

마멸시험기의 하중부과 방법에 대한 비교 연구

A study on the comparison in different loading methods for pin-on-disk wear test system

서만식* 구영필(부산대학교 대학원), 조용주(부산대학교 기계공학부)
Man-Sik Seo, Young-Pil Koo, Yong-Joo Cho(Pusan National University)

Abstract

In this study, the dynamic characteristics in various loading methods for wear tester were investigated experimentally. As for the dead-weight, the pneumatic, and the hydraulic method, the load control performance against external disturbances was estimated under the several loading conditions like the different sliding speed, the varied normal load, and the misalignment. The hydraulic loading method showed the most stable loading performance of all the loading methods in the experiment.

Key Word

Normal load, Hydraulic, Dead weight, Pneumatic, Loading method

1. 서 론

마찰, 마멸의 실험적 연구에 널리 사용된 pin-on-disk형 마멸시험기에서 시험 하중은 대부분 dead weight와 pneumatic방법으로 주어진다. 하지만 실제 가해지는 하중은 시스템의 동특성의 영향을 받는다. Tolstoi[1]에 의해 마찰접촉시 수직 강성에 대한 중요성이 제기된 이후 마멸 시험기의 동특성에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. Soom 과 Kim[2]은 편 홀더의 재질변화에 따른 연구를 하였으며, Elder와 Eiss[3], Kong et al.[4]들은 하중을 부과하는 아암의 강성에 대한 연구를 하였다. Chiou, Kato 그리고 Kayaba[5]들은 스프링 강

성 변화에 따른 마멸률 연구를 하였으며, Rise[6]와 동료 연구자들은 시험 편의 물리적 치수 변화에 따른 마멸 거동을 실험적으로 수행하였고, Aronov et al.[7,8]들은 하중부과 아암의 길이 변화에 따른 수직강성에 대한 연구 하였다.

Aronov et al. [7]들은 dead weight 방식의 pin-on-disk형 시험기를 사용하여, 수직하중에 의존하는 정상상태 마찰영역, 비선형 마찰영역, 외란이 나타나는 과도 마찰영역, 자려진동 영역과 같은 4가지 다른 마찰 형태를 보고하였으며 mild 에서 severe한 마멸로 이어지는 천이에 대한 원인으로 임계 수직하중을 제시하였고, 이러한 임계 수직하중은 시스템 강성 변화에 비례한다고 서술하였다.

Ge [9]는 마찰·마멸은 접촉된 표면의 상

호작용의 결과로서 발생되고, operating parameter와 tribological system의 정밀성에 관한 함수이며, 부과하중의 변화는 마멸 mechanism의 변화를 초래하는 주된 인자라고 주장하였다.

최근의 연구에서 Yoon et al.[10,11]들은 미끄럼 마멸시험시 roughness, waviness, misalignment등과 같은 접촉표면위의 기하학적인 불균형 요인들로 인해 하중부과 방향의 변위가 시스템에 가진 되었을 때 미끄럼속도와 상기 요인들의 복합에 따르는 회전 주파수와 시스템의 동적변수와의 상관관계에 의해 하중부과 방향의 하중 변동이 다르게 발생됨을 보고 하였으며, 또한 마멸시험기 시스템의 동특성은 하중을 부과하는 방법에 의해서도 차이가 날 수 있음을 실험적으로 측정, 평가하고 이론적으로 고찰하였다.

회전 디스크의 표면이 이상적인 평면이거나, 혹은 회전축의 misalignment가 전혀 없다면 이에 의한 수직력에 외란이 없겠지만 실제적으로는 상기 요인들과, 하중을 부과하는 방법에 따른 동특성 인자들이 연관되어 하중부과 방향의 변위가 발생되고 이로 인해 수직력에 외란이 가해지게 된다. 더구나 디스크 시편 기울기는 하중부과 방향의 변위를 초래하므로

그 정도가 클 경우 부과된 하중에 영향을 미쳐 실제의 마찰 시험 결과와 다른 결과를 초래 할 수 있으므로 마찰, 마멸시험시 일정한 하중을 부과하는 것은 매우 중요한 변수라는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 제어 성능이 우수한 전기·유압식 하중부과 방식의 마멸시험기를 설계 및 제작하여 미끄럼 속도, 하중의 크기 및 시편 디스크의 misalignment를 변화시켰을 때 접촉부에 작용하는 실질 수직 부과하중에 따른 수직력의 변동 특성을 기존의 하중부과 방법인 dead weight, pneumatic 방법에서의 변동값과 상호 비교하였다.

