

유압식 마찰시험기의 성능 평가에 관한 실험적 비교 연구

서만식*, 구영필**, 조용주***

An Experimental Comparison Study on Performance Evaluation for the Hydraulic Pin-on-disk Type Tribotester

Man Sik Seo*, Young Pil Koo**, Yong Joo Cho***

ABSTRACT

For the purpose of improving accuracy in friction and wear test, a hydraulic pin-on-disk type tribotester was developed and its performance was evaluated experimentally. The performance estimation of the tribotester was accomplished by comparing both the consistency of the applied normal load and the robustness of the load control against the mechanical disturbances with those of the pneumatic and the dead weight loading method respectively. The developed hydraulic pin-on-disk type tribotester showed the better reliability in the performance and the hydraulic loading method provided the more accurate friction coefficient.

Key Words : Tribotester(트라이보테스터), Hydraulic(유압), Dead Weight(관성추), Pneumatic(공압), Friction Coefficient(마찰계수)

1. 서론

핀-온-디스크(pin-on-disk)형 마찰시험기는 마찰, 마멸시험에 많이 사용되는 시험기 중의 하나로서 이에 대한 시험평가방법^{1,2)} 및 기본 지침³⁾이 규정되어 있다.

일반적으로 핀-온-디스크(pin-on-disk)형태의 마찰, 마멸시험기에서 수직 하중부과 방법은 관성추(dead weight) 및 공압(pneumatic)을 이용한 방법이 많이 사용되고 있다. 이러한 하중부과 방법은 시스템 제어 측면에서 볼 때, 시편 디스크의 기하학적인 불균형 요인 즉 파상도(waviness), 편심(run-out)등에 의해 하중부과 방향으로 바람직하

지 않은 변위가 발생할 경우에, 관성 추에 의한 관성효과 또는 에너지 전달 매체로 사용되는 기체의 압축성으로 인한 가압공기의 강성(stiffness)과 감쇠계수의 변화 등 동특성 인자와 연관되어 동하중이 발생하게 된다. 이로 인해 원하는 형태의 수직하중을 부과하기가 어렵다. 이와 같은 현상의 원인은 여러 가지가 있으나 대표적인 이유 중 하나는 마찰 시험기 자체의 동특성으로 인하여 두 물체 사이에 작용하는 접촉하중이 실험조건(공칭하중)과 다르게 부과되기 때문이다. 이러한 시험기 자체의 동특성의 차이에 기인한 접촉하중의 변화를 줄이기 위해 시험기 자체의 질량관성이나 감쇠 또는 강성의 변화에 따른 수직하중 및 마찰계수의 변동에 대

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 대학원
*** 부산대학교 기계공학부

한 연구가 많이 이루어져 왔다.¹⁴⁻⁵¹ 그러나 접촉하중을 실험조건에 좀 더 정확하게 일치시키기 위해서는 보다 적극적인 하중의 제어가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 다양한 형태의 수직하중 부하가 가능하고, 마찰소재의 부착으로 인한 편심, 표면조건, 운동의 형태, 및 외부환경 등에 의한 외란이 발생하더라도 고정도(high accuracy)의 제어에 의해 원하는 형태의 수직하중을 일정하게 부과할 수 있는 유압식 마찰시험기¹⁶⁾를 사용하여 실험조건과 일치하는 제어된 접촉하중과 관성 추 또는 공압을 사용한 제어되지 않은 접촉하중의 변동이 마찰계수에 미치는 영향을 측정하고 비교 평가하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험을 위해 제작된 유압식 핀-온-디스크형 마찰시험기는 선행된 연구¹⁶⁾를 통해 하중부과 장치부의 설계를 수정한 것으로서, 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다.

유압 파워 장치로서 전동기로 구동되는 정용량형 유압펌프를 사용하였으며, 고정도의 제어를 위해 제어밸브로는 속도성 및 제어 정도가 뛰어난 서보밸브(servo valve)를 사용하였다. 수직하중 부하를 위해 복동식 비대칭형 유압 실린더를 사용하였고, 실린더의 로드 끝에 로드셀(load cell) (a)

Table 1 List of experimental instruments

Instrument	Specification
Electric Motor	0.4[kW], 220[V]
Hydraulic Pump	35[kg/cm ²], 15 l/min
Hydraulic Cylinder	φ 20 × l 54
Servo Valve	19[l /min]
Servo Amp	250[mA/V]
Pneumatic Cylinder	φ 32 × l 45
Solenoid Valve	8.15[kg/cm ²]
I/O Device	PCL-718

를 부착하여 수직력을 측정하였다. 마찰력은 지렛대의 원리를 이용하여 레버(lever)의 끝에 로드셀(b)를 설치한 가압장치를 구성하여 측정하였다.

