

다축 힘센서를 이용한 마찰계수 실시간 측정방법 연구

권현준*, 권영하, 박경희, 오택열, 백영남 (경희대학교 테크노 공학 대학)

A Study on Real Time Measurement of Frictional Coefficients by using Multi-components Load Cell

Hyun Joon Kwon, Young Ha Kwon, Kyung Hee Park, Tack Yeul Oh, Young Nam Back
College of Advanced Technology, Kyung Hee University

ABSTRACT

This study describes the real-time measurement system which consist of multi-components load cell and linear motor. Operations and data acquisition is controlled by PC. Multi-components load cell measures simultaneously the vertical force F_z and frictional force F_x when contactors move on sample surface. Linear motor is used to translate with constant speed without vibration. The frictional coefficient is calculated by Matlab™. The frictional coefficients between Al. plates, and fingertip and fabrics are measured.

Key Words : 마찰계수 (Frictional coefficient), 다축 힘센서 (Multi-components load cell),
리니어 모터(Linear motor)

1. 서론

기계나 공정에서는 마찰력의 감소효과를 최소화하고자 한다. 예를 들면 모든 유형의 베어링, 동력 나사, 기어, 관내에서의 유체의 흐름, 대기 중에서 비행기나 미사일의 추진 등을 들 수 있다. 한편 브레이크, 클러치, 벨트구동, 쇄기 등 다른 경우에는 마찰의 사용을 극대화하기도 한다. 차량은 출발과 정지모두 마찰에 의존하고, 일상의 보행과 같은 운동은 신발과 지면 사이의 마찰에 의존한다. 마찰력은 자연계 도처에 존재한다.

마찰의 형태에는 두 가지가 있다. 쿨롱마찰(Coulomb friction)이라고 하는 건조마찰(dry friction)과 유체마찰이 있다. 건조마찰은 두 고체의 윤활하지 않은 표면이 서로 미끄러지거나 그러한 경향을 갖고 접촉하는 경우에 발생한다. 본 연구에서는 건조마찰 상태에서의 실시간 동마찰계수 측정을 목적으로 한다. 미끄러움이 일어난 후부터는 동마찰(kinetic friction)조건이 계속되는 운동에 관계된다. 동마찰력은 보통 최대정지 마찰력보다

약간 작다. 동마찰력도 수직력에 비례한다. 속도가 증가하게 되면 동마찰계수는 약간 감소하게 된다. 그러므로 $F=\mu N$ 의 동마찰을 측정하기 위해서는 실시간으로 수직하중과 마찰력의 동시 측정이 필요하다.

마찰계수는 서로 접촉하는 한 쌍의 표면에 대한 거칠기를 반영하고 접촉면들의 기하학적 성질을 내포한다. 또한 기름, 먼지, 이물질등의 피막과 국부적인 고온발생, 접촉점에서의 간이 상대 경도차등이 있으나 본 실험의 특성상 이와 같은 변수들은 제외한다.

기존의 마찰계수 측정기는 금속 등의 불질을 접촉자로 사용하여 마찰력을 측정하였다. 또한 측정하고자하는 대상물에 따라 각기 다른 특성과 접촉자를 가진 마찰계수 측정장치가 사용되어야 한다. 본 연구에서는 다양한 접촉자를 사용할 수 있고 동시에 직접 손끝으로 문지를 때 나타나는 마찰력을 실시간으로 측정할 수 있도록 다축 힘센서 등을 이용한 측정장치를 개발하였다.

2. 실험

2.1 측정장치

측정장치는 Fig. 1과 같이 다축 힘센서와 리니어 모터로 구성되어 있으며, 측정 및 구동은 컴퓨터에 의해 자동으로 처리되도록 하였다. 다축 힘센서는 하나의 몸체에서 여러 방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 특징이 있다. 이를 이용하면 동마찰의 수직힘과 마찰력을 동시에 실시간으로 측정할 수 있다.

