논문 99-8-5-5

자동차용 박막 히터형 공기유량센서의 제작 및 특성

김형표, 박세광*

Fabrication and Characteristics of Hot-film Air Flow Sensor for Automobile

Hyung-pyo Kim, Se-kwang Park*

요약

자동차용 박막 히터형 공기 유량센서는 스퍼터링법으로 백금박막을 증착하여 감광막 lift-off법으로 패터닝하고 1,000 ℃에서 열처리하였으며, 이 박막을 보호하도록 폴리이미드 PI-2723을 백금박막 위에 도포하여 보호막으로 사용하였다. 제작한 센서를 유량에 따른 특성을 측정한 결과 출력전압이 유량의 4제곱근에 비례하였고, 전체 측정 범위에서 유량에 따른 출력전압 오차는 0.7%이내 이었다. 제작한 센서를 -20 ℃ ~ 120 ℃ 온도범위에서 실험한 결과 ±1%의 온도에 따른 출력전압 오차가 발생하여 지금까지 개발된 유량센서의 ±3% 온도에 따른 출력전압 오차보다 ±2% 낮았다. 따라서 제작한 박막 히터형 공기 유량센서는 자동차에 적용하기 위한 사양을 만족하며 온도에 따른 출력전압 오차가 작으므로, 자동차 엔진의 공연비를 정확하게 제어할 수 있게 되어 배기가스 중 오염물질을 줄이고 연비를 향상시킬 수 있다.

Abstract

An automobile hot-film air flow sensor is deposited with platinum by sputtering method, patterned by photoresisted lift-off method, annealed in 1000 ℃ and passivated with PI-2723. The TCR of the fabricated hot-film is about 3500 ppm/℃. In the experiment, the output voltage of the sensor is in proportional to the fourth power root in the air mass flow range of 300 kg/h. The error in the full flow range is about ±0.7%. In the range of air temperature of -20℃ ~ 120℃, the error is about ± 1% that is ±2% lower than that of the reference sensor. Therefore, the fabricated hot-film air flow sensor satisfies the specification for automobile. Lower temperature error of the sensor provides to control the precise air/fuel ratio of automobile engine and results in improvement of a fuel mileage and the less amount of toxic gases emitted by automobile.

Ⅰ. 서론

최근 자동차 배출가스규제가 강화되면서 자동차 엔진에 흡입되는 공기량을 측정하여 가솔린 분사량을 제어하는 가솔린 분사장치에 공기량 측정장치가 필요하게 되었다. 자동차의 공기량 측정장치는 1960년대부터 발전되어 왔다. 특히 1970년도 이후 배출가스 규제강화로 자동차의 공기량 측정장치는 빠른 속도로 진보하였고, 또 1980년대의 발달한 전자기술로 전자식 측정방식이 개발되었다. 최근에는 배출가스에 대한 규제가 선진국으로부터 더욱더 강화되고 있어 자동차 엔진의 공연비를 보다 더 정확하게 제어하기 위해 공기량 측정장치가 더욱더 고정밀도를 가지도록 요구되어지고 있다[1].

상주대학교 전자전기공학과 (Dept. of Electronic and Electrical Eng., Sangju Nat'l Univ.)
* 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronic and Electrical Eng., kyungpook Nat'l Univ.)
<접수일자 : 1999년 7월 29일>

본 논문에서는 박막 히터형 공기유량센서를 이용하여 공기량을 측정하였다. 이 방식은 직접 질량유량 측정방식이므로 공기 질량을 직접 정확하게 계측할 수 있고, 응답속도가 빠르고, 질량을 측정하므로 고도와 흡입 공기 온도가 변화해도 측정상의 오차가 적다는 장점이 있다[2-4]. 박막 히터형은 박막 히터를 통과하는 공기량과의 열손실 관계를 측정하여 계량하는 방식이므로 온도의 영향이 아주 뚜렷하게 나타나서 온도보상 센서로 보상해야 한다[5-7].