핀(pin)과 디스크(disk) 시편 사이에 작용하는 수직력과 마찰력은 각각 로드셀(a), (b)로 측정되고, 측정된 신호는 동적신호증폭기(dynamic strain amplifier)에 의해 증폭되어 내장된 저역통과필터(low pass filter)를 통하여 고주파 성분의 노이즈(noise)를 제거한 후 12bit A/D 컨버터(converter)를 통해 디지털(digital)신호로 변환되어 PC에 저장됨으로써 실시간 측정이 이루어지도록 하였다.

접촉트랙에서 마멸입자의 귀속(entrapment)으로

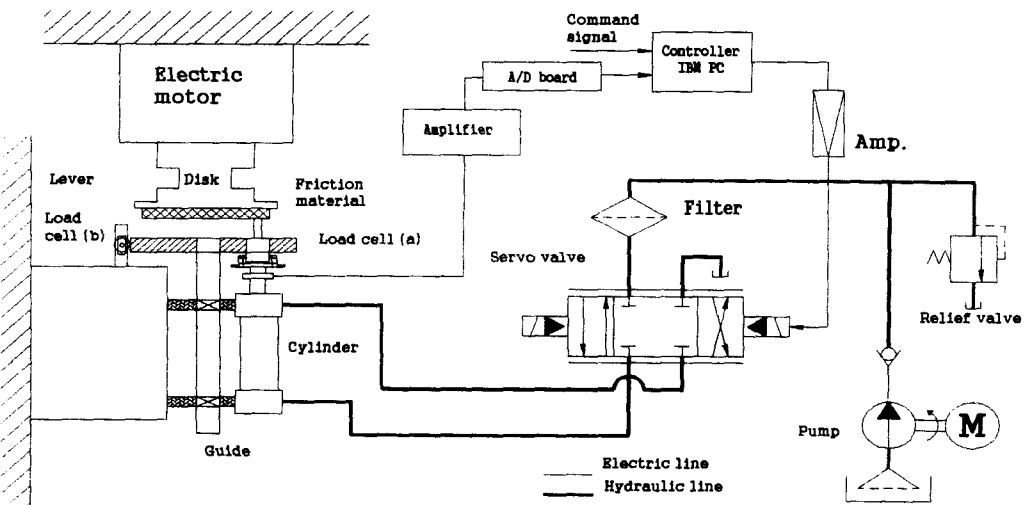


Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic pin-on-disk type wear test system

인한 간섭현상을 줄이기 위해 시편 디스크(disk)가 수평면과 수직으로 회전하고 그 위에 편이 가압되는 방식으로 하였으며, 하중부과 방법 변경을 위해 시험조건에 따라 유압실린더를 제거하고 공압 실린더와 관성 추를 선택적으로 사용 가능하도록 설계하였다. 관성 추의 경우는 유압 실린더 크기와 동일하게 지그를 제작하고 레버를 설치하여 한쪽 끝에 관성 추를 달아 하중을 부과하도록 하였으며 로드셀을 통해 하중을 검증하였다. Table 1에 하중부과 장치의 구성부품에 대한 제원을 나타내었다.

2.2 실험방법

본 실험에서 사용한 편과 디스크의 재질은 SM45C(Hv 225± 10)로서, 직경 100mm, 두께 10mm 디스크와 직경 8mm, 길이 7mm 편을 사용하였다. 시험 디스크는 평면 연삭가공 후 폴리싱(polishing) 하여 표면 거칠기를 약 0.03 μm(Ra)로 하였다. 디스크 위의 접촉트랙 반경은 40mm이며 주축의 회전속도를 달리하여 시험속도를 변화시켰다. 모든 시험 조건은 경계윤활로 하였으며 동점도가 68 cSt인 윤활유를 사용하였다.

