 우수하기 때문에 스크류 소재 사용량의 80% 이상을 점유하고 있다⁽³⁾.

본 실험에서는 열처리 그룹과 트리보 표면처리 그룹의 2 종류를 스크류 시편으로 제작하여 사출 성형기의 사용조건과 유사한 스크류-실린더-플라스틱 고행체 사이의 마찰환경을 고려한 트라이볼로지 특성 실험을 수행하였다.

스크류는 고행체 수지, 반응용체 수지, 고온·고압의 용융체 수지와 항상 접촉하면서 수지를 스크류 선단부로 이송하는 관계로 폴리머 유동현상을 이론적으로 해석하는데는 한계가 있다. 따라서, 실험 결과의 효용성을 확보하기 위해서

- ① 기존의 스크류 시편은 기존의 열처리와 연마가공을 동일한 공정으로 제작하고,
- ② 트리보 표면처리 스크류 시편은 기존의 스크류에 추가하여 트리보 표면 처리법으로 표면의 가공 정밀도를 향상시켰다.

여기서 시편 제작에 사용된 트리보 표면처리 기술은 가공된 마찰 표면에 미세한 분말입자(fine powder)를 분사하여 불균일하거나 거친 표면을 1차로 매끄럽고 곡률이 형성되도록 가공하고, 이어서 마찰바(friction bar)를 사용하여 2

Table 1 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	0.23

차로 마찰력을 1차 가공 표면에 적용하여 마찰면의 균질성을 확보토록 하는 가공법이다.

3. 실험결과 및 고찰

스크류는 플라스틱 수지의 용융과 압송과정에서 미끄럼 마찰 접촉운동을 하고, 동시에 실린더-스크류-용융수지 사이에서 발생된 사출 유동압력의 불균일성으로 마찰손실의 증가, 마멸량 발생에 의한 수명단축, 발생된 마멸입자가 플라스틱 수지로 혼합되면서 불량 사출물이 제작되면 사출 성형기는 여러 가지 문제점을 갖게 된다. 따라서, 본 연구에서는 스크류 소재의 표면처리를 통하여 트라이볼로지 문제를 실험적으로 고찰하고자 한다.

3.1 경도실험

핀-디스크 실험에 사용한 세라믹 볼과 디스크 시편을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 회전하는 디스크 시편 재질은 Table 1에서 제시한 AISI 4140으로 다음의 4가지 시편이 제작되었다. 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=448.2

Fig. 2(b)와 같은 4종의 디스크 시편을 3차원 디지털 비커스 경도계로 측정된 데이터는 상기에서 제시한 것처럼 시편의 열처리와 표면을 가공하는 방법에 따라 경도값이 달라진다. 기존의 스크류는 표면을 열처리하여 표면의 경도를 HV=1,010처럼 높게 유지하지만 표면의 균질성이 크게 떨어진다는 문제점이 있다. 그러나, 본 연구에서 제시한 시편

은 표면을 특수 표면처리 한 시편의 경도값은 HV=1,037로 약간 높지만 가공면의 균질성이 우수하다는 특징이 있다. 즉, 시편을 트리보 표면처리를 할 경우, 가공이나 열처리 과정에서 발생할 수 있는 각종 기공, 결함, 버(burr) 등을 탈락 시키거나 미세 크랙을 닫아주어 약간의 경도 증가를 기할 수 있고, 표면을 균일하게 유지할 수 있다는 사실이다.

3.2 마찰 및 마멸시험

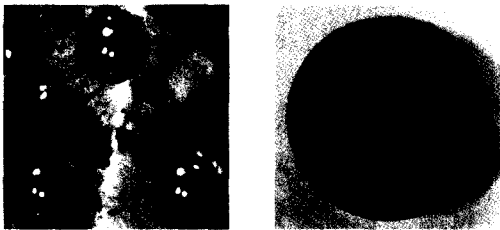
Fig. 2에서 세라믹 볼과 마찰접촉 운동을 하는 4가지의 디스크 시편에 대한 정상적인 마찰/마멸 실험은 Fig. 3과 같은 원형의 마멸트랙이 동심원으로 나타난다. 여기서 균일하게 발생된 마멸트랙은 트라이볼로지 특성평가에 대한 신뢰성을 높여주는 기준이 된다.

핀-디스크 실험장치에서 시편의 회전속도는 0.2m/s이고, 스프링에 의해 시험에 가해지는 하중은 45, 60, 75, 90N의 4가지로 건조마찰에 대한 실험을 수행하였다.

