

휴대용 마찰계수 시험기 구현

(Realization of A Portable Friction Coefficient Tester)

서 상 윤¹⁾, 유 준^{2)*}

(Sang Woon Seo and Joon Lyou)

요 약 최근 재료의 물성평가에 있어 표면마찰 특성이 많이 요구되고 있는 바, 본 연구에서는 휴대 가능한 보급형 마찰계수 시험기의 개발을 다루며, 이는 기구 설계 및 적용, 측정회로의 설계 및 배치, 마이크로프로세서 기반 펌웨어의 구성을 포함한다. 또한 기존의 규격 시험기와 성능 비교를 통하여 본 휴대용 마찰계수 시험기의 실 적용성을 보였다.

핵심주제어 : 마찰계수, 수직항력, 로드셀, 마이크로프로세서

Abstract Recently in the evaluation of physical properties of a material, its surface friction characteristics is much required. This study treats the development of portable and affordable friction coefficient tester, which includes utensil design and application, measurement circuit design and layout, and microprocessor based firmware building. Also, real applicability of the present portable friction coefficient tester has been shown via performance comparisons with the existing standard tester.

Key Words : Friction coefficient tester, Portable, Loadcell, Microprocessor based

1. 서 론

마찰의 실체를 규명하기 위하여 많은 기기를 연구하여 왔으나, 이상적인 기기 개발의 어려움과 측정 데이터 또한 그 범위가 너무 크므로 실용상 많은 어려움이 있었다. 또한 일반적으로 마찰계수를 측정하는 장치는 정확한 시험을 위한 조건으로 진동과 흔들림이 없는 위치에 자리하여 시험하는 것을 원칙으로 한다[1]. 하지만 이러한 조건을 만족하기 위해서는 시험을 위한 시험편의 중요성이 우선 시 된다. 그 이유는 일정한 규격

과 환경적인 분위기 등이 만족하여야만 시험을 할 수 있기 때문에 사용자들이 직접 생산하고 있는 재료의 시험을 위해서는 또 다른 형태의 가공이 필요로 하며, 일반적인 마찰계수 측정 장치의 판매가가 상당히 높은 것이 현실이다. 따라서 본 기술 개발은 다양한 형태의 시험편 혹은 직접 생산하고 있는 재료의 형태에서 마찰계수 측정이 가능한 장비를 구현하여 소재 산업 및 산업요소 부품의 신뢰성 평가에 많은 활용이 예상된다[2]. 또한 실 사용자들의 시험기 구입의 예산 및 장치 제작에 많은 경제적 절감효과를 볼 수 있으며, 휴대가 가능한 시험장치의 특성상 직접 현장에서 다양한 조건의 시험이 가능하다. 또한 저가장비의 산업체 현장과 학계의 공급으로 이를 이용한 결과를 바탕으로 생산부품의 내구성 향상도 기대

* Corresponding Author : jlyou@cnu.ac.kr

Manuscript received Jun 11, 2015 / revised Jun 30, 2015 / accepted Aug 07, 2015

1) 충남대학교 산업시스템공학과, 제1저자

2) 충남대학교 전자공학과, 교신저자

할 수 있다.

이에 본 연구에서는 재료의 표면마찰계수를 간단히 도출할 수 있는 휴대용 마찰계수 시험기를 개발하며, 구체적으로 기구부 뿐만 아니라 측정회로 설계, MCU기반 펌웨어 구성 내용을 다룬다.

2. 기구 설계 및 적용

본 기구는 시험기의 신뢰성 및 휴대성을 고려하여 가공공차와 조립공차를 최소화하여 Fig. 1과 같이 설계되었으며 마찰계수는 마찰력과 수직항력에 대해 밀접한 관계가 있기 때문에 정확한 수직항력이 인가되고 각 구동부에 간섭 및 영향을 주지 않는 것에 초점을 두었다.

