

## 정전용량을 이용한 미분탄 유량계의 개발

(The Development of Pulverized Coal(PC) Flow-Meter using Capacitance)

이용식 · 황건호 · 정성원 · 여준호 · 소지영 · 김재현\*

(Yong-Sik Lee · Keon-Ho Hwang · Sung-Won Jeong · Jun-Ho Yeo · Ji-Young So · Jae-Hyeon Gim)

### 요 약

본 논문은 발전소 보일러 및 제철소 고로의 미분탄 연소방식에 적용이 가능한 유량계 개발에 관한 연구로, 정전용량을 이용한 미분탄 유량계를 개발하였다.

먼저 관에 흐르는 미분탄의 밀도 측정이 가능한 센서 및 회로를 설계하였고, 측정된 데이터를 분석하고 밀도를 계산하는 알고리즘을 구현하였다. 압송시스템에 설치된 로드셀의 출력 데이터와 측정된 데이터를 비교하여 개발된 유량계의 신뢰성을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, the flow meter system for pulverized coal is developed for the pulverizer-burner system of the boiler or the blast furnace. The sensor of the system applied the capacitance with a pair of electrode on the outer wall of the electric insulator pipe.

The circuit is designed for the measurement of the granule flow density combining as a measuring electrode and a reference. In order to measure granule-flow density, the calibration curve between the weight measured from loadcell and the voltage from the circuit is created. It is verified that the flow meter system has reliability and accuracy using on-line test.

Key Words : Flow-meter, Calibration curve, Capacitance, Density, Load cell

### 1. 서 론

제철소의 고로나 화력발전소의 보일러는 공기와 함께 유입된 미분탄을 연소실로 분사하여 로 내에서 부유 상태로 연소시키는 미분탄 연소 방식[1]을 주

로 사용하고 있다.

이 방식은 미분탄 취입량의 무게를 측정하고, 이를 일정 압력으로 로의 내부로 압송한다. 그러나 같은 압력으로 로에 미분탄을 불어넣어도 로 내부의 압력 및 온도가 균일하지 않아 공급되는 양의 편차가 발생하여 내부의 온도가 일정하지 않게 된다. 이 경우 이를 감시하고 동일한 양을 로에 공급하여 내부 온도를 제어해서 원활한 작업이 이루어지도록 해야 한다. 그러므로 운전자가 각 로에 공급하는 연료

\* 주저자 : 순천대학교 공대 전기공학과 교수  
Tel : 061-750-3545, Fax : 061-750-3508

E-mail : jhg@sunchon.ac.kr  
접수일자 : 2007년 12월 3일  
1차심사 : 2007년 12월 6일  
심사완료 : 2007년 12월 27일

## 정전용량을 이용한 미분탄 유량계의 개발

의 상태를 파악할 수 있고, 공급하는 연료량을 측정할 수 있는 미분탄 유량계의 개발이 절실히 필요하다.

현재 가장 기본이 되는 유량계로서 1960년대부터 사용되기 시작한 전자유량계[2]와 초음파 유량계[3-4] 등은 많이 상용화 되어 현장에 적용 중에 있으나, 미분탄 유량계는 세계적으로 아직 많이 개발되지 않은 상태이며, 국내에는 개발된 제품이 없어 일본, 미국 및 유럽의 수입 제품을 설치하여 많은 비용을 부담하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 발전소의 대형 보일러나 제철소의 고로 등에 공급하는 미분탄의 양을 실시간으로 측정하고 모니터링이 가능한 미분탄 유량계의 개발을 최종 목표로 하였다.

## 2. 최적감지 계측기의 개발

그림 1은 개발하고자 하는 밀도 측정 계측기의 구성도이며 그림 2는 밀도 측정 계측기의 제작 사진이다. Noise 등의 외란으로부터 Signal을 보호하기 위하여 차폐시킨 모습이다.