따라서 본 논문에서는 박막 히터형 공기유량센서를 자동차용으로 적용하기 위해서 박막 히터, 구동회로와 온도보상 회로를 설계 및 제작하였다. 박막 히터는 백금을 사용하여 스퍼터링과 감광막 lift-off법으로 형성하였다. 박막 히터가 정온도로 동작하도록 궤환 회로를 형성하고 공기 온도와 공기량을 변화시킬 수 있는 실험장비를 제작하였다. 실험은 공기량의 가변에 따른 출력전압 특성과 온도변화에 따른 출력전압을 각각 측정하였다.

II. 박막 히터형 공기유량센서의 동작 원리

박막 히터형 공기유량센서는 그림 1과 같이 공기가 통과하는 파이프 내부에 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_f)를 공기 흐름과 평행하게 위치시키고 회로의 나머지 부분은 파이프 외부에서 동작한다. 이 박막 히터형 공기유량센서의 동작 원리는 측정 소자(R_s)가 주위 온도보다 높게 가열되어 흐르는 공기 속에 놓여 있으면 측정 소자는 흐르는 공기로 열량을 빼앗겨 냉각된다. 이때 빼앗기는 열량을 전기회로를 이용하여 전력으로 측정하여 공기 유량과의 관계를 공식화한 것이 hot-wire anemometer의 원리로써 일반적으로 식(1)로 공식화된다.

$$P_s = (A + B\,Q_f^{1/2})\Delta T \qquad (1)$$

식(1)에서 소자에 공급되는 전력(P_s)는 공기 유량(Q_f)의 제곱근에 비례하는 것을 알 수 있다. 여기서 A와 B는 소자 재료에 의해서 정해지는 상수이고, ΔT는 측정 소자의 온도와 공기 온도와의 차이이다.

가열된 측정 소자가 공기 흐름으로 인해 냉각되어 손실되는 열량을 다시 공급하기 위해, 그림 1과 같이 궤환 회로를 이용하여 전력을 증가시키면 측정 소자는 다시 가열되어 냉각되기 전의 온도로 상승하게 된다. 이때 다시 공기량이 증가하면 측정 소자에 궤환 회로가 공급해야 할 전력은 다시 증가한다. 이렇게 공기량에 따라 변화되는 전력을 측정함으로써 공기량을 측정하는 원리를 정온도형이라 한다. 박막 히터형 공기유량센서의 측정원리에는 정전류형과 정온도형이 있는데 정온도형이 정전류형보다 회로적으로 복잡하지만 감도와 응답속도 등에서 특성이 우수하다. 본 논문에서는 정온도형 측정원리를 적용하였다.

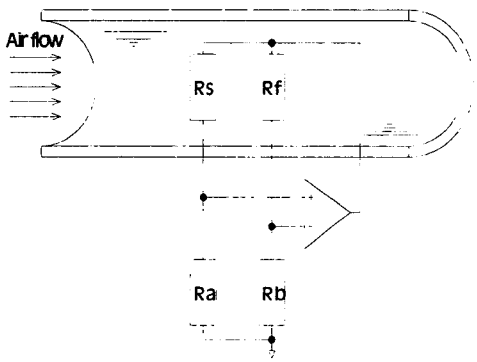


그림 1. 센서 설치 구조
Fig. 1. Schematic diagram of the sensor.

이 센서의 구조는 그림 1과 같이 측정 소자인 R_s, 온도보상 소자인 R_f, 궤환 브릿지의 평형 저항인 R_a, R_b와 궤환 신호를 증폭하여 브릿지에 전력을 공급하는 연산증폭기로 구성된다. 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_f)는 저항온도계수를 크게 하여 온도 변화에 따라 저항값이 크게 변하도록 하고 R_a와 R_b는 온도계수를 작게 하여 온도가 변화하더라도 저항값의 변화가 없게 한다. 또 R_s는 저항값을 작게 하고 R_f는 저항값을 크게 하여 두 저항의 저항비를 크게 하면 연산증폭기의 출력전압이 브릿지 상단에 인가될 때 R_s에 전류가 많이 흐르게 되고 R_f에는 전류가 작게 흐르게 된다. 전류가 많이 흐르는 R_s는 열이 발생하여 가열되고, 전류가 작게 흐르는 R_f는 열이 발생하지 않으므로 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_f)는 ΔT의 온도차이가 생긴다. 가열된 측정 소자는 온도계수가 크기 때문에 공기 흐름에 따라 열손실이 생기면서 공기온도에 따라 저항값이 변화하게 되고, 온도보상 소자는 가열되지 않았기 때문에 공기 흐름에 따라 열손실이 없고 공기 온도에 따라서만 저항값이 변화된다. 이런 온도에 따른 동작을 이용하여 공기온도 변화에 대한 공기유량센서의 출력을 보상할 수 있다.