다축 힘센서는 스트레인 게이지를 이용한 센서로서 x방향(F_x)과 z방향(F_z)의 힘을 동시에 측정할 수 있도록 구성하였다. x방향의 힘 측정 센서는 접촉자가 시료를 누르며 움직일 때 마찰력을 측정하며, z 방향의 힘 측정 센서는 시료의 수직 힘을 측정하여 서로 비를 구함으로써 마찰계수를 결정할 수 있도록 하였다. 이 경우 한 방향의 힘 또는 모멘트만이 가해질 때 다른 방향들의 힘 또는 모멘트를 감지하는 출력 값이 모두 0이 되어야 하는데 이 출력 값이 0이 되지 않을 때 생기는 오차를 상호간섭 오차(coupling error 혹은 interference error)라 한다. 다축 힘센서에서는 상호간섭 오차가 비직선성, 재현도, 하중이력 등의 일반적인 특성에 비해 크므로 다축 힘센서의 설계에서는 가장 중요하게 고려되어야 한다. 특히 x 방향의 힘의 측정은 z 방향에 영향을 받으므로 실제 x방향(마찰력)의 힘은 다음과 같은 교정에 의해 얻은 식 $F_x = F_x \text{측정값} - 0.015 \times F_z$ 으로 보정 하였다. 본 연구에 사용된 특수하게 설계 제작된 다축 힘센서는 x 방향의 용량이 1N으로 0.1% 이내의 정밀정확도를 유지하고, z 방향의 용량이 10N으로 0.04% 이내의 정밀정확도를 유지한다.

리니어 모터는 접촉자를 고정시켜 누른 상태에서 시료를 등속으로 움직이는데 사용하였다. AC 모터나 DC 모터를 일반적인 베어링으로 제작된 이동장치와 같이 사용하면 진동이나 상하 움직임이 있고 등속을 정확하게 유지할 수 없으므로 리니어 모터를 사용하였다. 사용된 리니어 모터는 최대 이동거리 175mm, 위치 분해능 1 μ m, 위치정밀도 4 μ m, 속도 0.001m/s - 3m/s 특성이 있어 마찰계수의 측정에 오차를 줄일 수 있는 특수한 장치로 판단된다.

다축 힘센서에서 나오는 신호는 외부 잡음을 제거하고 신호를 증폭시켜 정확한 힘을 측정할 수 있도록 Instruments Division의 Signal conditioning Amplifier를 사용하였다. 데이터의 처리는 National Instrument보드, Pentium4 2.0G가 사용되었다.

2.2 마찰계수 측정

실시간으로 마찰계수를 측정할 수 있도록 구성된 시스템을 이용하여 알루미늄과 알루미늄 사이의 마찰계수를 측정하였으며, 인간의 촉감에 가장 영향을 미치는 손끝 피부의 마찰계수를 측정하였다. 부드러운면으로 되어 있는 100x40mm의 알루미늄판은 다축 힘센서위에 시료를 고정시키기 위하여 사용되었다. 시료의 마찰계수는 평판위에 고정된 샘플을 통하여 측정되었다. 시료는 홀더로 고정되었다. 수직힘은 추와 손끝을이용, 일정한 힘이 가해지도록 하였다. DAQ를 통하여 받아들인 데이터는 Matlab™을 이용처리하였다.

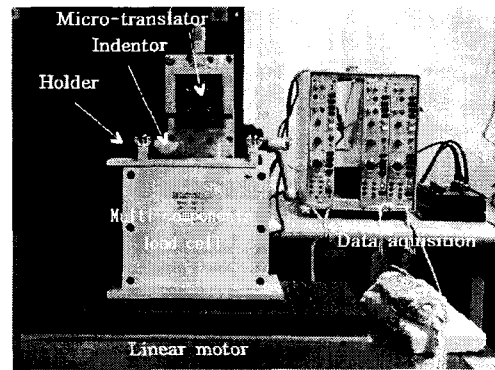


Fig.1 Constitution of real-time measurement System for frictional coefficient.