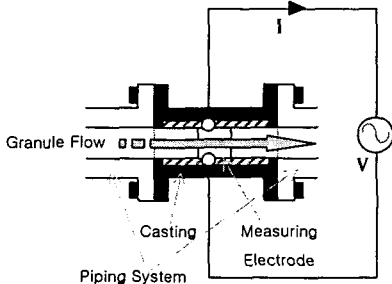


그림 1. 계측기의 구성도  
Fig. 1. Structure of a measuring instrument



그림 2. 계측기 사진  
Fig. 2. Picture of measuring instrument

밀도 측정 계측기는 브리지 회로를 이용하여 기준 정전용량과 측정된 정전용량의 차이를 비교하여 데이터를 처리하였다. 정전용량을 이용한 센서는 저 비용, 저 전력 소비, 높은 선형성을 나타내며, 쉬운

교정이 가능함으로 액체 및 고체의 레벨 측정에 많이 사용하고 있다[5].

정전용량을 측정하기 때문에 계측기를 보호하는 케이스는 비 금속물로 제작하였으며 내부 배관의 재질은 세라믹 튜브를 이용하여 마모를 줄이고 정전용량의 측정이 최대가 되도록 설계하였다.

계측기 개발에 사용한 배관으로는 세라믹 관을 이용하였으며, 표 1과 같은 종류의 관을 선정하였다.

표 1. 관의 재질에 따른 비교  
Table 1. Comparison for pipe's material

구 분	Dielectric	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	SiO <sub>2</sub> [%]
AS 22[∅]	10	>99.7[%]	Max 0.05[%]
HB 20[∅]	-	58[%]	37.5[%]
애관 25[∅]	-		대부분

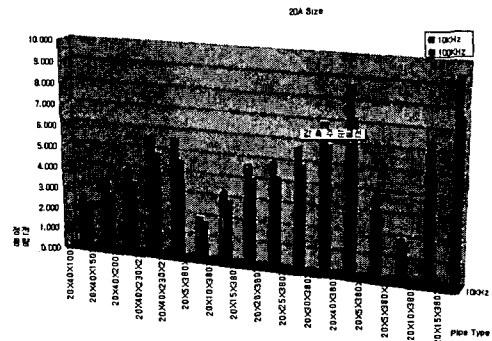
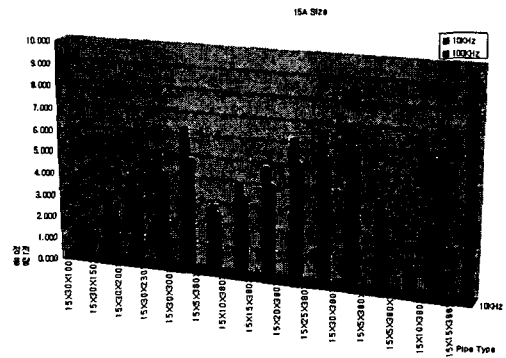


그림 3. 전극 크기에 따른 정전용량 비교  
Fig. 3. Capacitance comparison for an electrode magnitude

선정된 판을 이용하여 전극의 크기에 따른 정전용량 비교데이터를 그래프로 나타내면 그림 3과 같으며, 그래프에서 비교되는 것과 같이 20A Size에 4개의 전극을 병렬로 연결한 case가 가장 높은 편차를 보여주었다.

### 3. 신호처리 회로의 설계

계측기에서 데이터를 감지하기 위한 신호처리 회로를 구성하였으며 제작된 회로는 그림 4와 같다. 계측기의 커패시턴스의 변화를 브리지 회로로부터 기준 값과 함께 비교기로 전송하면 비교기에서 기준신호와 계측기에서 감지한 신호를 비교하여 그 차의 신호를 발생한다. 이 신호를 증폭하여 정류기로 보내서 직류로 변환하고 필터를 이용하여 노이즈 제거와 영점을 조절한 후 DAQ보드 입력( $\pm 10V$ )에 알맞게 증폭한다.

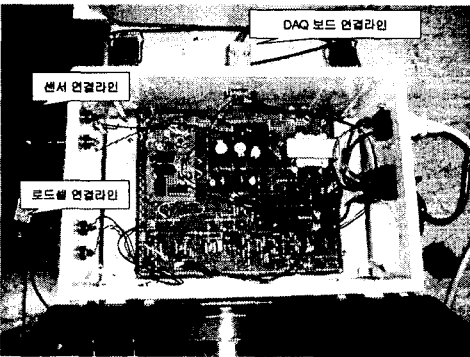


그림 4. 유량 측정 회로  
Fig. 4. The Circuit of the flowmeter

## 4. 데이터 처리

### 4.1 입력데이터

데이터는 로드셀(Loadcell)과 계측기의 입력신호를 전압으로 변환하여 미분탄의 총량과 유량을 계산하였다. 로드셀의 데이터는 계측기에서 측정된 밀도의 총합과 비교하기 위하여 사용하였다.