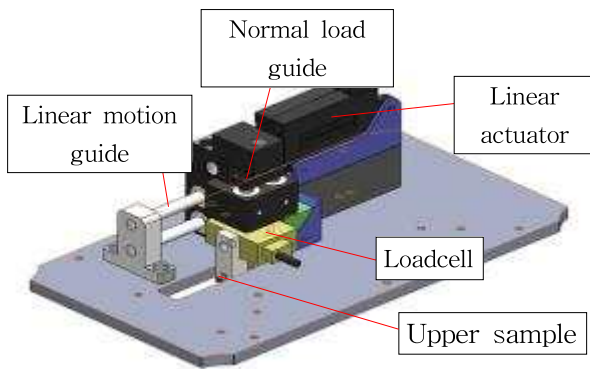


Fig. 1 Mechanical structure of portable friction coefficient tester

기본적인 구동은 선형구동부 X축과 하중인가 부분 Z축의 소형정밀 볼부쉬 및 가이드레일을 사용하고 0.01mm 이하의 공정 및 조립오차로 선형구동기와 수직항력스프링을 사용하여 정확한 선형, 수직 운동을 한다. 여기서 선형구동기의 최대 구동길이를 고려하여 X축의 가이드 구동길이는 20mm로 제한한다. 시험의 진행을 위하여 우선 수직항력을 상대시편에 적용하고 사용자의 명령에 따라 선형 구동하는 가운데 수직항력스프링과 직결로 연결 장착된 로드셀에서 표면 마찰력을 측정하여 마찰계수로 환산한다. 로드셀은 KORAS 인증기관에서 교정과정을 거친 로드셀을

사용하여 표면에 대한 정확한 마찰력을 측정하였다.

2.1. 수직항력 적용 방법

마찰계수를 측정하기 위해서는 시편과 기준재료 사이에 상대운동이 있어야 하고, 이때 두 물체 사이에 작용하는 수직항력이 작용하는 상태에서 상대운동을 발생시키면 마찰력의 크기를 f , 수직항력(인가하중)을 N , 마찰계수를 μ 라고 할 때[3],

$$f = \mu N \tag{1}$$

관계가 성립되므로 정확한 마찰력을 측정하기 위하여 일정하고 정확한 수직항력이 적용되어야 한다. Fig. 2는 본 기구물의 수직항력 전달방법에 관련하여 나타내고 있다. 아랫부분 굽은 선을 하부시편으로 가정하고 인력으로 기구물과 하부시편을 접촉시켰을 때 아래의 화살표와 같이 수직가이드를 타고 스프링에 설정된 수직항력이 정확하게 하부시편에 전달이 된다. 본 기구물에서는 5N의 소형로드셀을 채택하여 사용했기 때문에 다양한 하부시편의 마찰력의 변별력을 확인할 수 있는 최소하중 1N 스프링을 교정하여 적용하였다[4].

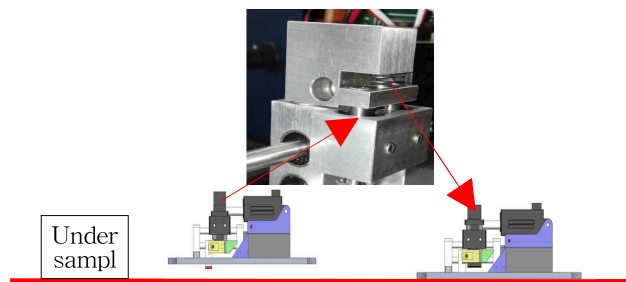


Fig. 2 Normal force pressing method

2.2 마찰력 측정을 위한 센싱블럭

센싱블럭의 재원은 두께 4.0mm, 재질 AL6061로 선정하였다. 두께는 선형구동시 변형이 없는 최소 두께로 선정하였다. 위의 설계를 바탕

으로 FEM 시뮬레이션을 수행하였을 때 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다.