본 연구에서는 각 하중부과 방법에 대한 외란의 영향을 조사하기 위하여 다음과 같이 실험을 수행하였다. $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-4}$ 의 디스크 시편 경사도에 대해 0.008, 0.06, 0.42m/s의 미끄럼속도에서 하중 177, 314N의 실험조건을 설정하여 각 하중부과 방법에 따른 마찰특성에 관하여 측정 평가하였다. 또한 시편 디스크를 홀더에 장착시킬 때 인위적인 기울기 $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ 을 주고 미끄럼속도 0.004, 0.008, 0.06, 0.42m/s, 하중 177, 314N의 조건에서 각 하중부과 방법에 따른 마찰특성에 관하여 측정 평가하였다. 특히 일정 수직하중을 부과하는 유압방식과 반복 수직하중을 부과하는 공압

방식을 상호 비교함으로써 수직하중의 형태가 접촉부에 작용하는 실질 마찰력 및 마찰계수에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3가지 하중부과 방법에서 수직하중의 변화를 주었을 때 수직력과 마찰력의 변동특성을 알아보고, 일정 수직하중과 반복 수직하중과 같은 하중의 형태가 마찰특성에 미치는 영향에 대해 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

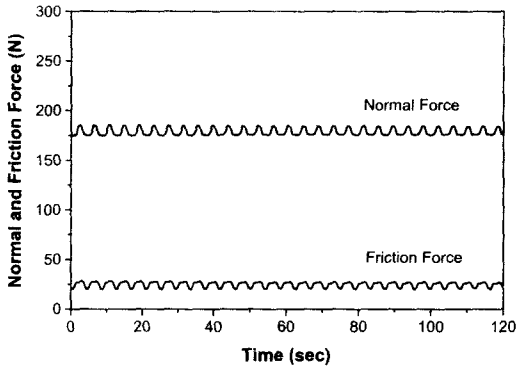
Fig. 2는 $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-4}$ 의 시편 디스크의 경사도와 미끄럼속도 0.06m/s, 하중 177N의 조건에서 수직력과 마찰력을 측정할 결과이다. 하중부과 방법에 따른 수직력의 변동량은 RMS 값으로 구했다. 공압에 의한 것이 21N, 관성 추 5N, 유압 0.5N으로 유압방식이 가장 작게 나타났다. 관성 추와 공압을 이용한 방법에서 디스크 시편의 기울기는 하중부과 방향으로 변위를 발생시키고, 접촉부의 접촉하중과 마찰력에 영향을 미친 것으로 사료된다. 또한 수직하중의 변동량은 디스크 회전 속도 성분과 함께 변동되고, 마찰력과 같은 위상과 주기로 변동됨을 볼 수 있다. 그러나 유압에 의한 하중부과 방법은 순간 수직력을 산술 평균하였을 때 그 편차가 아주 작았으며 접촉부의 접촉하중 변동이 발생하더라도 고정도의 압력제어로 안정된 수직하중이 부과됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 디스크 시편에 $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ 의 경사도를 인위적으로 주고 하중 314N, 미끄럼속도 0.004m/s의 저속도에서 3가지 하중부과 방법별로 실험한 결과이다.

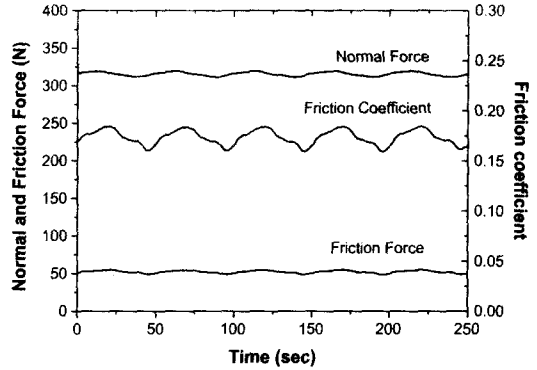
상대적으로 $\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ 의 큰 기울기를 주었을 때 수직력의 변동량은 관성 추를 이용한 방

Table 2 Comparison of friction coefficient under the dead weight, pneumatic, and hydraulic loading method (177/314N)

