

## 접촉연소식 센서의 열 특성 및 가스반응의 모델링

이상문<sup>†</sup> · 송갑득 · 주병수 · 이윤수\* · 이덕동

### Electrical modelling for thermal behavior and gas response of combustible catalytic sensor

Sang Mun Lee<sup>†</sup>, Kap Duk Song, Byung Su Joo, Yun Su Lee\*, and Duk Dong Lee

#### Abstract

This study provides the electrical model of combustible catalytic gas sensor. Physical characteristics such as thermal behavior, resistance change were included in this model. The finite element method analysis for sensor device structure showed that the thermal behavior of sensor is expressed in a simple electrical equivalent circuit that consists of a resistor, a capacitor and a current source. This thermal equivalent circuit interfaces with real electrical circuit using two parts. One is 'power to heat' converter. The other is temperature dependent variable resistor. These parts realized with the analog behavior devices of the SPICE library. The gas response tendency was represented from the mass transferring limitation theory and the combustion theory. In this model, Gas concentration that is expressed in voltage at the model, is converted to heat and is flowed to the thermal equivalent circuit. This model is tested in several circuit simulations. The resistance change of device, the delay time due to thermal capacity, the gas responses output voltage that are calculated from SPICE simulations correspond well to real results from measuring in electrical circuits. Also good simulation result can be produced in the more complicated circuit that includes amplifier, bios circuit, buffer part.

**Key Words** : gas sensor, SPICE model, combustible catalytic

## 1. 서 론

접촉연소식 가스센서는 가정이나 산업체에서 가연성 가스 검지에 가장 널리 사용되는 소자이다. 농도에 선형적으로 비례하여 직선성과 재현성이 우수하고 가스에 대한 반응 속도가 비교적 빠른 특징이 있다. 전자 시스템들이 저 전력화, 고기능화 되어 가면서 가스 검지시스템에도 저 전력화가 요구되고 있다. 이를 충족하기 위해 마이크로센서를 개발하는 등 다각도의 연구가 진행되며 동작시간을 단축시키는 방법도 일반적인 해결책 가운데 하나이다. 특히 동작시간을 단축시키는 방법은 전력 소모를 줄이는 것 외에도 소자의 수명을 증

가시키고 오동작이나 피독을 방지할 수 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 센서 제작사들에서 제공하는 자료는 가스에 대한 정상 상태의 출력이나 선형 특성만 제공할 뿐 과도응답에 대한 특성은 포함되어 있지 않다. 뿐만 아니라 대부분의 전자소자들에는 시뮬레이션에 이용할 수 있는 소자 모델이 제공되고 있지만 센서에는 이러한 설계용 모델이 제공되지 않아 시스템 설계 작업이 Try & Error 방식으로 진행되며 반응 특성을 조사하기 위한 고가의 장비들이 필요하였다. 본 연구에서는 접촉연소식 가스 센서의 SPICE(simulation program with integrated circuit emphasis) 모델을 검증된 물리적, 화학적 특성을 이용하여 구현하였다. 전열특성과 가스 반응특성에 대해 다양한 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 실제 회로 출력과 비교하여 평가하였다. 또한 전원회로, 완충회로, 신호증폭회로와 함께 시뮬레이션 하고 응답시간을 향상시킬 수 있는 동작방식을 제안하였다.

경북대학교 전자전기공학부(The School of Electronic & Electrical Computer Science, Kyungpook National University)

\*경북대학교 첨단디스플레이 제조공정 및 장비연구소(Advanced Display Manufacturing Research Center, Kyungpook National University)

<sup>†</sup>Corresponding author: sangmun72@nate.com

(Received : November 17, 2005, Accepted : December 6, 2005)