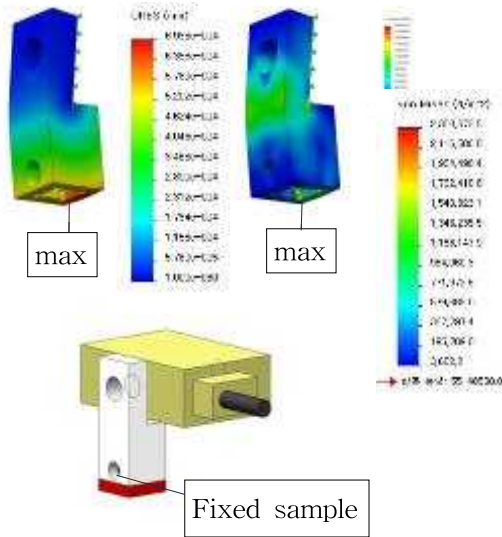


Fig. 3 Simulation of the displacement and stress

센싱블럭의 시편장착 부분에 최대 마찰력 5N의 힘을 가했을 시 변위는 최대 변위가 1 μ m이하인 것을 볼 수 있고 응력 또한 2.3MPa로 거의 모든 부분이 푸른색을 띄는 것을 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있어 센싱블럭으로 적합성을 판단하였다. 최대 마찰력(5N)에서도 변형이 없이 최적화 된 센싱블럭은 로드셀과 시편을 연결한 지그역할을 하기 때문에 정밀하게 설계 및 가공이 필요하다. 아래의 그림은 로드셀과 센싱블럭 그리고 5mmx5mm 사각시편을 장착한 모습이다. 사각 시편은 어떤 재질이든 가공하여 고정 및 장착할 수 있으며 여기에서 정확한 수직 수평은 작업은 마찰력 측정에 있어 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

3. 회로 설계 및 배치

회로 설계는 사용자와 장비가 쉽게 인터페이스 가능 하도록 설계되었으며 MCU로 제어하는 PCB 보드는 로드셀에서 출력되는 아날로그 신호

를 검출하는데 출력 신호가 매우 적어 잡음 차단 및 절연, 신호 증폭에 대해 고려하며 Fig. 4와 같이 설계 및 배치되었다. 또한 적은 용량의 리튬 폴리머 배터리를 사용함으로써 우선적으로 배터리의 수명을 최대로 늘릴 수 있는 방안을 채택하였고 1회의 배터리 충전으로 장시간 사용하기 위한 스위칭 시스템 및 인터럽트에 따른 충전 기술을 이용하여 메인 전원 없이 최대한 장시간 사용할 수 있는데 초점으로 설계하였다.

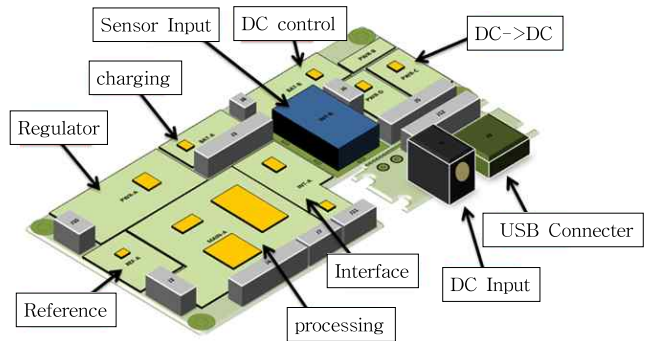


Fig. 4 Whole circuit layout

기구물은 휴대성을 고려해야 하므로 전체크기가 제한적이기 때문에 PCB 또한 전체기구물에 비례하여 PCB크기에 제한이 있어 상간노이즈 영향이 없는 최소 PCB크기와 소형소자를 사용하였다. PCB크기를 고려하면 1608크기의 칩을 사용해야 하지만 작업성을 고려하여 양면 2012크기의 칩을 가지고 제작하였다. 또한 배선 작업을 고려해 각 커넥터 위치에 근접하여 아트웍이 될 수 있도록 각각의 구성부는 최적의 위치에 배치하도록 하였다.

각 구성부 중 입력부에서는 로드셀로부터 출력되는 신호를 전원잡음이 제거가능한 low drift형으로 차동증폭하고 증폭된 아날로그신호를 디지털 신호로 변환하여 I2C 통신으로 MCU에 전송할 수 있도록 구성되었다[5]. Fig. 5 회로에서 로드셀로부터 출력된 신호를 식 (2)에 대입하여 마찰력 값을 구하였다.