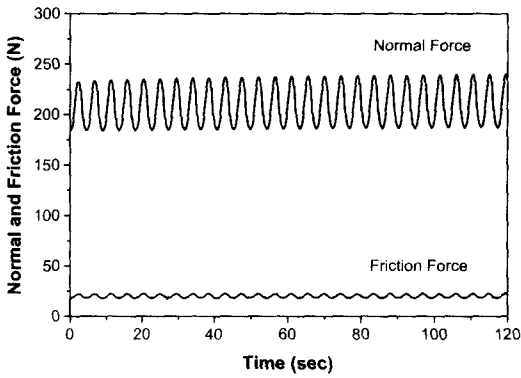
Friction coefficient				
Loading method		Dead weight	Pneumatic	Hydraulic
Sliding velocity	0.004m/s	0.159 / 0.173	0.124 / 0.135	0.133 / 0.147
	0.008m/s	0.154 / 0.163	0.111 / 0.129	0.120 / 0.132
	0.06m/s	0.141 / 0.157	0.090 / 0.112	0.109 / 0.121
	0.42m/s	0.136 / 0.148	0.077 / 0.099	0.092 / 0.112



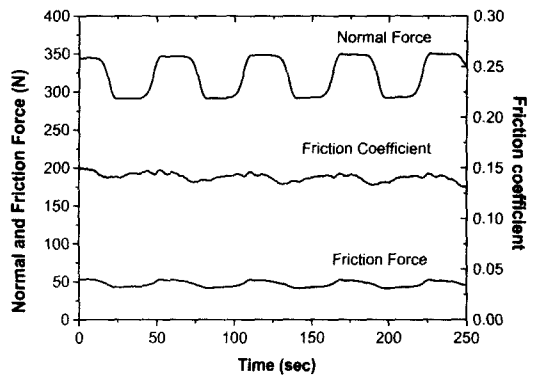
(a) Dead weight



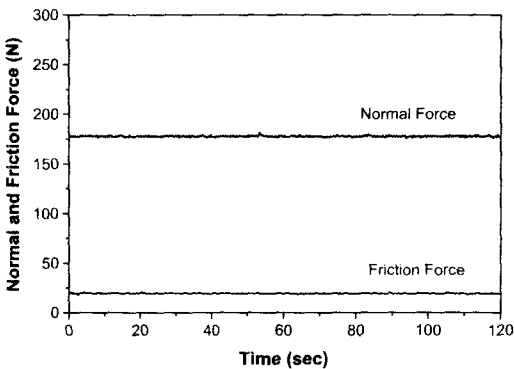
(a) Dead weight



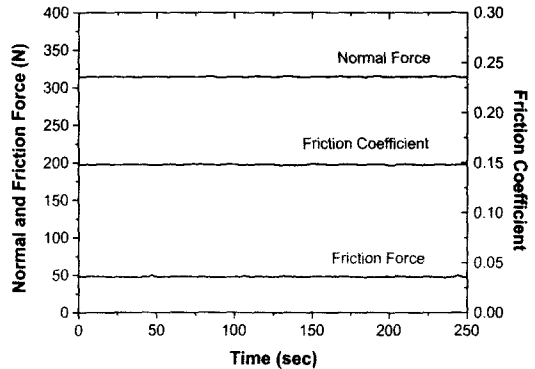
(b) Pneumatic



(b) Pneumatic



(c) Hydraulic



(c) Hydraulic

Fig. 2 Normal and friction force measured with load cell in (a)dead weight, (b)pneumatic and (c)hydraulic loading method

Fig. 3 Frictional characteristics in different loading methods for the disk flatness ($\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$)

법에서 8N의 변동량을 보였다. 공압을 이용한 방법은 디스크 불균형 요인에 의한 하중부과 방향의 변위 발생에 따라 에너지 전달 매체로 사용되는 가압 공기의 강성과 감쇠계수의 증가에 의해 회전속도의 주기로 31N의 큰 변동량을 보였다. 그러나 유압을 이용한 방법은 하중 증가 및 디스크 표면 기울기에 따른 변위가 발생하더라도 유압 실린더 끝에 장착된 로드셀 (a)에서 검출되는 하중신호가 피드백 (feed back)되어 피스톤의 변위를 수정하고 결국 오차 신호를 제어량의 목표치에 추종시켜 거의 일정한 하중이 부과됨을 확인할 수 있다. Table 2는