## 2. 이 론

상용 접촉연소식 센서는 백금 코일 위에 알루미늄 재질의 담체를 형성한 구조가 일반적이다. 담체에는 백금이나 팔라듐 같은 귀금속 촉매가 포함되어 연소성 가스가 비교적 낮은 온도에서도 잘 연소될 수 있다. 담체의 연소효율이 높은 감지소자와 유리질로 코팅되어 연소효율을 저하시킨 보상소자가 한 जो로 마운트에 패키징 되어 있다. 소자에 전력이 인가되면 백금열선에서 발생한 Joule열에 의해 소자의 온도가 상승한다. 소자의 형태에 따라 상승하는 시간과 정상 온도가 달라진다. 온도가 상승하면 내부의 백금코일은 온도에 비례하여 저항이 증가한다. 가열된 센서에 가연성 가스가 도달하면 담체에서 연소가 일어나고 연소열이 발생하여 소자의 온도를 더욱 상승된다. 증가된 온도만큼 소자의 저항은 증가를 하게 되고, 저항 차이는 휘트스톤 브리지 회로에서 불평형 전압으로 출력되는데 이때 출력값은 가연성 가스의 농도에 선형적으로 비례한다<sup>[2]</sup>.

## 3. 모델의 설계

접촉연소식 센서의 구조에서 열은 백금 열선에서 발생하여 담체로 전도되고 담체표면에서 대류에 의해 공기 중으로 유출된다. 또한 일부의 열은 패키지의 마운트에 연결된 백금선을 통해 전도되어 나간다. 열선에서 발생하는 열량에 대한 소자의 열 특성을 대표적인 유한요소법 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하였다<sup>[3]</sup>. 정상상태에서 발열량과 온도관계, 온도의 위치

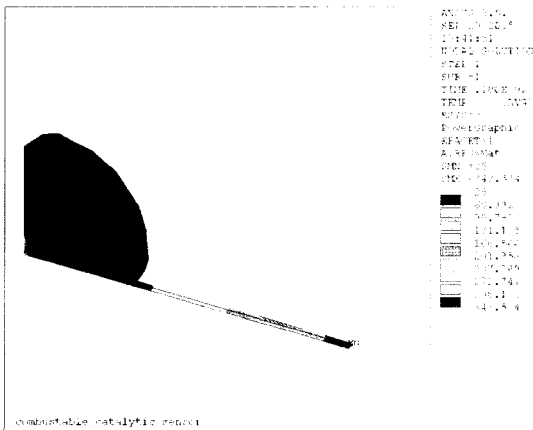


그림 1. 접촉연소식 센서의 온도분포  
Fig. 1. Temperature distribution of combustable catalytic sensor.

적 분포특성, 발열이 순간적으로 이루어질 때의 시간응답특성을 살펴보았다. 그림 1은 해석에서 얻은 정상상태에서의 온도분포이다. 마운트에 연결된 부분을 제외하고 전체적으로 온도분포가 고른 것을 알 수 있다. 그림 2는 열량과 소자의 정상상태 온도에 대한 그래프이다. 열량과 소자의 상승온도가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 3은 가열에 대한 시간응답특성을 나타낸 것이다. 지수함수를 포함한 수식과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

유한요소 해석의 결과 소자의 열적 특성이 발열체를 전류원, 열전도와 대류를 저항소자로, 열용량을 커패시터로 표현한 등가 전기회로를 구성할 수 있다<sup>[4]</sup>. 등가 회로에서는 열량이 전류로, 온도는 전압으로 표현된다. 실제 소자의 등가회로는 비접촉식 온도계와 공급된 전력의 비례관계를 측정하여 등가 저항을 계산하고, 소자의 시간적 저항변화 그래프에서 얻은 시간함수로 부터 시상수를 구하여 등가 커패시턴스를 계산하여 그림 4와 같이 등가회로로 표현하였다.

발열량은 소자에서 소모된 전력과 같다. 저항이 변하는 비선형 소자이므로 전압과 전류를 곱하여 전력을

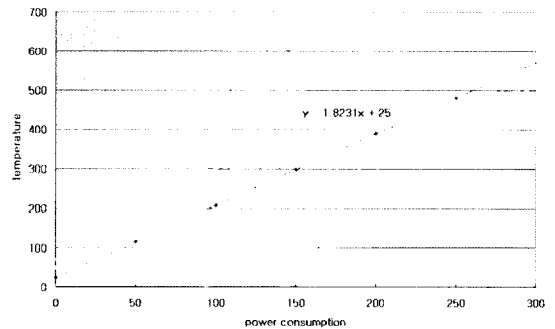


그림 2. 센서모델의 전력과 온도 관계  
Fig. 2. power vs. temperature at sensor model.