3.1 알루미늄의 마찰계수

알루미늄과 알루미늄사이의 속도의 변화에 따른 실시간 마찰계수를 측정하였다. 1N의 수직힘이 가해진 상태에서 속도를 각각 1 mm/sec, 2 mm/sec, 3 mm/sec, 5 mm/sec 의 4가지로 변화시키며 측정하였다. 접촉자의 넓이는 314mm²인 원판형 알루미늄이 사용되었다. 측정 data는 F_x, F_z 의 상호비를 통하여 마찰계수로 나타난다. Fig. 2는 수직힘(F_z)와 마찰력(F_x)와 마찰계수(μ)의 실시간 스펙트럼이다. 측정은 80mm를 리니어 모터로 이동하며 이루어졌으며, data의 수집은 F_z, F_x 와 비인 마찰계수로 PC에서 200Hz의 속도로 이루어 졌다.

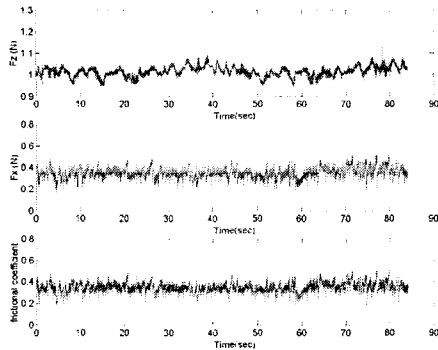


Fig. 2 Spectrum of frictional force and frictional coefficient.

그림에서와 같이 일정한 수직힘을 가한 상태에서 동적으로 움직이게 되면, 표면의 거칠기의 상태에 따라 진동과 마찰력의 변화를 보여주게 된다. Table 1에 마찰속도에 따른 마찰계수와 SMD (Standard Mean Deviation)를 나타내었고 Fig.3는 마찰속도에 따른 마찰계수를 나타낸다.

Table 1 Frictional coefficients between Al. according to the variable speeds.

Number of times	1 mm/sec		2 mm/sec		3 mm/sec		5 mm/sec	
	μ	SMD	μ	SMD	μ	SMD	μ	SMD
1	0.347	0.048	0.387	0.057	0.370	0.063	0.399	0.065
2	0.351	0.055	0.400	0.061	0.371	0.066	0.417	0.057
3	0.332	0.049	0.412	0.065	0.427	0.068	0.397	0.064
4	0.340	0.049	0.401	0.063	0.411	0.073	0.405	0.067
5	0.334	0.045	0.392	0.061	0.406	0.068	0.398	0.062
6	0.346	0.046	0.395	0.076	0.389	0.067	0.414	0.073
7	0.362	0.051	0.401	0.060	0.361	0.061	0.385	0.060
8	0.368	0.048	0.399	0.069	0.387	0.078	0.403	0.072
9	0.411	0.055	0.405	0.070	0.389	0.065	0.381	0.063
10	0.403	0.058	0.397	0.067	0.400	0.077	0.389	0.061
Mean	0.359	0.050	0.399	0.065	0.391	0.069	0.389	0.065

실시간으로 측정된 알루미늄과 알루미늄 사이의 마찰계수는 0.35에서 0.39이며 SMD는 약0.05로서 비교적 측정의 변화가 적은 것을 알수 있었다. 속도의 증가에 따라 약간의 마찰계수의 증가를 보이고 있으나 큰 변화는 없었다.

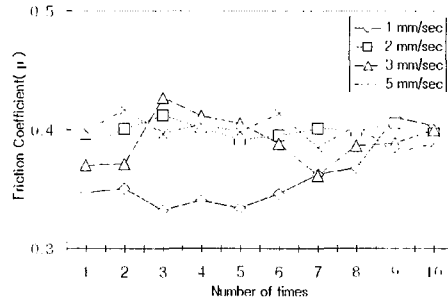


Fig. 3 Relation between frictional coefficients and moving speed.