III. 센서 제작

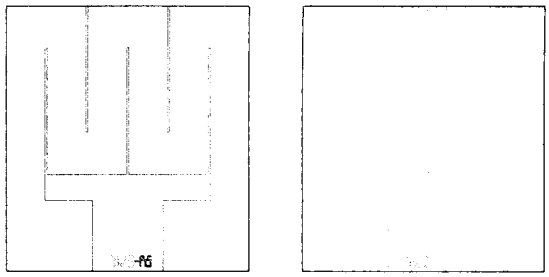
자동차용 박막 히터형 공기유량센서의 전체 제작과정은 먼저 시뮬레이션으로 센서를 설계하여 이 데이터를 이용하여 마스크를 제작하였다[8]. 그리고 자동차의 사용 온도범위와 공기 유량범위에서 실험이 가능하도록 실험장비를 설계 제작하여 유량과 온도에 따라 실험을 수행하였다[9].

센서는 5.7×5.7 mm^2 크기로 측정 소자, 온도보상 소자로 각각 그림 2의 마스크 패턴으로 제작하였다. 소자 패턴의 패드부분은 리드선을 쉽게 붙이기 위해 충분히 크게 제작하였다. 그림 2(a)의 측정 소자는 10 Ω내외의 작은 저항값을 갖기 위해서 선폭을 1,000 ㎛로 하였다. 그림 2(b)의 온도보상 소자는 저항값을 크게 하기 위해서 선폭을 50 ㎛로 하였다.

센서는 감광막 lift-off방법을 이용하여 그림 3의 제작 공정도로 제작하였다. 먼저 n형 실리콘 웨이퍼를 열산화하여 5,000 Å의 SiO_2를 형성하여, 그 위에 positive PR을 spin coating하여 패터닝한 후 백금을 DC 마그네트론 스퍼터링법으로 증착하였다. 백금이 증착된 웨이퍼를 아세톤용액에 넣어 초음파로 30초 정도 처리하면 PR이 녹으면서 PR위에 있는 백금은 제거되고 실리콘 산화막 위에 증착된 백금만 남게 되어 백금 저항체를 형성한다.

센서를 백금 박막으로 제작할 때 이 박막의 온도계수가 벌크 특성에 가까운 조건을 얻기 위해서 스퍼터링법으로 증착 두께를 약 1 ㎛로 하였다. 센서의 보호막은 공기 유량 측정에 영향을 주지 않고 센서의 저항패턴을 보호할 수 있어야 하며, 또한 전기적으로 저항값이 커야 하며, 반도체공정으로 패턴이 가능해야 한다. 또 박막 히터는 고온으로 가열되므로 열에 의한 변형이 없어야 한다. 위의 조건을 만족하는 것으로 보통 Si_3N_4를 사용하지만 고가의 장비가 필요하고, 고온에서 증착이 된다. 본 연구에서는 위의 조건을 만족하고 쉽게 증착할 수 있는 폴리이미드로 Dupont사의 PI-2723으로 스핀 코팅하여 150 ℃에서 10 min, 350℃에서 30 min 각각 열처리하여 사용하였다.

백금박막으로 제작한 자동차용 공기 유량센서의 센서소자는 그림 4와 같이 패키징하였다. 엔진에 흡입되는 초속 30 m이상의 유속에 견딜 수 있도록 센서를 밀착시켰고 센서의 리드선 접합 부분이 떨어지지 않도록 실버 에폭시로 접착하였다.



(a) 박막히터 소자 마스크. (b) 온도보상 소자 마스크.
(a) Mask of hot-film sensor element. (b) Mask of temperature compensation sensor element.

그림 2. 센서 소자 마스크
Fig. 2. Sensor element mask.