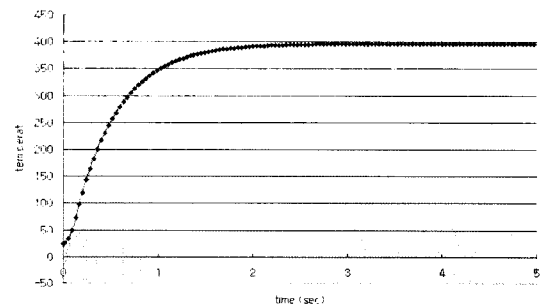


그림 3. 센서모델의 시간응답특성  
Fig. 3. Time response of sensor model.

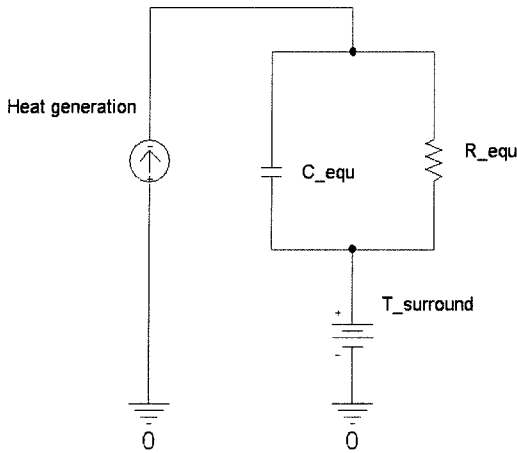


그림 4. 소자의 열 등가회로  
Fig. 4. Thermal equivalent circuit for device.

계산하였다. 소자의 저항특성은 백금저항체의 온도-저항특성을 따랐다. 실험적으로 측정된  $\alpha$ 는 0.003136이었으며 온도와 저항의 관계는 식 (1)과 같다. 이 식을 모델에 구현하기 위해 2전압제어 전류원을 사용하였다. 소자의 두 단자와 전력-발열, 온도-저항 관계를 구현한

모델을 그림 5(a)에 나타내었다.

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T)$$

$$(T = 2.10 \times P, \quad \alpha = 0.003136) \tag{1}$$

$$I_{CD} = \frac{V_{CD}}{R(T)}$$

$$= \frac{V_{CD}}{R_0(1 + \alpha(V_T - V_{room}))} \tag{2}$$

접촉연소식 센서에서 가연성 가스는 소자가 특정 온도 이상에서만 연소된다. 또 온도가 상승함에 따라 연소율이 점차 증가하게 된다. 그러나 특정 온도 이상이 되면 가스의 확산과 흡탈착 속도에 의해 연소율이 포화된다<sup>[7]</sup>. 연소시작온도, 포화온도, 각 가스가 가지는 폭발하한농도에서의 발열량은 소자의 크기나 촉매의 종류, 구조에 따라 결정된다. 대부분의 상용 접촉연소식 센서에서는 폭발하한농도 이내의 범위에서는 농도에 대한 출력의 선형성적 출력을 나타낸다. 이와 같은 이론에서 온도와 연소율의 관계를 그림 6과 같이 표현할 수 있다. 연소시작 온도와, 포화온도, 폭발하한농도의 한계발열량은 저농도와 폭발하한농도에