Fig. 2의 스펙트럼을 확대해보면 표면의 상태에 따른 마찰계수의 진동현상을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 마찰면의 재료의 가공에 따른 표면의 거칠기에 따라 마찰계수값이 50%정도 변화하며 일정한 주기로 진동을 하고 있었다. Fig.4는 Fig.2의 Fx(마찰력)의 일부를 확대한 스펙트럼이며, Fig.5는 시료와 접촉자를 200배 확대하여 촬영한 사진이다. 사진에서 보여지는 것과 같이 가공중에 나타난 거칠기의 일정한 주기를 갖고 있는 표면이 서로 마찰할 때 Fig.4와 같이 진동하는 현상을 만들어 낸다고 판단된다.

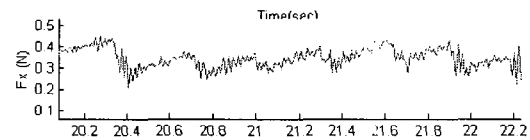
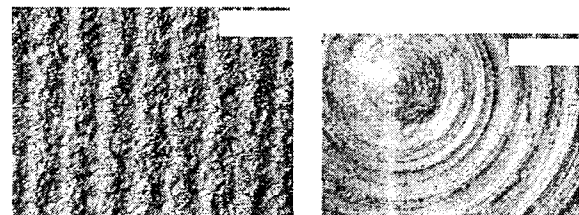


Fig.4 Spectrum of frictional force.



(a) Sample

(b) Indentor

Fig.5 Microscopic photographs of sample surfaces.

3.2 손끝의 마찰계수

본 연구의 다축 힘센서로 구성된 마찰계수 실시간 측정 장치는 임의의 접촉자를 응용할 수 있으므로 직접 손끝을 이용한 마찰계수를 실시간으로 측정할 수 있다. 이러한 장점은 머리카락이나 피부등을 직접 측정에 응용될 수 있다.

실시간으로 마찰계수를 측정할 수 있는 장치를 이용하여 손끝이 직물을 문지를 때 나타나는 마찰계수의 변화를 측정하였다. 속도는 각각 1cm/sec, 5cm/sec, 10cm/sec의 3가지로 측정하였다. 직물의 마찰계수를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 리니어모터 위에 고정된 다축 힘센서 위에 20 gf의 인장을 가한 상태에서 직물을 고정시키고 손끝으로 가볍게 가한 일정한 힘으로 누른 상태에서 리니어 모터를 일정한 속도로 움직이며 F_x 와 F_z 의 값을 측정하였다. F_z 값은 직접사람이 누르는 힘으로 약 0.5N은 유지하도록 하였으나 Fig. 6과 같이 시간에 따라 변화가 나타나고 있다.

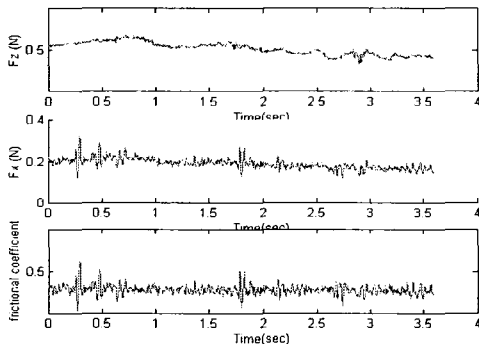


Fig. 6 Spectrum of friction force and frictional coefficient.

F_x (마찰력)은 F_z 에 비교적 비례하며 계산된 마찰계수는 Table 2에 나타내었고 Fig. 7에 마찰속도에 따른 마찰계수를 나타내었다. 직물과 손끝과의 마찰계수는 문지르는 속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 원인은 손끝과 직물은 점탄성 성질을 갖고 있으므로 속도의 변화에 변형의 형태가 바뀌며 접촉면적이 감소하여 나타나는 현상으로 판단된다.