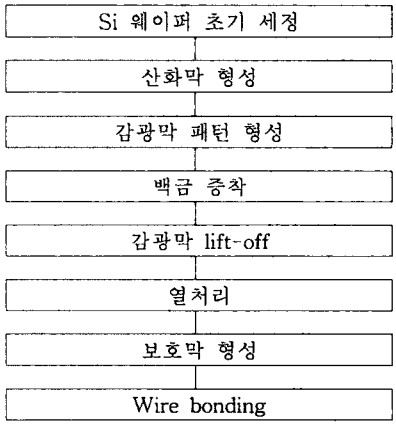


그림 3. 센서소자 제작 공정도
Fig. 3. Processes sequence for the fabrication of a sensor element .

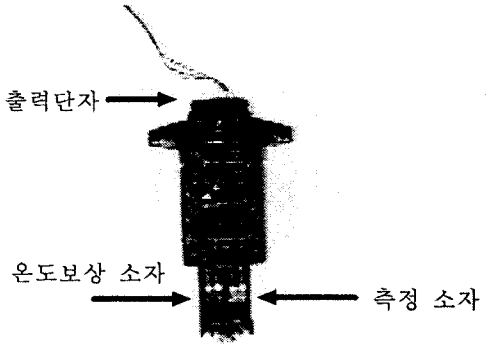
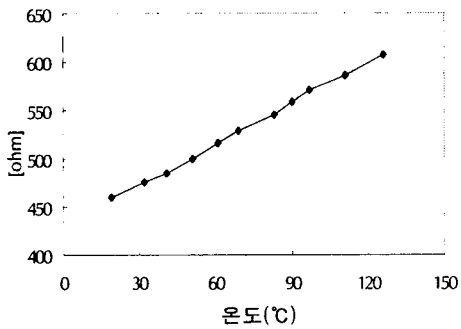


그림 4. 센서소자 패키징 사진.
Fig. 4. Photograph of sensor element packaging.

Ⅳ. 실험 및 결과

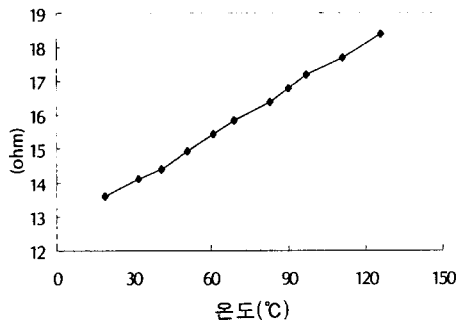
1. 센서 소자 저항값

그림 5는 백금박막으로 제작한 측정 소자(R_s)와 온도 보상 소자(R_f)의 온도에 따른 저항값 변화를 나타낸 것으로 저항온도계수는 3,500 ppm/℃이였다. 이 온도계수 값은 백금의 벌크 저항온도계수인 3,850 ppm/℃ 보다 낮지만 박막 히터형 공기 유량센서소자로는 사용이 가능하다. 실제로 백금이 벌크 온도계수를 가지면 백금 측온 저항체로 사용할 수 있기 때문에 온도센서로도 제작이 가능하다. 백금 온도계수에 영향을 주는 인자로는 주로 증착시의 불순물 증착과 열처리 조건에 의해 결정된다.



(a) 박막 히터 센서 소자

(a) Hot-film sensor element



(b) 온도보상 센서 소자

(b) Temperature compensation sensor element

그림 5. 온도에 따른 저항 변화

Fig. 5. Resistance as a function of temperature.

2. 유량 실험

그림 6은 제작한 박막 히터형 공기 유량센서를 공기 유량을 변화시키면서 출력전압을 측정한 결과이다. 기준센서의 전압은 제작한 센서와 비교하기 위해서 이 센서의 출력전압에 2 V를 더한 값이다. 기준센서는 Siemens사의 자동차용 박막 히터형 공기 유량 센서로 국내의 일부 차량에도 적용되어 사용되고 있는 제품이다. 유량은 1,500 cc의 가솔린 엔진을 탑재한 자동차의 흡입 공기 유량 범위인 300 kg/h 까지 측정하였다. 출력전압은 식(1)에서와 같이 유량의 4제곱근에 비례하였고, 기준센서와 제작한 센서의 유량에 따른 출력전압 오차는 0.5%이내 이었다.