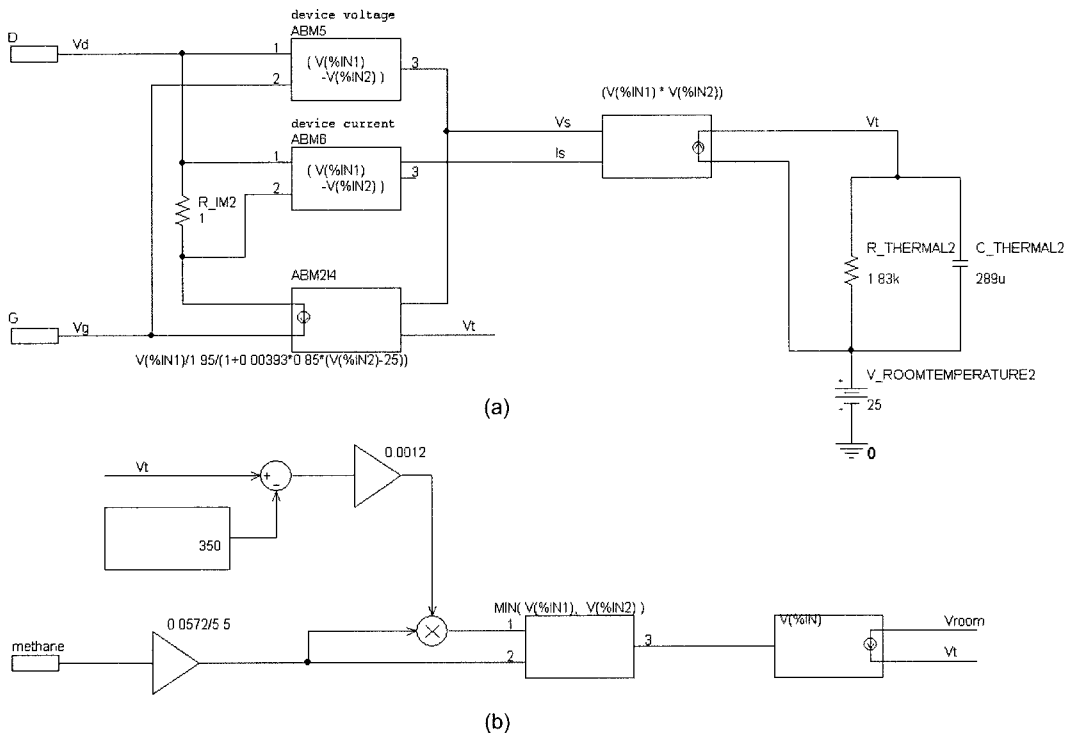


그림 5. 접촉연소식 센서의 회로 모델; (a) 열-저항 모델 (b) 가스 반응 모델  
Fig. 5. Equivalent circuit model for combustible catalytic sensor; (a) thermal-resistance model (b) gas reaction model.

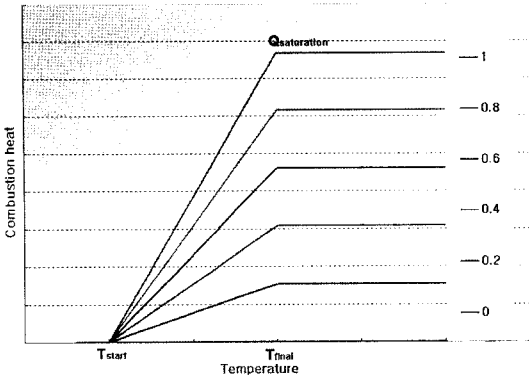


그림 6. 모델링에 사용된 연소 특성  
Fig. 6. Combustion characteristic for the modeling.

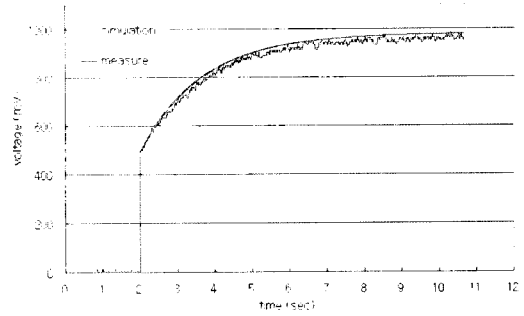
서 전압에 대한 출력 특성을 실험적으로 측정된 자료로부터 휘트스톤 브리지 회로의 출력과 저항변화관계, 전력-열량변화비율, 온도-저항특성 관계식으로부터 계산할 수 있다. 폭발하한농도에서 연소열량의 계산식을 식 (3)에 나타내었다. RT는 열등가회로의 저항이고 rcd는 보상소자가 검지소자에 대해 가지는 감도비이다. 실험적으로 측정된 보상소자의 감도는 검지소자의 12% 정도이다. α'은 소자의 실효적인 온도저항계수이다.