디지털 Indicator는 로드셀을 중량 감지용 계측기로 사용되는 장비의 중량표시 및 집계 기능을 갖는

디지털 중량 표시 장치이며, 그 사양은 표 2와 같다.

표 2. Indicator의 사양  
Table 2. Specification of Indicator

Description	Value
출력 전류	4~20[mA] [DC] 전류출력
정밀도	최대 1/3000
최대 부하임피던스	500[Ω] 이하

표에서와 같이 Indicator의 출력은 4~20[mA] [DC]내의 전류 출력으로서 중량의 크기에 따라 전류를 비례적으로 발생이 가능하도록 되어 있고, 본 연구에서는 전류를 전압으로 변환하여 사용하기 위해서 250[Ω]의 저항을 이용하였다.

### 4.2 프로그램

로드셀과 계측기의 신호를 받기 위한 데이터 처리는 NI USB-DAQ(Data Acquisition) 9215 보드를 이용하여 전압값을 검출하였고, 측정된 데이터를 분석하여 밀도의 계산은 LabVIEW 프로그램을 이용하였다.

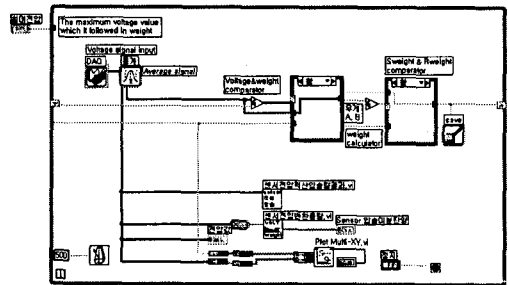


그림 5. 프로그램 작성도  
Fig. 5. Program diagram

그림 5는 프로그램 작성도를 나타낸다. 프로그램에서 DAQ 어시스턴트의 입력을 통해 데이터의 신호를 받았으며, 데이터 입력속도는 1[kHz]이고 이때 읽는 기본 샘플링 수는 1,000개이다.

정전용량을 이용한 미분탄 유량계의 개발

4.2.1 로드셀의 중량 데이터 계산

로드셀의 전압에 대한 중량 데이터의 계산방식은 다음과 같다.

로드셀은 중량의 변화에 따라 신호를 비례적으로 발생함으로 변환된 전압값을 아래 수식을 이용하여 무게로 환산하였다.

$$y = ax + b \tag{1}$$

여기서,  $x$ 는 중량,  $y$ 는 전압값을 나타내며,  $a$ ,  $b$ 는 상수이다.

기본 설정으로 최대 중량을 10[kg], 최소 중량이 0.0[kg]으로 설정하고, 그 때의 전압은 각각 2[V]에서 0.4[V]로 변화함으로 이를 곡선으로 나타내면 그림 6과 같다.

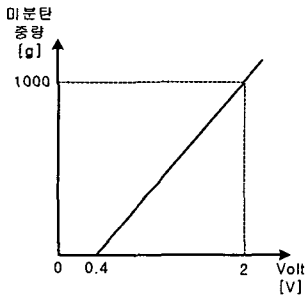


그림 6. 로드셀의 곡선  
Fig. 6. Curve of a Loadcell

4.2.2 계측기의 중량 데이터 계산

계측기의 실시간 전압 데이터를 중량으로 환산하기 위해서는 그림 7과 같은 교정곡선이 필요하다.

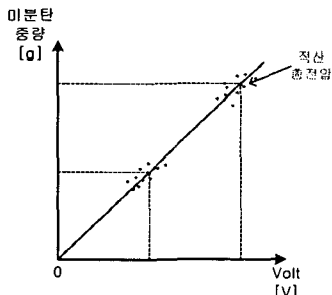


그림 7. 계측기의 교정곡선  
Fig. 7. Calibration curve of the system

적산 총전압의 값을 구하게 되면 비례적으로 실시간 전압값의 변화에 따라 미분탄 중량을 계산할 수가 있다. 정확도를 위하여 적산 총전압을 동일 중량으로 반복 측정하여 평균값으로 계산하였고, 여러 가지 중량으로 반복 측정하여 최대로 근접한 교정곡선을 만들었다.