2. 마멸시험장치 및 방법

본 연구에서 제작된 pin-on-disk형 마멸시험기는 마멸 입자에 의한 간섭을 줄이기 위하여 접촉트랙에서 마멸 입자가 쉽게 탈락하도록 시편 disk가 수평면과 수직으로 회전하고 그 위에 pin이 가압되는 방식으로 하였다. 하중부과는 hydraulic, dead weight, pneumatic

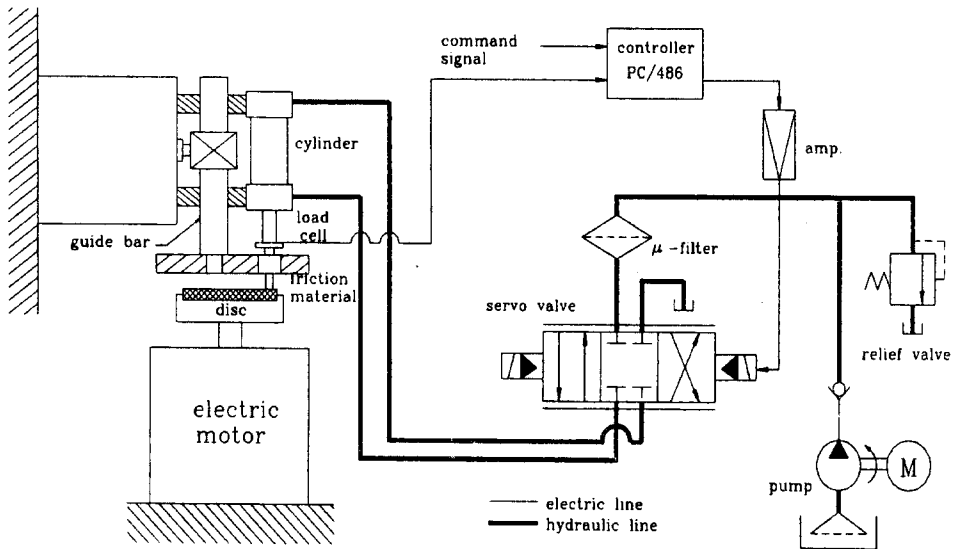


Fig. 1. Schematic diagram of hydraulic pin-on-disk type wear test system

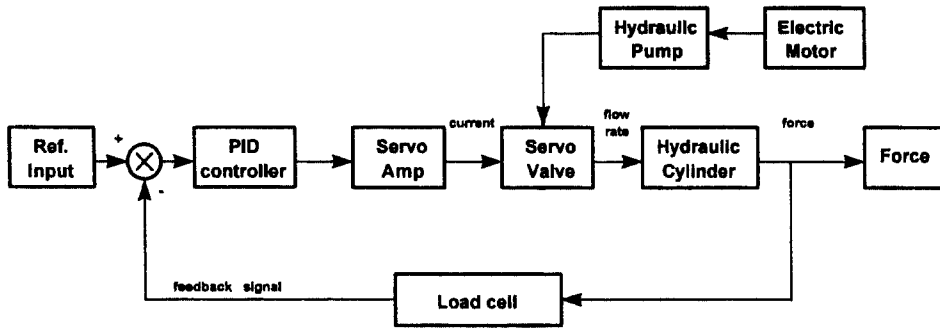


Fig. 2. Block diagram of hydraulic control system

방법을 시험 조건에 따라 선택적으로 사용 가능하도록 설계하였다.