$$\Delta Q = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{2}{(1-r_{dc})\alpha'R_T V_i} V_T \quad (3)$$

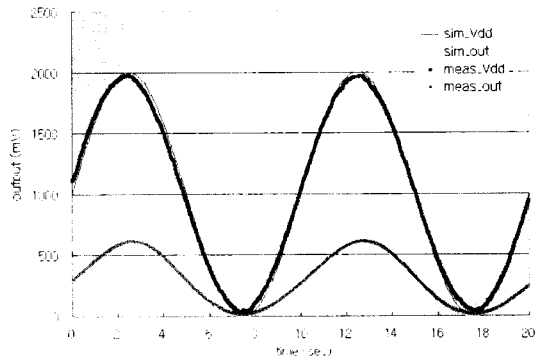
위와 같은 온도-열량의 관계를 회로소자로 구현하면 그림 5의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 가스의 농도는 전압으로 입력되고 이를 폭발하한농도에 대한 상대적인 비로 변환한다. 연소열량의 비율과 연소율의 증가, 포화 상태를 선택하여 열량으로 열등가회로에 공급되도록 구성하였다. 보상소자 모델은 열 특성이 검지소자와 유사하므로 열 등가회로와 전력-열량 변환부, 온도-저항 연산부는 동일하게 사용할 수 있다. 감도특성은 검지소자에 비해 약 0.12배 하였다. 보상소자는 유리질로 코팅되어 담체의 미세기공이 거의 없으므로 흡, 탈착과 확산에 의한 속도제한이 적다<sup>8)</sup>. 이를 반영하여 보상소자의 모델을 설계하였다.

#### 4. 모델을 사용한 시뮬레이션 특성 검증

디자인된 소자 모델의 열적 과도응답특성을 실제 소자의 특성과 비교하기 위해 10 Ω의 고정저항과 직렬로 소자를 연결하고 펄스신호와 0.1 Hz의 사인파(Vpp: 0-2 V)를 인가하였다. 이 회로의 과도응답특성을 오실



(a)



(b)

그림 7. 시간응답특성의 비교; (a) 펄스응답 (b) 사인파형 응답

Fig. 7. Comparison of simulation time response with measured result; (a) at pulse input (b) at sinusoidal input.

로스코프로 측정된 결과와 PSpice v9.2로 시뮬레이션한 결과를 그림 7에 나타내었다. 분배전압 파형이 거의 일치하고 있음을 볼 수 있는데 이는 저항, 온도, 전력의 물리적 되먹임 과정이 모델에서 동일한 특성으로 표현되었음을 확인 할 수 있다. 또한 시뮬레이션에서는 소자의 온도, 전력, 바이어스 상태를 실시간으로 확인할 수 있었다.

가스반응 특성에 대한 비교를 위해 브리지 회로를 구성하고 메탄 농도 1, 2, 3, 4, 5 vol.%에 대한 소자의 응답특성을 입력전압에 대해 측정된 결과를 측정하였다. 또한 PSpice에서 2nd sweep 옵션으로 메탄농도에 대응하는 전압을 변화시키면서 입력전압에 대한 DC 해석 시뮬레이션 결과를 보았다. 이 두 응답특성 그래프를 그림 8에 나타내었다. 가스 농도에 대해서 최소반응시작 전압이 거의 일치하고 있으며 저농도와 고농도에서 출력의 전압 의존성의 차이도 시뮬레이션 결과에서 비교적 잘 나타나고 있다.