Table 2 Frictional coefficients between fingertip and fabric according to the variable speeds.

Number of times	1cm/sec		5cm/sec		10cm/sec	
	μ	SMD	μ	SMD	μ	SMD
1	0.369	0.032	0.305	0.053	0.314	0.073
2	0.342	0.035			0.288	0.072
3	0.316	0.032	0.288	0.066	0.288	0.055
mean	0.342	0.033	0.327	0.060	0.296	0.066

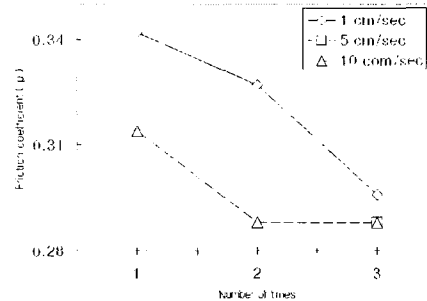


Fig. 7 Relation between frictional coefficients and moving speed.

다른 응용의 예로 손끝이 머리카락을 문지를 때 느끼는 촉감은 두 표면 사이의 마찰계수에 따라 다르게 나타나므로 실시간으로 손끝과 머리카락의 마찰계수를 측정하였다. Fig. 8는 직접 손끝을 이용하여 측정된 머리카락의 마찰력과 마찰계수의 실시간 스펙트럼이다.

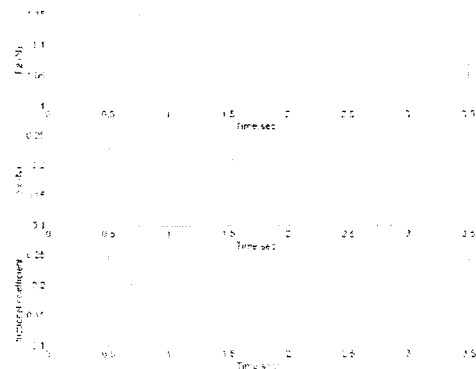


Fig. 8 Spectrum of frictional force and friction coefficient.

4. 결론

다축 힘센서를 이용한 마찰계수 실시간 측정방법을 연구하였다. 마찰계수를 실시간으로 측정하기 위하여 다축 힘센서에서 나오는 수직힘(F_z)과 마찰력(F_x)을 이용하였다. 실험장치를 구성함에 있어 다축힘센서, 리니어 모터, 데이터 획득 보드, PC 만을 이용하여 구성하였다.

알루미늄의 마찰계수는 약 0.35에서 0.39이며 마찰계수의 SMD 는 0.05정도 된다. 손끝과 직물과의 마찰계수는 약 0.36이며 마찰계수의 SMD는 약 0.05정도이며 손끝과 머리카락과의 마찰계수는 약 0.2로서 비교적 정확한 측정이 가능하였다.

본 연구의 측정장치는 마찰계수를 실시간으로 표면상태에 관계없이 측정이 가능한 장치로 판단된다. 더욱이 손끝과 직물 또는 머리카락등의 마찰계수를 실시간으로 정량적인 측정을 할 수 있으므로 다양한 응용범위를 갖고 있다.

참고문헌

1. Friction surface phenomena / George P. Shpenkov. Amsterdam ; New York : Elsevier, c1995.
2. Influence of Surface Roughness on Friction Properties (Part 1): Relationship between Indented Depth and Friction Coefficient (2000) Ishizuka, S; Mizutani, Y
3. Measurement of static friction coefficient between flat surfaces(1996) Dunkin, J E; Kim, D E
4. The Effect of Small Normal Loads on the Static Friction Coefficient for Very Smooth Surfaces (92-Trib-11)(1993) Etsion, I; Amit, M
5. Characteristics of Friction in Small Contact Surface: Effect of Normal Load on Coefficient of Friction(1993) Andoh, Y; Ogawa, H; Ishikawa, Y; Kitahara, T
6. Engineering mechanics: Statics J.L MERIAM, L.G. KRAIGE