그림 7은 유량을 상승하였다가 하강하면서 측정하는 히스테리시스 특성을 측정한 것으로 상승시 및 하강시의 출력전압은 차이가 없음을 알 수 있다.

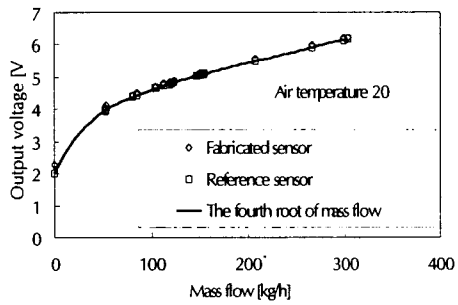


그림 6. 제작한 센서와 기준센서의 유량에 대한 출력 전압

Fig. 6. Output voltage versus mass flow for reference and fabricated sensors.

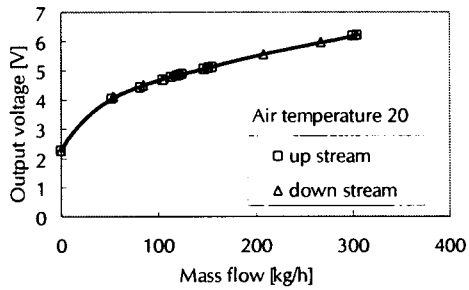


그림 7. 히스테리시스 특성

Fig. 7. Hysteresis characteristics.

3. 온도 실험

그림 8은 공기 유량이 없는(0 kg/h) 상태에서 온도 변화에 따른 출력전압을 나타낸 것이다. 여기서 50 ℃ 이상에서 전압이 증가하는 것은 공기의 자연대류에 의

해서 생기는 공기흐름의 증가 때문인 것으로 사료된다.

그림 9는 여러 가지 공기유량에 대해서 상온에서 60 ℃까지 온도를 상승시키면서 수행한 온도 실험 결과이다. 이 실험에서는 그림 8과 같은 50 ℃이상에서 출력전압이 상승하는 현상이 일어나지 않는데 이는 공기 유량이 흐르고 있어 강제대류에 의한 흐름만 있기 때문이다. 온도가 올라갈수록 출력전압이 내려가는 것은 온도가 올라갈수록 공기의 밀도가 낮아지기 때문이다. 공기의 밀도가 낮아지면 공기의 유속은 일정할지라도 공기 질량 유량은 적어진다. 그림 8은 전체 온도 범위에 대해서 ±1 %의 온도에 따른 출력전압 오차가 생기므로 지금까지 개발된 유량센서의 ±3 % 온도에 따른 출력전압 오차보다 ±2 % 낮다.

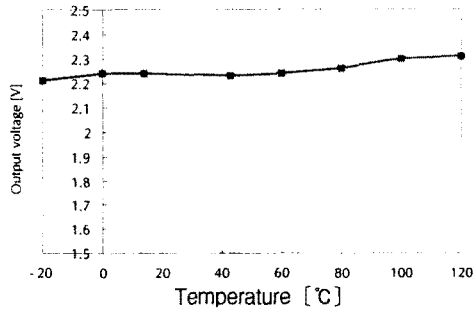


그림 8. 공기유량이 없을때(0 kg/h) 온도에 대한 출력전압

Fig. 8. Output voltage versus temperature without mass flow (0 kg/h) of closed-loop circuit.

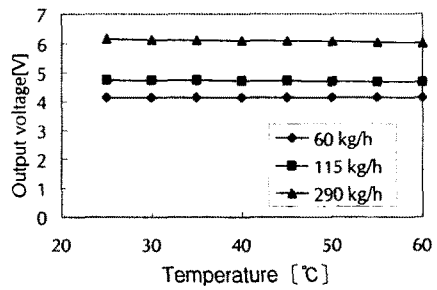


그림 9. 여러 가지 공기유량에서 온도에 대한 출력전압

Fig. 9. Output voltage versus temperature in various mass flows.

그림 10은 공기유량이 115 kg/h일 때 기준센서와 제작한 센서에 대해서 온도에 따른 출력전압 변화를 측정한 결과이다. 기준센서의 출력전압은 측정센서와 비교하기 위해서 오프셋 전압 2 V를 더한 값이다. 기준센서와 제작한 센서는 각각 ±1.3 %, ±0.9 %의 유량에 따른 출력전압 오차가 있었다.