프로그램에서는 실시간 변화된 전압값에 따른 압송중인 실시간 유량과 그 값을 적산하여 압송된 미분탄 총량의 데이터를 나타내었다.

4.2.3 프로그램 모니터링

그림 8은 프로그램 작성도에 따른 모니터링 화면을 나타내며, 각각의 기능은 다음과 같다.

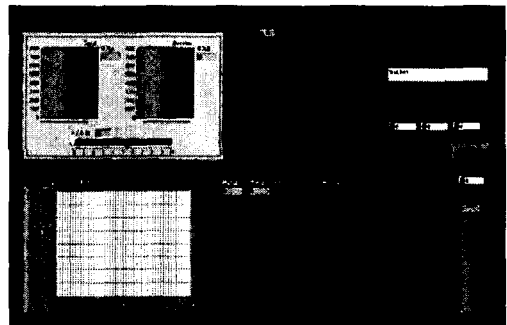


그림 8. 프로그램 모니터링 화면  
Fig. 8. Monitoring screen of the system

◎ Loadcell Data

- 1) 고로 그래프 : 압송 시스템에서의 압송 탱크 (Send)와 저장소(Receive)를 나타내며 실시간으로 중량을 나타내게 하였다.
- 2) 로드셀 전압 : 로드셀의 실시간 전압값을 나타낸다.
- 3) 데이터 저장 : 실시간으로 데이터를 저장하는 위치를 지정할 수 있다.
- 4) 제어 박스 : 압송 탱크의 미분탄 중량, 최대전압 및 초기 전압값의 입력값을 나타낸다.

◎ 계측기 Data

- 1) 전압에 따른 압송 미분탄량
- 2) 교정곡선과 실시간 미분탄량
- 3) 계측기 입력 전압 : 실시간 계측기 전압값을

나타낸다.

- 4) 고로 그래프 : 로드셀 고로 그래프의 저장소와 동일하다.

### 5. 압송시스템 구성

개발한 유량계의 정밀도를 측정하기 위하여 구성된 시스템은 그림 9와 같다.

이 시스템은 미분탄을 압송할 수 있는 시스템과 개발된 유량계에서 검출된 유량을 나타내는 컴퓨터로 구성된다. 좌측의 탱크에서 우측으로 압송할 때 우측의 탱크가 저장소가 되고, 반대의 경우는 좌측의 탱크가 저장소가 되도록 구성하여 탄의 손실을 최소화하였고, 테스트가 용이하도록 구성하였다. 또한 컴프레서에서 토출되는 공기의 수분과 먼지(dust)들을 제거하기 위하여 필터링 장치를 구성하였다.

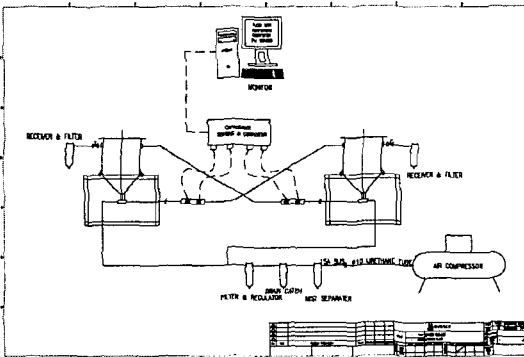


그림 9. 시스템 구성도  
Fig. 9. System structures

### 6. ON-LINE Test

그림 10은 실험에 사용한 압송시스템을 나타낸다. 유량 측정 실험에 앞서 5[kg], 10[kg] 중량의 미분탄으로 계측기의 교정곡선을 계산하였다.

표 3은 교정곡선을 계산하기 위한 실험 결과이다. 실험은 최대로 근접한 교정곡선을 그리기 위해 많은 반복 실험을 하였으며, 5회의 실험 결과를 나타내었다.