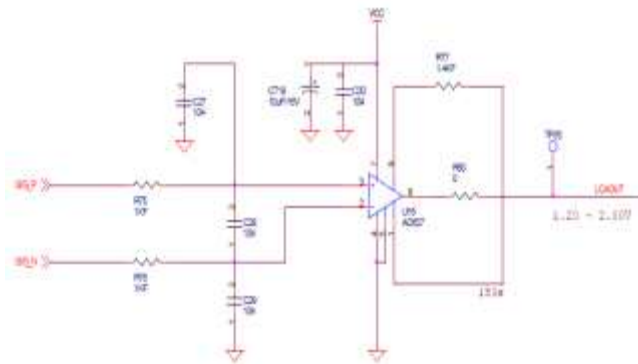


Fig. 5 Loadcell amplifier circuit

$$V_{OUT} = [V_{IN(+)} - V_{IN(-)}] \times \text{Gain} + V_{REF} \quad (2)$$

증폭률(Gain) = $5 + (200K\Omega / R_g)$ 이고 150배를 설정하기 위해 $R_g = 1.4K\Omega$ 로 구성, 증폭률에 따라 기준전압 범위내의 값을 구하였다. 마찰력에 따라 $V_{IN(+)} - V_{IN(-)}$ 이 바뀌므로 일정의 무게(예:1N)을 로드셀에 가압 후 V_{OUT} 을 측정 및 무게(마찰력)변경 따른 V_{OUT} 값을 알고 식(1)에 따라 프로그램에서 적용하여 마찰계수로 환산한다.

또한 충전부에서는 충전전류는 소자의 충전외 부저항단자를 $2K\Omega$ 로 설정하여 급속충전 시에는 540mA로 충전을 시행하고, 보통충전 시에는 108mA로 제어하는데 모든 처리 과정은 중앙처리부에서 실시간으로 모니터링 할 수 있게 설계되었다. 출력 전압이 3.7V ~ 4.2V인 리튬폴리머 배터리는 현 시험기의 필요 구동 전압 8.5V로 승압하기 위해서 전원제어부에서 승압회로를 거쳐 필요 전압으로 승압하게 되며 승압된 전압은 DC-DC부에서 로드셀, 선형구동기 등 각 부분에 필요 전원을 공급하게 되고 이 또한 모든 과정은 중앙처리부에서 모니터링 및 제어할 수 있게 설계되었다.

4. 펌웨어 구성

AVR 펌웨어 개발을 위해 다수의 라이브러리를 우선적으로 개발하였다. AD변환기 및 타이머 라이브러리를 개발하여 각 단계에서 사용되는데

예를 들어 AD변환기 라이브러리는 로드셀 신호 검출을 위하여 AD변환기 관련 인터럽트 루틴 등을 포함하고 있다.

Table 1. Configuration of firmware

No	구분	세부 항목
1	TFT LCD or Touch control	LCD I/O control
2	Linear actuator control	basic control
		Limit control
		Auto control
		Manual control
3	External amp. or ADConverter control	Load cell output signal control
4	Charging or Battery status	Charging Control
		Battery monitoring
		Display control
5	Friction coefficient Measurement	Measurement
		Save
		Input control
		Display control
6	Self-diagnosis	Power status monitoring
		Input control
		Display control
7	Data transfer	Test data transfer to USB
		Input control
		Display control

Table 1에 중앙처리장치에서 관리하고 있는 기능들을 정리하였다. 우선적으로LCD에서 실시간으로 장비의 상태의 모니터링과 사용자와의 인터페이스 및 데이터 확인을 관장할 수 있도록 구성하고 선형구동기의 펄스폭변조를 50%로 설정하여 8mm/s의 속도로 20mm까지 구동할 수 있도록 설정했는데 이유는 너무 빠른 속도로 측정하게 되면 상대 샘플 간 변별력이 떨어져 시험기로서의 역할이 떨어지게 된다.

펄스폭변조를 타이머 라이브러리를 이용하여 선형구동기의의 속도와 위치를 일정하게 유지하면서 시편의 종류 및 환경에 영향을 받지 않고 동일한 조건을 부여한다. 선형 구동을 하면서 측

정된 내부 AD변환신호를 마찰계수로 연산하기 전에 필터링 기능을 갖는 ADC_REGISTER{} 배열에 의해 버블정렬을 응용한 비교 및 평균 과정을 연산에 앞서 수행한다. 시험 표면의 일정 평균치 이상의 다른 데이터와 차이를 보이면 앞뒤 데이터와 평균을 내는 과정을 거쳐 표면상태가 일시적으로 좋지 않더라도 전체평균을 마찰계수로 연산하는데 있어 불필요한 신호를 줄일 수 있게 설계되었다.

또한 중앙처리장치에서 모든 인터럽트를 관찰할 수 있게 펌웨어가 구성되었으며 이는 배터리 및 주 전원상태를 실시간으로 모니터링 하면서 장비의 현 상태를 점검할 수 있도록 설계되었다. 예를 들어 리튬폴리머 배터리 출력 전압이 3.7V 이하로 떨어지게 되면 자동으로 전원을 차단하여 배터리의 수명을 고려하였고 232통신포트를 사용하여 디스플레이 및 PC와 통신할 수 있도록 회로설계에 따른 펌웨어가 구축되었다.