3.2.1 기존 스크류 시편의 경우

스크류 표면을 열처리하여 경도를 높이고, 버핑 연마가공한 기존 스크류 시편의 경도가 HV=1,010일 경우에 대한 마찰거동 실험결과를 Fig. 4에서 제시하고 있다. 이 실험결과에 의하면 기존 스크류의 마찰계수는 가해진 하중에 대해 미끄럼 마찰접촉 조건이 길들이기 과정(running-in period)을 지나면서 완만하게 마찰 안정화 단계에 도달한다. 기존 스크류 시편의 마찰 평형상태는 400초 정도 걸리고, 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 $f=0.65$ 의 높은 마찰상태를 보여주고 있다.

또한, 시편의 경도가 약간 낮은 HV=800일 경우에 대한 마찰거동 실험결과를 Fig. 5에서 제시하는데, 길들이기 마



(a) Ball (b) Tribotreated disk

Fig. 2 Ball and disk specimens of the screw

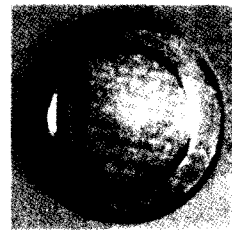


Fig. 3 Typical wear track of the screw specimen

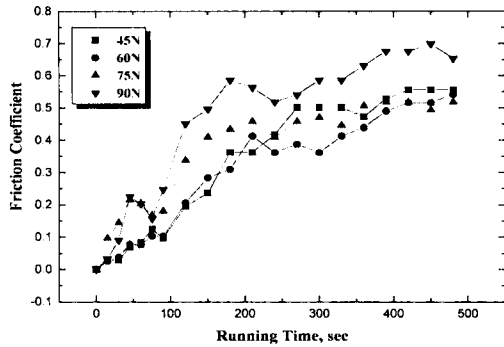


Fig. 4 Friction coefficients of the conventional screw with a Vickers hardness, HV=1,010

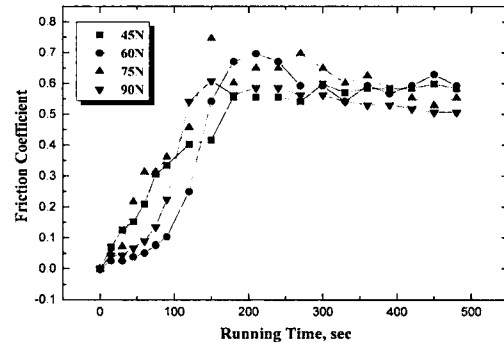
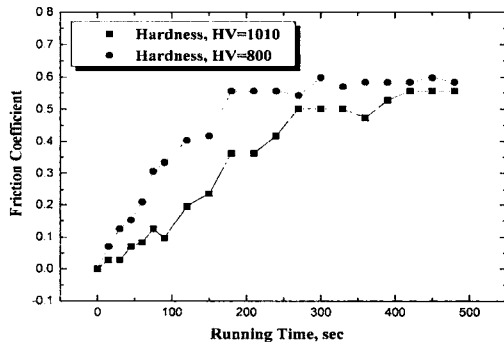
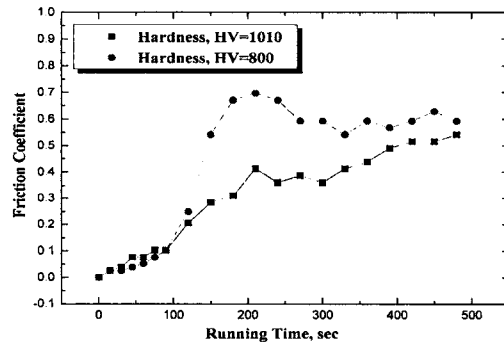


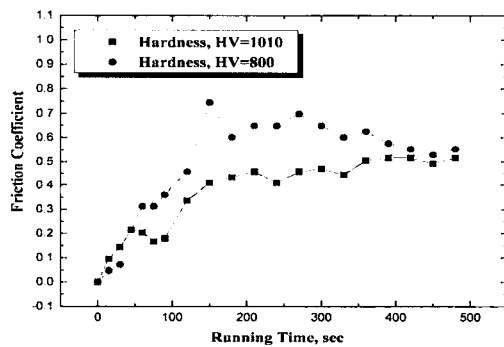
Fig. 5 Friction coefficient of the conventional screw with a Vickers hardness, HV=800