실험장치의 구성은 Fig. 1과 같으며, 제어 block diagram은 Fig. 2와 같다. Hydraulic 하중부과 방법은 최대 사용압력 3.432MPa, 실린더 내경 20mm, 실린더 스트로크 54mm인 TAIYO사 제품인 소구경 실린더를 사용하였다. 설정하중에 해당하는 기준입력 값을 program상에서 입력하면 D/A converter를 통해 analogue신호로 변환되고 servo amp에서 증폭이 되어 servo valve로 보내어진다. Servo valve는 유압 펌프에서 발생된 고압의 작동유를 오차신호에 비례하는 유량으로 유압 실린더에 보내어 피스톤을 구동시킨다. 실린더의 변위로 pin과 disk 사이의 접촉하중이 나타난다. 이 접촉하중은 pin과 실린더 끝단 사이의 load cell에 의해 측정된다. 측정된 하중이 입력신호와 일치하지 않으면 그 차이로 feed-back시켜 피스톤의 변위를 수정한다. 이러한 과정이 반복되어 결국 오차신호는 점점 작아져 제어량을 목표치에 추종시키게 된다.

Pneumatic 하중부과 방법은 최대 사용압력 1MPa, 피스톤 내경 32mm, 스트로크 45mm인 FESTO사 제품의 실린더를 사용하였으며 압축공기의 압력을 레귤레이터로 조절하고 솔레노이드 밸브에 의해 실린더에 압축공기를 공급하거나 차단하여 하중을 부과하도록 되어 있다. Dead weight 하중부과 방법은 추의 무게로서 하중을 변화시킨다. 시편은 직경 100mm

두께 10mm의 디스크와 직경 5mm 길이 7mm인 핀을 사용하였으며 디스크와 핀의 재질은 SM45C, 표면 경도는 $H_{RB} 89 \pm 5$ 이었다. 시험 디스크는 surface grinding machine으로 평면 연삭 가공 후 abrasive polisher로서 polishing 하여 표면 거칠기가 $0.03\mu\text{m}(Ra)$ 로 하였다. 디스크 위의 접촉트랙의 반경은 40mm이며 주축의 회전속도를 달리하여 시험속도를 변화시킨다.

Pin과 disk 시편 사이에 작용하는 수직력과 마찰력은 load cell로 측정되고 측정된 신호는 dynamic strain amplifier에 의해 증폭되어 증폭기에 내장된 low-pass filter를 통하여 고주파 성분의 noise를 제거한 후 12 bit A/D converter를 통해 digital 신호로 변환되어 PC에 저장됨으로써 실시간 측정이 이루어지도록 하였다.

3. 시험 결과

Dead weight, hydraulic cylinder, pneumatic cylinder를 하중부과 방법에 따라 변경 하였을 때 misalignment와 같은 표면 불균형 요인에 의한 접촉부의 수직력 변동량을 수직하중, 미끄럼속도등 작동조건에 따른 변동량을 측정하고 상호 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다

3-1. 하중부과 방법의 변화

Fig. 3은 하중 177N, 미끄럼속도 0.008m/s (2rpm), Fig. 4는 하중 177N, 미끄럼속도 0.06m/s(15rpm)으로 디스크 시편 경사도 $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-4}$ 로하여 3가지 하중부과 방법 변화에 대한 수직력 변화를 측정된 결과이다.

하중부과 방법에 따른 수직력의 변동은 pneumatic에 의한 방법에서 수직력의 변동이 가장 크고 hydraulic에 의한 방법에서 가장 작게 나타나고 있음을 볼 수 있으며, Dead weight

pneumatic 방법에서 디스크 시편 불균형 요인에 의한 하중부과 방향의 변위가 디스크 회전 rpm 성분과 함께 변동되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 hydraulic 방법에서는 수직력의 변동이 아주 미약하여 거의 일정한 하중이 부과되고 있음을 알 수 있다.

Table 1은 미끄럼속도 변화에 따른 하중부과 방법별 수직력에 대한 rms 변동값을 나타내고 있다. 미끄럼 속도 변화에 따른 변동값은 미끄럼속도 0.008m/s일 때 pneumatic(37.57)이 dead weight(3.27), hydraulic(0.86)보다 변동값이 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 고속의