5. 구현 및 시험결과



Fig. 6 FCMS170 Model of NeoPlus co.,ltd

비교 마찰계수 시험기는 Fig. 6의 (주)네오플러스 FCMS170 모델을 채택하였다. FCMS170은 모든 재료의 정마찰계수 및 동마찰계수를 측정할 수 있는 장비로 평평한 판에 측정하고자 하는 재료를 올려놓고 정지 상태에서 원하는 속도로 이동하면서 마찰계수를 직접적으로 측정하며 평가 가능한 재질은 금속, 세라믹, 요업재료, 플라스틱류, 의류소재, 전자제품류, 고무류, 종이류 등 다양한 재료의 마찰계수 측정이 가능하다. ASTM D1894 , KS M ISO 8295 규격에 따른 시험이 가능하도록 설계된 규격 시험기로 데이터

비교 시험기로 적합하다고 판단되었다[3]. 비교시험을 위해 4가지 시편을 하부시편으로 선정을 하고 상부 시편은 5mm X 5mm로 하는 정 사각 스틸 샘플을 가공하여 Fig. 6과 같이 면 접촉 시킨 상태에서 수직항력을 우선적으로 가압 후 시험을 진행 하였다. 각시편의 마찰계수는 5회 시험 진행 후 5회 평균치 값으로 비교 되었으며 습도의 차이가 나지 않도록 오후 3시간에 걸쳐서 시험이 진행 되었다. 또한 1회 시험 후 에탄올로 시편 세척을 하여 초기시편 상태를 유지하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 비교장비와 연구장비 간의 시험절차를 나타내었다.

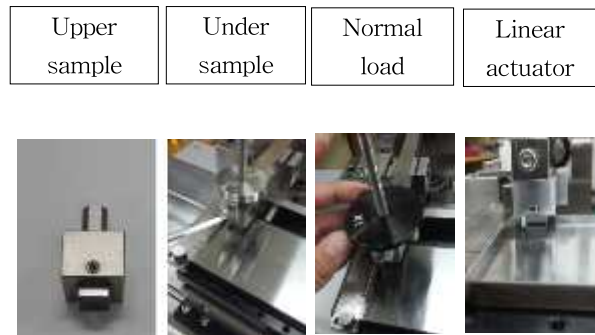


Fig. 7 Test procedure of FCMS170

Directly test for the sample



Fig. 8 Test procedure of potable tester

시험조건 및 하부시편은 다음과 같이 설정하여 두 장비 간 동일하게 시험을 진행하였다.

Table 2는 FCMS170와 본 연구장비를 위의 시험 내용을 적용하여 각각 시험을 진행하였을 때 각 회의 마찰계수 값과 5회 시험 마찰계수 값의 평균을 나타내고 있다. FCMS170은 소숫점 4자리까지 분해능이 가능 하였고 연구장비는 소숫점 3자리까지 표기하였다. 로드셀은 FCMS170과

Table 2. Test environment & Test sample

Item	Test environment
Speed	8mm/s
Stroke	20mm
Normal load	1N
Temperature	Room temperature
Humidity	42%

Sample
1. Rubber
2. Acrylic
3. SS41(Steel)
4. Glass

구현장비 모두 토요소키-333FB 소형 로드셀을 사용했는데 오차범위는 사양서에 명시된 각각용량이 다른 로드셀은 0.2%의 비직진성 및 이력현상을 갖으며 0.1%반복력을 감안하여 시험을 진행하였다.

Table 3 Comparison test results

FCMS TEST RESULT						
Count	sample	Rubber	Acrylic	Steel	Glass	Note
1		0.3196	0.1466	0.0836	0.0764	
2		0.2981	0.1393	0.0649	0.0809	
3		0.3003	0.1214	0.0801	0.0832	
4		0.3716	0.1751	0.0776	0.0811	
5		0.3185	0.1521	0.0743	0.0796	
	average	0.3216	0.1469	0.0761	0.0802	

POTABLE TEST RESULT						
Count	sample	Rubber	Acrylic	Steel	Glass	Note
1		0.312	0.139	0.088	0.079	
2		0.308	0.142	0.076	0.083	
3		0.314	0.131	0.082	0.092	
4		0.309	0.137	0.078	0.084	
5		0.331	0.133	0.083	0.085	
	average	0.315	0.136	0.081	0.085	