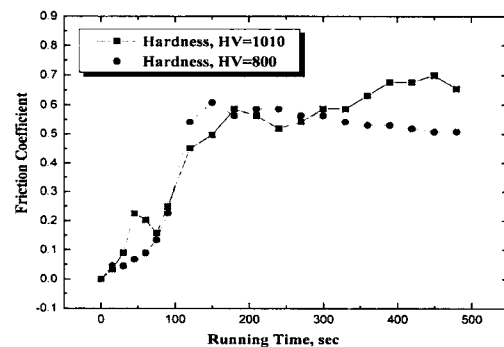
(a) Load, 45N



(b) Load, 60N



(c) Load, 75N



(d) Load, 90N

Fig. 6 Friction coefficients of the conventional screw for various Vickers hardness

찰과정이 급속하게 상승하여 마찰 안정화 단계에 빨리 도달하는 마찰패턴이 Fig. 4의 시편(HV=1,010)과는 다른 마찰 거동 특성을 보여주고 있다. 즉, HV=800을 갖는 시편에서 마찰 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 있다.

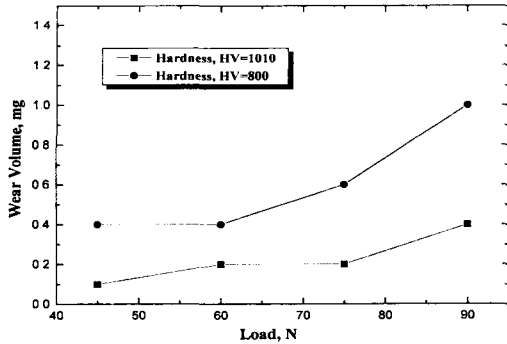


Fig. 7 Wear volume of the conventional screw for various Vickers hardness

이러한 현상은 경도가 높은 소재(HV=1,010)에서 마찰접촉이 안정화를 이루는 과정(400초 이상)에서 시편에 가한 하중(75N)이 일정값에서는 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 제시한 Fig. 6의 실험결과에 의하면, 경도와 하중사이의 마찰특성이 분명하게 나타난다. 즉, 시편에 가한 스프링 하중이 75N 이하일 경우는 경도가 낮을수록 마찰계수가 높게 나타나는데, 이것은 소재의 소성변형이 발생하면서 마찰계수가 증가한다는 이론과 부합된다⁽⁴⁾. 그러나, 마찰계수가 안정화가 이루어진 단계 이후를 살펴보면, 가해진 하중이 90N 이상으로 높아질 경우는 경도가 높을수록 마찰계수가 높게 나타날 것으로 예상된다.

Fig. 7은 서로 다른 경도를 갖는 기존의 스크류 시편에 대해 마멸량 발생을 하중에 따라서 고찰한 결과이다. 이 실험결과에 의하면 하중이 증가할수록 마멸량은 증가하고, 경도가 높은 소재의 마멸량 발생은 경도가 낮은 것에 비하여 작다. 이것은 건조마찰 상태에 대한 실험결과를 제시한 것으로 Archard⁽⁴⁾의 마멸이론과 부합된다.

3.2.2 트리보 표면처리 스크류 시편의 경우

스크류의 경도가 HV=1,037인 표면처리 시편에 대한 마찰거동 실험결과를 Fig. 8에서 제시하고 있다. 이 실험결과에 의하면 트리보 표면처리 스크류의 마찰계수는 가해진 하중에 대해 시간이 지나면서 미끄럼 마찰접촉 상태가 길들이

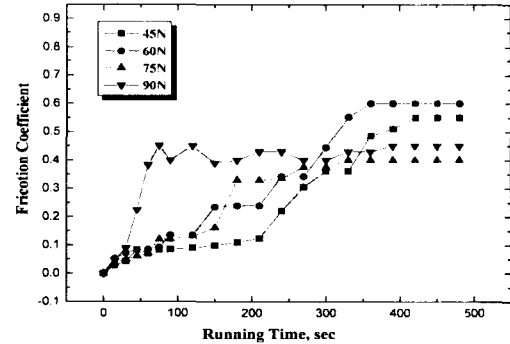


Fig. 8 Friction coefficients of the tribotreated screw with a Vickers hardness, HV=1,037

기 과정을 지나면서 완만하게 마찰 안정화 단계에 도달한다.