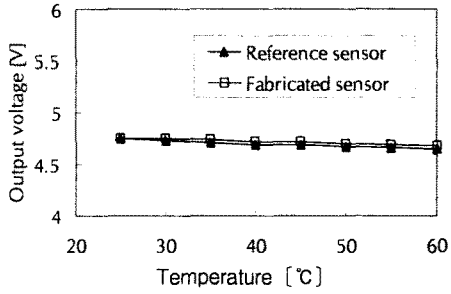


그림 10. 공기유량이 115 kg/h 일 때 기준센서와 제작한 센서의 온도에 대한 출력전압

Fig. 10. Output voltage versus temperature with mass flow 115 kg/h for reference and fabricated sensors.

V. 결론

자동차용 박막 히터형 공기 유량센서를 제작하여 실험을 수행하여 기준센서와 비교하였다. 측정 소자와 온도보상 소자를 백금박막으로 제작하고, 이 박막이 벌크에 가까운 온도계수를 갖도록 하기 위해서 1,000 ℃에서 열처리하였으며, 이 박막을 보호하도록 폴리이미드 PI-2723을 백금박막 위에 도포 하여 보호막으로 사용하였다. 제작한 센서를 유량 실험한 결과 출력전압이 유량의 4제곱근에 비례하였고, 기준센서와의 유량에 따른 출력전압 오차는 0.5%이내 이었다. 제작한 센서를 온도 실험한 결과 전체 온도 범위에 대해서 ±1%의 온도에 따른 출력전압 오차가 생기므로 지금까지 개발된 유량센서의 ±3% 온도에 따른 출력전압 오차보다 ±2% 낮았다. 각 온도와 전체 유량변화 범위에서 출력전압은 최대 ±0.7%의 오차가 있었다. 공기유량이 115 kg/h일 때 기준센서와 제작한 센서에 대해서 온도에 따른 출력전압 변화를 측정한 결과, 기준센서와 제작한 센서는 각각 ±1.3%, ±0.9%의 유량에 따른 출력전압 오차가 있었다.

따라서 제작한 박막 히터형 공기 유량센서는 자동차에 적용하기 위한 사양을 만족하며 온도에 따른 출력전압 오차가 작으므로, 자동차 엔진의 공연비를 정확하

게 제어할 수 있게 되어 배기가스 중 오염물질을 줄이고 연비를 향상시킬 수 있다. 이 논문의 결과는 마이크로 유속센서에 적용할 수 있고, 산업용의 질량유량계의 제작에도 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 김재휘, 자동차 가솔린분사장치, 중원사, 1993.

[2] Eric Chowanietz, Automobile electronics, SAE international, 1995.

[3] Ronald K. Jurgen, Automotive electronics handbook, McGraw-Hill, 1994.

[4] 강영규, "자동차 엔진용 센서의 발전과 추이," 센서기술, 제1권, 제2호, pp. 14-23, 1994.

[5] W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel, Sensors, VCH, vol. 4, 1990.

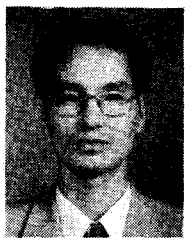
[6] 강윤석, 김형표, 박세광, "자동차용 열박막형 공기유량계에 관한 기초연구," 1994년 센서기술학술대회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 191-199, 1994.

[7] 김형표, 박세광, "정온도형 유속 및 유량 측정센서," 센서학회지, 제1권, 제1호, pp. 35-41, 1992.

[8] 김형표, 박세광, "SPICE를 이용한 열막유량센서의 시뮬레이션", 1996년 센서기술학술대회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 41-47, 1996.

[9] 김형표, "반도체 공정을 이용한 자동차용 열박막 공기유량센서의 제작과 그 온도보상", 경북대학교 전기공학과 박사학위논문, 1998.

著 者 紹 介



김 형 표

1992년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학사), 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년 ~ 1998년 보국전기공업(주) 기술연구소 근무, 1998년 ~ 현재 상주대학교 전자전기공학과 전임강사, 주관심 분야: 유속/유량 센서, MEMS

박 세 광

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-04, p.41 참조

현재 경북대학교 전기공학과 부교수