유량 실험은 4[kg], 7[kg]의 중량의 미분탄을 사용하였다. 실험은 저장탱크에 탄을 넣은 후 그 후에 탄

을 추가하지 않은 상태에서 진행하였으며, 매 반복 때마다 대략 50~100[g]의 탄의 손실이 발생하였다. 따라서 미분탄 중량은 인디케이터의 표시값을 기준으로 하였다.



그림 10. 압송시스템  
Fig. 10. Pressurized pipe system

표 3. 중량에 따른 적산총전압  
Table 3. Integrated total voltage for a weight

중량[kg]	적산총전압	평균값
5	1257.9	1179
	1184.4	
	1103.5	
	1092.4	
	1256.2	
10	2159.3	2359
	2477.2	
	2302.7	
	2345.8	
	2510.8	

그림 11은 미분탄이 압송 중일 때의 모니터링 화면이고, 그림 12는 미분탄 압송 후의 모니터링 화면이다.

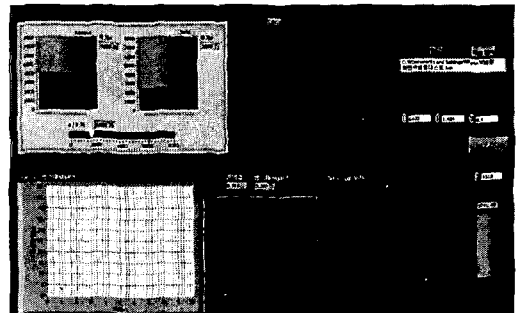


그림 11. 압송중일 때의 모니터링 화면  
Fig. 11. Monitoring screen during pressurization

정전용량을 이용한 미분탄 유량계의 개발

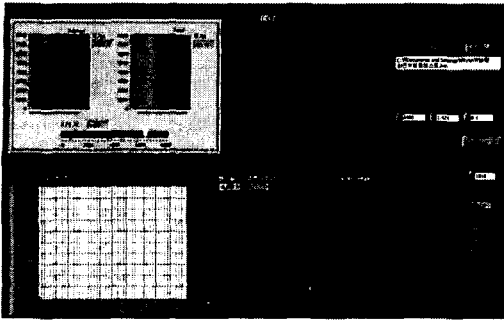


그림 12. 압송후의 모니터링 화면  
Fig. 12. Monitoring screen after pressurization

그림 11에서 보면 계측기 입력 전압과 교정곡선에 따른 미분탄량을 실시간으로 확인할 수 있음을 알 수 있고, 로드셀과 계측기의 중량 데이터의 차이도 300[g]미만(로드셀 기준값과의 차)으로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 그림 11의 모니터링 화면에서도 최종 압송량을 비교해보면 300[g]미만으로 나타났음을 알 수 있다.

표 4는 압송 실험의 결과를 나타내며, 측정값으로 로드셀과 계측기 중량은 교정곡선의 값을 이용하였다.

표 4. 실험 결과  
Table 4. Test results

설정값		측정값					오차[%]		
로드셀		계측기		로드셀		계측기		로드셀	계측기
중량[kg]	최대전압 [V]	적산총 전압	최대전압 [V]	중량 [kg]	적산총 전압	중량 [kg]			
4	1.04	944	1.04	3.99	989	4.18	0.2	4.8	
3.9	1.024	920	1.03	3.93	896	3.80	0.8	3.5	
3.8	1.008	896	1.01	3.83	1427	6.05	0.9	6.5	
3.6	0.976	849	1.00	3.74	811	3.44	3.8	8.7	
3.5	0.96	826	0.97	3.59	782	3.32	2.6	8.3	
7	1.52	1651	1.53	7.06	1569	6.65	0.9	6.2	
6.9	1.504	1628	1.51	6.92	2307	9.78	0.3	3.3	
6.7	1.472	1581	1.47	6.68	1630	6.91	0.3	3.3	
6.5	1.44	1533	1.44	6.48	1642	6.96	0.2	6.8	
6.4	1.424	1510	1.43	6.42	1492	6.28	0.4	1.6	

로드셀의 오차는 설정값과 측정값과의 중량 차로 계산하였으며, 계측기 오차는 로드셀의 측정값과 계측기의 측정값과의 중량 차를 비교하여 계산하였다.