트리보 표면처리 스크류 시편에서 하중이 낮은 45N의 경우는 400초 정도 걸리고, 작용하중이 60N에서 90N으로 높아질수록 평형상태에 걸리는 시간은 350초에서 200초로 빨라지는 결과를 제시하고 있으며, 이 때의 마찰계수는 $f=0.4\sim0.6$ 이다. 시편의 경도가 HV=1,037인 소재의 경우는 75N과 90N의 고하중에서는 마찰계수가 $f=0.4\sim0.43$ 으로 안정적인 마찰상태를 보여주지만, 60N인 경우는 마찰계수 $f=0.6$ 으로 대단히 높은 마찰계수를 보여주고 있다.

또한, 트리보 표면처리 스크류 시편의 경도가 낮은 HV=448.2일 경우에 대한 실험결과를 Fig. 9에서 제시하는데, 경도가 높은 시편보다는 길들이기 마찰과정이 빠르게 진입하여 마찰의 안정화 단계에 도달하는 패턴이 Fig. 8의 시편(HV=1,037)과는 다른 마찰거동 특성을 보여주고 있다. HV=448.2를 갖는 시험편에서 마찰조건인 평형상태가 50초

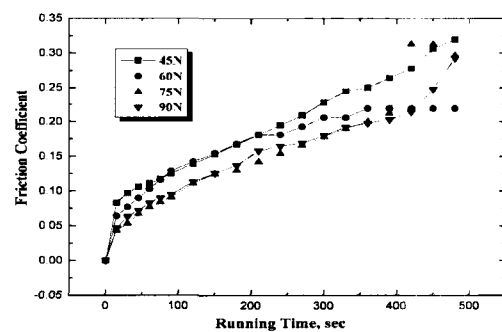


Fig. 9 Friction coefficient of the tribotreated screw with a Vickers hardness, HV=448.2

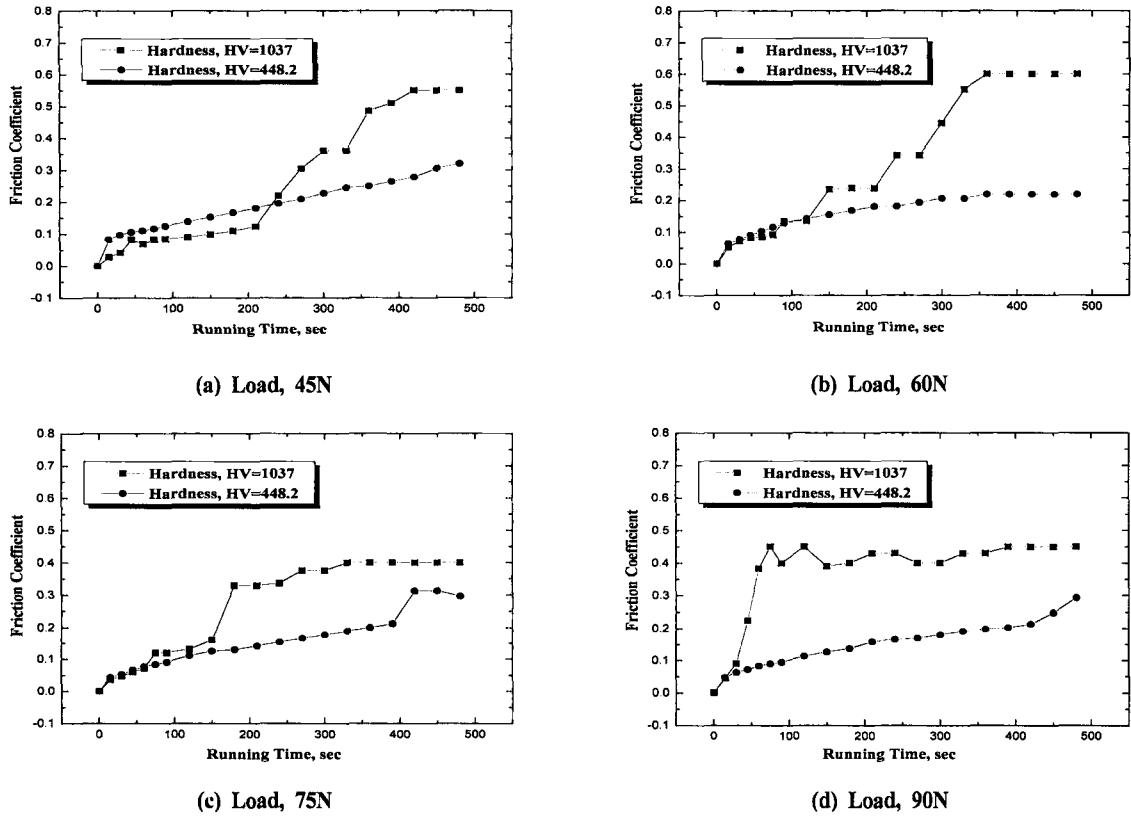


Fig. 10 Friction coefficients of the tribotreated screw for various Vickers hardness