$\tan \phi = 7.5 \times 10^{-3}$ 의 인위적인 기울기를 주었을 때 미끄럼속도 0.004, 0.008, 0.06, 0.42m/s 하중 177, 314N에 대해 평균 마찰계수를 나타내고 있다. 마찰계수는 순간적 수직력과 마찰력으로부터 산출된 마찰계수를 평균하는 방법으로 산출하였다. 관성 추에 의한 하중부과 방법은 질량효과에 의한 관성력의 증가로 인해 Table 2에서 보여주는 것처럼 0.173으로 가장 크게 나타났다. 고정도의 제어에 의해 일정하중을 부과하는 유압방식은 0.147로 나타났다고, 수직하중의 변동량이 가장 크게 나타났던 공압 방식은 0.135로 가장 작게 나타났다. Fig. 3에서 관성 추와 공압을 이용한 방법에서 변동하는 접촉하중의 영향이 마찰력에서 나타나고 있으며, 수직력과 같은 위상과 주기로 변동하고 있음을 볼 수 있다. 또한 접촉하중의 변동량은 하중부과 방법에 따른 동특성과 연관되어 실제 접촉부의 접촉력에 변화를 초래하는 원인이 되고, 마찰계수에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉 마찰계수는 접촉하중과 종속적인 관계이며, 또한 하중부과 방법에 따른 동특성의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

본 실험에서 하중부과 방법에 따른 마찰계수의 신뢰성을 평가하기 위해 다음과 같은 실험조건으로 비교해 보았다. 핀과 디스크 사이에 작용하는 실제 접촉하중은 로드셀 (a)로 통해 출력된 하중 값이다. 공압 방식에서 로드셀 (a)로 출력된 접촉하중 값을 유압방식에서 기준입력 값으로 취하여 Fig. 3의 (b)와 동일한 실험조건으로 공압에서 나타난 실제 접촉하중을 재현하였다. 앞서 유압방식에서 공압의 반복 접촉하중을 재현하고, 최적의 제어상태를 보상하기 위해 다음과 같은 과정을 수행했다.

함수발생기(function generator)를 통해 1.67Hz

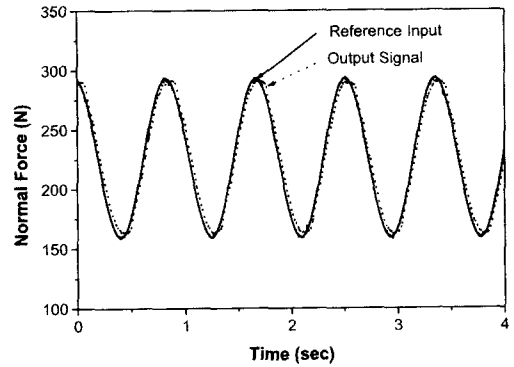


Fig. 4 Output normal force and reference input for a fixed disk

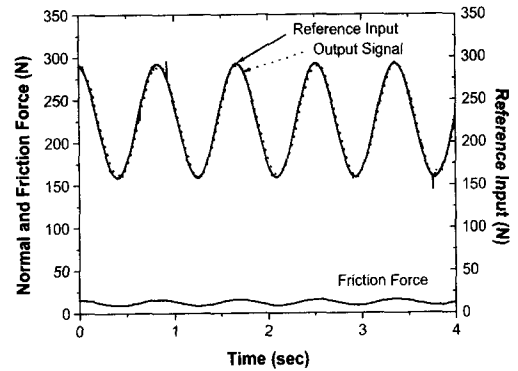


Fig. 5 Output normal force and reference input for a rotational disk

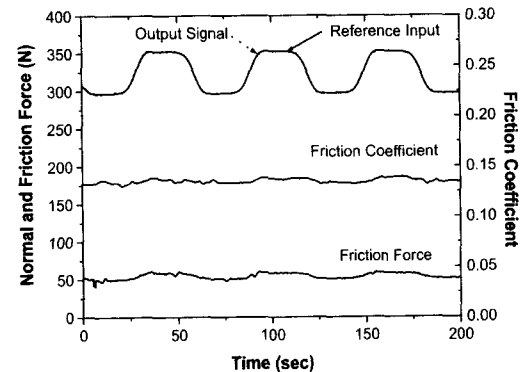


Fig. 6 Friction in hydraulic loading method for the same normal load as in pneumatic loading method