Table 3의 평균 마찰계수를 보면 총4개 시편의 각5회 반복 시험 결과가 FCMS170과 휴대용 마찰계수시험기의 데이터가 정확하게 일치하지 않았으나 Fig. 9의 그래프의 데이터처럼 각 하부 시편의 편차가 아크릴 고무 스틸 유리 순으로 컷지만 모두 오차범위 안의 편차를 보였다. 특히 시편 4종에 따른 변별력 그래프를 보면 비슷한 로드셀 증폭률을 보이고 있어 성공적으로 각 부분이 구현되었다. 다만 휴대성과 경제성면을 고

려하다보니 FCMS170과 비교 하였을 때 자세한 측정은 할 수 없지만 산업현장 이나 연구실에서 재료에 대한 간단한 마찰력 테스트가 가능해 질 것으로 예상된다.

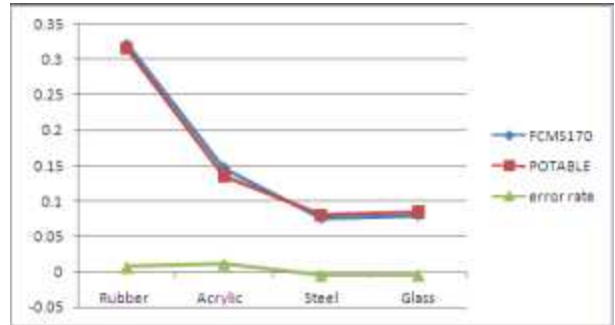


Fig. 9 Graph of the average in Table 3 & error factor

6. 결론

휴대가 가능한 경제성 있는 마찰계수 측정을 위하여 정밀한 기구부 설계와 기구물에 맞는 정교한 제어를 시도하였다. 결론적으로 FCMS170과의 비교시험 결과에서 보듯이 FCMS170처럼 그래프를 그리거나 세심한 측정은 불가능 하지만 재료 특성에 맞는 마찰계수는 각 시편에 맞게 반복성과 변별력을 비교적 정확하게 도출할 수 있었다. 이에 지금까지 상용화된 마찰계수측정 방식에 대비 현장적용이 즉시 가능하다는 편리성과 측석에서 결과를 확인할 수 있어 기존 측정방식보다 한층 차별화된 기능을 구현하였고 간단한 사용자와 인터페이스를 제공하여 누구나 손쉽게 시험기를 조작 및 시험을 진행할 수 있게 되어 경제성 있는 시험이 특정 장소 및 연구소에 국한되는 것이 아니라 어디서든 재료 표면에 대한 마찰계수 시험이 진행되므로 관련 산업 발전에 큰 도움을 줄 것으로 기대한다.

References

[1] M.S. Jo, "A Study of the Variation of

Friction Coefficient According to Surface Roughness," Seoul National University of Science and Technology Master Thesis, 2001.

- [2] G.J. Cheon et al., "Development of a Friction Tester and Experimental Study on the Frictional Characteristics of Rubbers. Journal of Lubrication," Vol. 15, No. 2, pp. 193-198, 1999.
- [3] NeoPlus Co., "Wear Test Guide," pp. 3-10, 2008.
- [4] G.S. Choi et al., "A Development of Multi Purpose Testing Machine for Friction, Wear and Rolling Contact Fatigue," International Journal of Modern Physics: Conference Series Vol. 6, pp. 534-539, 2012.
- [5] C.W. Park, G.H. An, G.S. Choi, "A Stable A/D Conversion of Load Cell Signal by Single Chip Microprocessor," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, pp. 450-452 ,1993.



서 상 운 (Sang Woon Seo)

- 정회원
- 원광대학교 전자공학과 공학
학사
- 충남대학교 산업시스템공학과
공학석사
- 관심분야 : 시스템제어, 메카트로닉스, 센서신
호처리



유 준 (Joon Lyou)

- 정회원
- 서울대학교 전자공학과 공학
학사
- 한국과학기술원 전기전자공학과
공학박사
- 충남대학교 공과대학 전자공학과 정교수
- 관심분야 : 산업공정제어, 센서신호처리, IT기반
로봇, 항법시스템