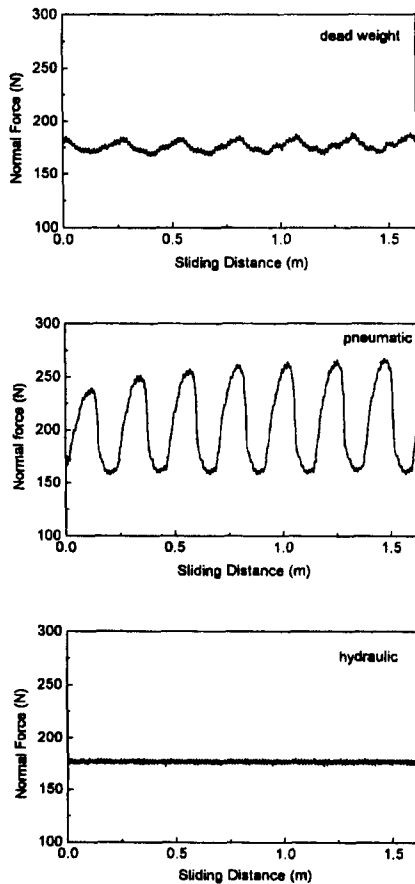


Fig. 3. Fluctuation of dead weight, pneumatic and hydraulic loading method for the normal force (normal load, 177 N; Sliding velocity, 0.008m/s; $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-4}$)

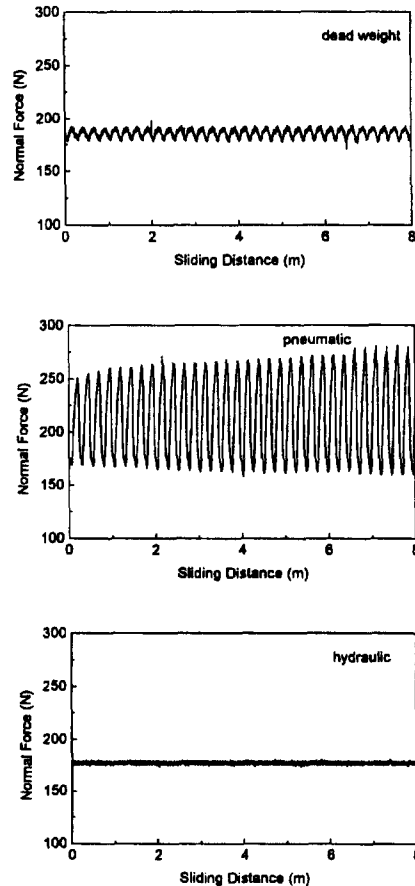


Fig. 4. Fluctuation of dead weight, pneumatic and hydraulic loading method for the normal force (normal load, 177 N; Sliding velocity, 0.06m/s; $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-4}$)

		RMS value of normal force fluctuation at the 177N		
		Dead weight	Pneumatic	Hydraulic
Sliding velocity (m/s)	0.008	3.27	37.57	0.86
	0.06	4.78	39.83	1.91
	0.42	15.16	44.48	5.38

Table 1. RMS value of fluctuation for dead weight, pneumatic and hydraulic loading method at the 177N

미끄럼속도(0.42m/s)에서도 역시 pneumatic방 따라 수직력의 변동폭은 dead weight(3.27→15.16)가 가장 크고, pneumatic(37.57→44.48),

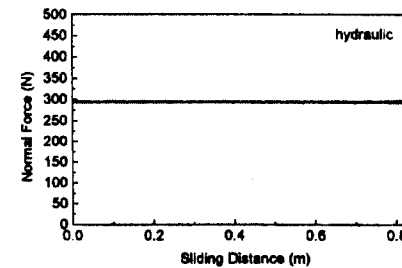
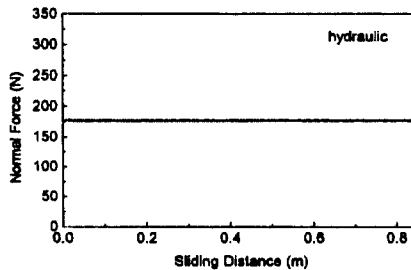
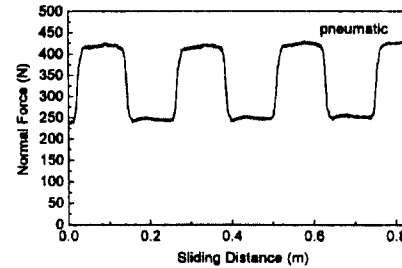
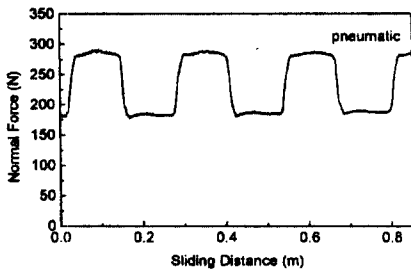
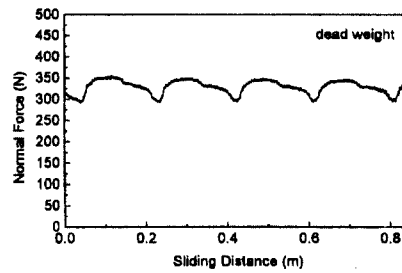
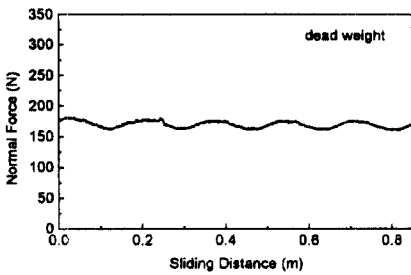