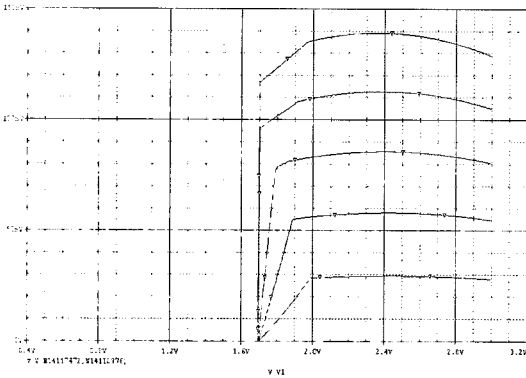
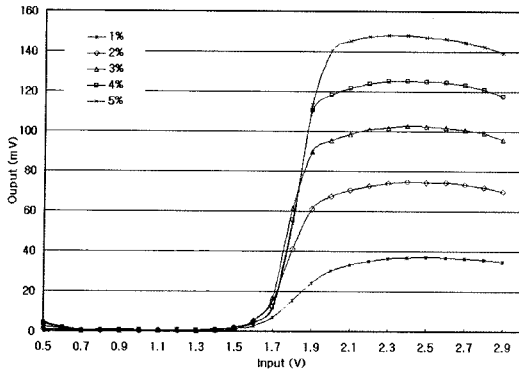


그림 8. 메탄에 대한 출력과 직류해석 결과  
 Fig. 8. The sensor response and D.C. simulation for methane concentrations.

### 5. 결 론

접촉연소식 센서의 동작원리에 기초하여 회로설계용 CAD(computer added design) 프로그램인 SPICE의 모델을 제시하였다. 물리적 열전달 이론과 화학적 연소 반응 이론으로 기본 모델을 구성하였으며 모델의 계수

들을 실제 센서로부터 측정해 내어 적용하였다. 시뮬레이션 결과와 측정회로의 출력을 비교하여 모델이 소자의 전기적 특성과 가스 반응 특성을 잘 반영함을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] T. Okabayashi, T. Toda, I. Yamamoto, K. Utsunomiya, N. Yamashita, and M. Nakagawa, "Temperature-programmed chemiluminescence measurements for discrimination and determination of fragrance", *Sensors and Actuators B*, vol. 74, pp. 153-156, 2001.
- [2] Y. Pengsheng and D. Huaxia, "Planar type of carrier catalytic methane sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 12, pp. 19-22, 1993.
- [3] 최우창, 최혁환, 권태하, 이명교, "가스센서용 마이크로 히터의 발열특성", *센서학회지*, 제7권, 제5호, pp. 356-362, 1998.
- [4] N. R. Swart and A. Nathan, "Coupled electrothermal modeling of microrheaters using SPICE", *IEEE Trans, Electron Devices*, vol. 41, no. 6, pp. 920-925, 1994.
- [5] S. M. Lee, D. C. Dyer, and J. W. Gardner, "Design and optimization of a high-temperature silicon micro-hotplate for nanoporous palladium pellistors", *Microelectroincs Journal*, vol. 34, pp. 115-126, 2003.
- [6] 김형표, 박세광, "자동차용 박막 히터형 공기유량 센서의 제작 및 특성", *센서학회지*, 제8권, 제5호, pp. 394-399, 1999.
- [7] 전학제, *촉매개론*, 한림원, pp. 192-226, 서울, 1992.
- [8] Alexander G Kozlov, "Optimization of structure and power supply conditions of catalytic gas sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 82, pp. 24-33, 2002.



이 상 문

- 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1997~2004년 센서기술연구소 전임연구원
- 2006년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 박사 졸업예정
- 주관심분야 : 마이크로 가스센서, MEMS 공정, 전자후각시스템



송 갑 득

- 1994년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1996년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2000년~현재 대구과학대학 경찰사이버보안과 전임강사
- 2006년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 박사 졸업예정
- 주관심분야 : 전기화학식센서, MEMS 공정, 나노박막소자



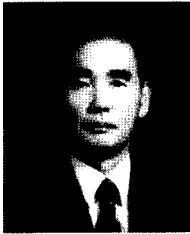
주 병 수

- 2000년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 2003년 경북대학교 전자공학과 박사과정 (박사수료)
- 주관심분야 : SAW 센서 설계 및 제작



이 윤 수

- 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2004년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 2005년~현재 경북대학교 ADMRC 연구 교수
- 주관심분야 : 전도성 고분자 센서, 평판 디스플레이소자



이 덕 동

- 연세대학교 전자공학과 공학박사학위
- 미국 Stanford Univ. 및 Cornell Univ. 전기전자공학과 교환교수
- 현 경북대학교 전자전기공학부 교수
- 주관심분야 : 환경가스센서, 전자후각센서