정도에서 빠르게 불완전한 1단계 마찰거동 안정화 경향을 나타낸다. 이 때의 마찰계수는 $f=0.1$ 로 대단히 낮게 유지되지만, 지속적인 마찰계수 증가로 제2의 마찰계수 $f=0.22 \sim 0.32$ 로 안정된 평형을 이룬다. 이것은 스크류 샘플의 표면 처리 경도가 HV=448.2로 낮기 때문에 발생하는 마찰조건이다.

경도변화에 따른 마찰특성을 제시한 Fig. 10의 실험결과에 의하면 경도와 하중사이의 마찰특성이 분명하게 나타난다. 즉, 시험편에 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 실제접촉면적이 크게 증가하면서 마찰계수가 증가한다는 이론과 일치한다.

Fig. 11은 경도값이 다른 트리보 표면처리 스크류 시험편에

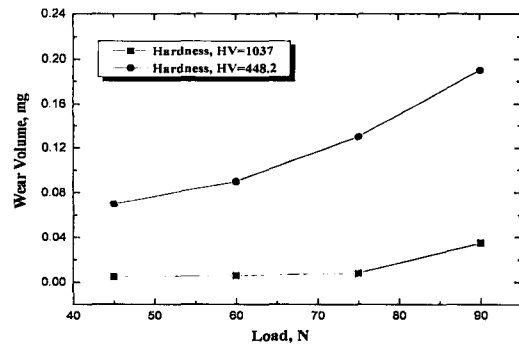


Fig. 11 Wear volume of the tribotreated screw for various Vickers hardness

대해 마멸량을 고찰한 결과이다. 이 실험결과에 의하면 하중이 증가할수록 마멸량은 증가하고, 높은 경도를 갖는 소

재의 마멸량 발생은 경도가 낮은 것에 비하여 작다. 이것은 Fig. 7의 결과와 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 11의 실험 결과는 Fig. 7의 실험 데이터에 비하여 마멸량 발생이 크게 낮음을 나타내는데, 이것은 트리보 표면처리 시편의 초기 마찰력이 크게 줄어들면서 균일해지는 특성이 있기 때문이다. 본 실험에서 사용한 하중 구간에 대하여 미끄럼 마찰면에 트리보 표면처리를 하면 효과적이라는 실험적 데이터를 제시하고 있다.

여기서 마찰계수가 높다는 것은 수지와 스크류 사이에서 마찰손실이 크고, 경도가 높다는 것을 의미한다. 이것은 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 높이면서 마찰계수가 낮게 유지될 수 있는 최적의 작동조건을 구해야 하고, 보다 중요한 것은 스크류와 수지 사이의 마찰상태를 건조마찰이나 경계마찰을 용융체에 의한 유체마찰 상태로 유지하도록 설계하는 것이 대단히 중요하다.

4. 결론

스크류의 마찰계수가 높으면 플라스틱 수지와 스크류 사이에 마찰손실이 증가하고, 스크류 표면에는 소착현상이 발생한다. 그러나, 스크류 마찰면의 표면 경도가 높으면 마멸

을 줄일 수 있다. 이러한 마찰·마멸특성을 교차하기 위해서 기존 스크류와 트리보 표면처리 스크류 시편에 대한 특성을 비교하면 다음과 같다.

- (1) 표면경도는 기존의 열처리에 연마가공을 한 스크류보다 트리보 표면처리 스크류의 표면경도가 3% 정도 높게 나타났다.
- (2) 마찰계수는 트리보 표면처리 스크류가 20%~8%의 감소효과가 있어 수지의 소착현상을 방지해주는 효과가 크다.
- (3) 마멸은 트리보 표면처리 스크류가 기존 스크류에 비해 50%~13%의 감소효과가 있다.

참고 문헌

- (1) 김청균, 조승현, "사출기 스크류의 변형거동 특성에 관한 수치적 연구," 한국공작기계학회, 제11권, 제5호, pp. 30~37, 2002.
- (2) 홍명용, "사출성형기술 1," pp. 128~130, 기전출판사, 1990.
- (3) "Plasticating Components Technology," Spirex Co., pp. 85, 1992.
- (4) Chung Kyun Kim, "Introduction To Tribology." CMG Pub., pp. 31, 1997.