Fig. 5. Fluctuation of dead weight, pneumatic and hydraulic loading method for the normal force when the flatness of disk is $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ (normal load, 177 N; Sliding velocity, 0.004m/s;)

Fig. 6. Fluctuation of dead weight, pneumatic and hydraulic loading method for the normal force when the flatness of disk is $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ (normal load, 294 N; Sliding velocity, 0.004m/s;)

hydraulic(0.86→5.38)방법이 가장 작게 나타났다.

Hydraulic 방식에서 변동량은 모든 속도조건에서 순간 수직력을 산술평균 하였을 때 그 편차가 아주 작았으며 접촉부의 수직력 변동이 발생하더라도 고정도의 압력제어로 수직력 변동량이 적고 상대적으로 안정된 하중이 부과 됨을 확인할 수 있었다.

3-2. Misalignment의 영향

시편 디스크 표면의 기울기는 하중부과 방향의 변위를 초래하므로 수직력 및 마찰력의 변동량 발생 원인이 된다. 시편 디스크의 misalignment를 평가하기 위해 상대적으로 디스크 시편에 $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ 의 경사도를 주고 미끄럼속도 0.004m/s(1rpm)의 저속도에서 3가지 하중부과 방법별로 시험하여 부과하중이 177N일 때 Fig. 5, 294N에 대해서는 Fig. 6의 결과를 각각 얻었다.

하중변화에 따른 수직력 변동량은 hydraulic 방법이 가장 작고 pneumatic 방법이 가장 크게 나타났다. dead weight와 pneumatic방법에서 하중이 294N으로 증가함에 따라 수직력의 변동값도 함께 증가 하였으나 hydraulic방법에서는 오히려 수직력의 변동값이 감소하였다. 이것은 hydraulic cylinder 내부 씨일재료의 영향 때문인 것으로 사료되었다

실제 마찰시험시 Dead weight 방식에서 시편 디스크의 surface irregularities, 즉 roughness, waviness, misalignment등 접촉면의 불균형 요인들이 하중부과 방향으로 변위를 일으키고 관성추를 상하로 요동시키며 이로 인한 관성력이 크게 작용하는 것을 확인할 수 있었다.

Pneumatic방식에서는 회전 주파수의 주기로 177, 294N에 대해 각각 약 47N, 82N의 아주 큰 변동량을 보이고 있었다. 이것은 디스크 시편의 표면 불균형 요인들에 의해 하중부과 방향의 변위가 발생하고 이에 따라 에너지 전달 매체로 사용되는 기체의 압축성으로 인하여 가압된 공기의 압력이 증가하고 감쇠계수의

증가에 의해 수직력 변동값이 크게 발생된 것으로 사료되었다. 이와 같이 디스크 시편의 표면 기울기는 하중부과 방향의 변위를 야기시켜 동하중을 발생시키고 그 정도가 클 경우에는 부과된 하중에 영향을 미쳐 실제 실험 결과와 다른 결과를 초래 할 수 있다는 것을 추정해 볼 수 있다. 이 결과는 Kong et al. [4]과 Yoon et al. [10,11]들이 실험한 결과와 유사하였다.