실험 결과 계측기 오차는 음영부분을 제외하고 ±10[%] 이내의 목표값을 얻을 수가 있었다.

오차가 크게 발생한 경우는 실험 중에 일시적으로관이 막혀서 계측기 출력 전압이 일정한 값으로 유지가 되기 때문으로 그림 13과 같다.

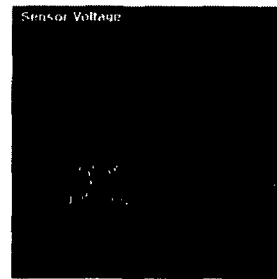


그림 13. 계측기의 실시간 전압 변화  
Fig. 13. Real-time voltage variation

7. 결 론

본 논문에서는 정전용량을 이용한 미분탄 유량계를 개발하였으며, 개발 결과는 다음과 같다.

1. 분체가 흐르는 밀도를 계측 할 수 있는 고감도 측정 장치 회로를 설계하였다.
2. 측정된 데이터를 분석하는 알고리즘을 개발 하였고, 로드셀의 데이터와 측정된 데이터와의 상관관계를 비교하여 개발된 유량계의 신뢰성을 확인하였다.

본 논문은 정전용량식 미분탄 유량계의 연구 기반을 마련하였고, 측정기기의 국산화로 인한 원가경쟁력이 증가될 것이며 이것은 발전회사 및 제철소의 경쟁력 강화에 이바지할 수 있을 것이라 확신한다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 중소기업청 14차 산학컨소시엄사업에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## References

- [1] 송길영, “최신발전공학”, 동일출판사, pp258-259, 2001.
- [2] Cushing, Vincent, “Electromagnetic Flowmeter for Insulating Liquids”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, Vol. 1, pp. 103-108, May 2002.
- [3] L.C.Lynnworth, “Ultrasonic measurement for process control”, Academic Press, San Diego, CA, 1989.
- [4] T. T. Yeh and P. I. Espina, “An Intelligent Ultrasonic Flow Meter for Improved Flow Measurement and Flow Calibration Facility”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE, Vol. 3, pp. 1741-1746, May 2001.
- [5] Ferran Reverter, Xiujun Li, Gerard C.M. Meijer, “Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor”, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 138, Issue 1, pp. 1-8, July 2007.

## ◇ 저자소개 ◇

### 이용식 (李龍植)

1983년 12월 9일생. 2002년~현재 국립 순천대학교 전기 제어공학과 재학중.  
 Tel : (061)834-5675  
 Fax : (061)750-3508  
 E-mail : b34rd@nate.com

### 황건호 (黃建鎬)

1978년 4월 28일생. 2004년 순천대 전기제어공학과 졸업. 2004년~현재 국립 순천대학교 전기공학과 석사 재학중. 2004년~현재 (주)두레엔지니어링 재직중.  
 Tel : (061)654-4648  
 Fax : (061)750-3508  
 E-mail : kons78@mail.sunchon.ac.kr

### 정성원 (鄭盛元)

1975년 11월 25일생. 2002년 순천대 전기제어공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기전자정보통신공학부 박사수료. 2005년 8월~현재 국립 순천대학교 전기제어공학과 시간강사.  
 Tel : (061)750-3540  
 Fax : (061)750-3508  
 E-mail : ww180@sunchon.ac.kr

### 여준호 (余俊鎬)

1957년 1월 24일생. 1975년 태백기계공고 졸업. 1991년 (주)두원 이사. 1997년~현재 (주)두레엔지니어링 상무 이사 재직중.  
 Tel : (061)793-1633  
 Fax : (061)793-1637  
 E-mail : dureco@dureco.co.kr

### 소지영 (蘇智永)

1960년 11월 20일생. 1983년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(석사). 1985년 동 대학교 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 전기제어공학과 교수.  
 Tel : (061)750-3544  
 Fax : (061)750-3508  
 E-mail : drsojy@sunchon.ac.kr

### 김재현 (金在顯)

1956년 1월 25일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사). 1993년 동 대학교 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 전기제어공학과 교수.  
 Tel : (061)750-3545  
 Fax : (061)750-3508  
 E-mail : jhg@sunchon.ac.kr