의 사인 파를 생성하여 PID게인(gain)값을 조정하였다. Fig. 4는 디스크 정지 시 PID게인 값을 조정 한 것이고 Fig. 5는 디스크를 100rpm으로 회전하였을 때 PID게인 값을 조정 및 제어한 경우를 나타낸다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 유압에 의한 하중부과 방법은 기준입력 신호에 대해 출력 신호가 양호하게 제어됨을 볼 수 있다. 조정된 PID게인 값을 이용하여 상기 실험조건으로 재현하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

기준입력에 대한 출력 값이 거의 일치하는 제어 성능을 보여주고 있다. 하중부과 방법이 다르더라도 로드셀 (a)로 측정 한 하중이 같다면 접촉하중이 거의 같다고 볼 수 있다. Fig. 6에서 유압방식에 의해 재현한 로드셀의 신호는 수직력과 마찰력이 같은 위상과 주기로 변함을 확인할 수 있다. 이것은 접촉부에서 발생하는 접촉하중의 변동이 마찰력에도 영향을 미치는 것을 의미한다.

마찰계수를 산술 평균하였을 때 약 0.135로 공압에 의한 방법과 일치하였다. 로드셀 (a)를 통하여 부과되는 반복 접촉하중을 동일한 시험기에서 유압에 의한 하중부과 방법으로 재현하더라도 마찰계수 값이 일치한다는 것은 접촉하중이 거의 동일하게 부과되고 있음을 알 수 있으며, 유압식 마찰 시험기의 제어 성능이 우수하다는 것을 유추해 볼 수 있다. 평균 마찰계수 값은 0.147로 공압방식의 0.135보다 다소 차이가 나타남을 실험으로 알 수 있었다. 이것은 시편 디스크의 기울기와 같은 기하학적인 불균형 요인이 원인 되어 하중부과 방향으로 변위를 발생시킨다. 발생된 변위는 가압공기의 압력을 증가시키고, 가압공기의 강성과 감쇠계수의 증가를 초래해 수직하중의 변동을 유발한다. 이러한 수직하중의 변동은 접촉부에서 실제 접촉하중과 마찰력에 영향을 미치고, 또한 하중부과 방법에 따른 동특성 즉 감쇠와 연관되어 마찰계수가 오히려 작게 측정되었기 때문이다.

4. 결론

고정도(high accuracy)의 제어에 의해 원하는 형태의 수직하중을 일정하게 부과할 수 있는 유압식 마찰시험기를 개발하여 기존의 하중부과 방법인 관성 추, 공압을 이용한 방법과 실험적으로 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유압에 의한 하중부과 방법은 시편 디스크의 거칠기(roughness), 파상도(waviness), 편심(run out)과 같은 불균형 요인에 의해 하중부과 방향으로 변위가 발생하더라도 고정도의 압력제어로 접촉부에 작용하는 실질접촉하중을 제어하여 일정한 수직하중 부과가 가능하고, 다양한 형태의 수직하중을 부과할 수 있었다.

2. 유압식 마찰시험기의 성능을 평가하기 위하여 공압식과 같은 형태의 접촉하중을 부과하여 마찰력을 비교한 바 그 성능에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

3. 유압에 의한 하중부과 방법은 다른 하중부과 방식에 비하여 수직하중을 정확히 제어함으로써 훨씬 정확한 마찰계수를 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 부산대학교 기성희 재원 학술연구소 성비에 의한 연구임.

참고문헌

1. ASTM standards G40-95, "Standard Terminology Relating to Wear and Erosion," Vol 03.02, pp. 160-166.
2. ASTM standards G99-95a, "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus," Vol 03.02, pp. 399-403.
3. Gee, M. G., "Guidelines for unlubricated sliding wear test part 1: general approach, part 2: procedures for pin-on-disc testing," NPL report DMM (A)96, 97, April 1993.
4. 윤의성, 공호성, 권오관, 오재응, "마찰시험기의 하중 부과 방법과 수직방향 강성 변화에 따른 미끄럼 마찰특성 평가," 한국윤활학회지, 제 12권, 제 2호, pp. 55-64, 1996.
5. D. M. Tolstoi, "significance of the normal degree of freedom and natural normal vibrations in contact friction," Wear, Vol. 10, pp. 199-213, 1963.
6. 서만식, 구영필, 조용주, "마찰시험기의 하중부과 방법에 대한 비교 연구," 한국윤활학회, 제 27회, 춘계학술대회 pp. 335-341, 1998.