Hydraulic 방법에서는 하중의 증가 및 디스크 표면기울기에 따른 부하의 변위가 발생하더라도 유압실린더 끝에 장착된 load cell에서 검출되는 신호가 feed-back되어 피스톤의 변위를 수정하게 되고 결국 오차신호를 제어량의 목표치에 추종시키게되어 일정한 하중이 부과되는 것을 실험에서 확인할 수 있었다.

4. 결 론

Hydraulic방법을 비롯한 3가지 하중부과 방식을 선택적으로 사용할 수 있는 마멸 시험기를 이용해 하중, 미끄럼속도 특히 misalignment와 같은 디스크 시편의 기울기 변화를 인위적으로 주어 수직방향의 변위를 야기시켰을 때 각 하중부과 방법에 따른 수직력 변동을 측정하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Hydraulic 하중부과 방법은 surface irregularities와 같은 인자들에 의해 발생하는 하중부과 방향의 변위와 실제 마찰시험시 발생하는 진동등 다소의 외란이 존재하더라도 일정한 수직력 부과가 가능함을 알 수 있었다.

2. 미끄럼속도 변화에서 수직력의 변동량은 pneumatic 방법에서 가장 크고, 속도가 증가함에 따라 변동량이 증가하였으며 그 폭은 dead weight방법이 가장 크게 나타났다.

3. 디스크 표면 기울기를 크게 하였을 때 하중변화에 따른 수직력의 변동량은 pneumatic에서 가장 크고 하중이 증가함에 따라 변동량

이 증가하였으며, 그 폭은 dead weight방법이 가장 크게 나타났다. 그러나 hydraulic 방법에서는 하중 증가와 관계없이 수직력의 변동이 거의 일정함을 보였다.

4. 시편 디스크의 표면 불균형 요인들에 의해 야기되는 하중부과 방향의 변위는 동특성 인자와 연관되어 동하중을 발생시켜 실제 작용하는 수직력이 다르게 나타날 수 있음을 확인 하였으며, 디스크 시편의 기울기는 마찰시험시 반드시 고려해야할 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. D. M. Tolstoj, "significance of the normal degree of freedom and natural normal vibrations in contact friction," *Wear*, Vol. 10, pp. 199-213, 1963.
2. A. soom and C. Kim, " Interactions between dynamic normal and frictional forces during unlubricated sliding," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 221-229, 1983
3. J. A. Elder, Jr. and N. S. Eiss, Jr., "A study of the effect of normal stiffness on kinetic friction forces between two bodies in sliding contact," *ASLE Trans.*, Vol. 12, pp. 234-241, 1969.
4. 공호성, 윤의성, 권오관, 오재용, "마찰시험기의 시스템 동적변수 변화에 따른 미끄럼 마찰특성," *한국윤활학회지*, 제 11권, 제2호, pp. 44-55, 1995
5. Y. C. Chiou, K. Kato and T. Kayaba, "Effect of normal stiffness in loading system on wear of carbon steel part 1: severe-mild wear transition," *Journal of Tribology*, Vol. 107, pp. 491-495, 1985.
6. S. L. Rice, H. Nowotny and S. F. Wayne, "The role of specimen stiffness in sliding and impact wear," *Wear*, Vol. 77, pp.13-28, 1982
7. V. Aronov, A. F. D'Souza, S. Kalpakjian and I. Shareef, " Interactions among friction, wear, and system stiffness part 1: effect of normal load and system stiffness, part 2: vibrations induced by dry friction, part 3: wear model," *Journal of Tribology*, Vol. 106, pp. 54-69, 1984.
8. V. Aronov, A. F. D'Souza, S. Kalpakjian and I. Shareef, "Experimental investigation of the effect of system rigidity on wear and friction-induced vibrations," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 206-211, 1983.
9. Gee, M. G., *Guidelines for unlubricated sliding wear test: Part 1, general approach*, NPLreport DMM(A)96, April 1993
10. 윤의성, 공호성, 권오관, 오재용, "마찰시험기의 하중부과 방법과 수직방향 강성 변화에 따른 미끄럼 마찰특성 평가," *한국윤활학회지*, 제 12권, 제 2호, pp.55-64, 1996.
11. E. S. Yoon, H. S. Kong, O. K. Kwon and O. E. Oh, "Evaluation of frictional characteristics for a pin-on-disk apparatus with different dynamic parameters," *Wear*, Vol. 203-204, pp.341-349, 1997.