

온도장 가시화를 위한 연성회로기판을 이용한 온도센서 어레이 제작 및 성능평가

안철희* · 김형훈* · 차제명* · 권봉현* · 하만영* · 박상후* · 정지환* ·
김귀순** · 조종래*** · 손창민**** · 이정호***** · 고정상†

Fabrication and Performance Evaluation of Temperature Sensor Matrix Using a Flexible Printed Circuit Board for the Visualization of Temperature Field

Cheol Hee Ahn, Hyung Hoon Kim, Je Myung Cha, Bong Hyun Kwon,
Man Yeong Ha, Sang Hu Park, Ji Hwan Jeong, Kui Soon Kim,
Jong Rac Cho, Chang Min Son, Jung Ho Lee and Jeung Sang Go

Abstract. This paper presents the fabrication and performance measurement of a temperature sensor array on a flexible substrate attachable to a curved surface using MEMS technology. Specifically, the fabrication uses the well-developed printed circuit board fabrication technology for complex electrode definition. The temperature sensor array are lifted off with a 10×10 matrix in a 50 mm×50 mm to visualize temperature distribution. Copper is used as temperature sensing material to measure the change in resistances with temperature increase. In a thermal oven with temperature control, the temperature sensor array is characterized. The constant slope of resistance change is obtained and temperature distribution is measured from the relationship between resistance and temperature.

Key Words: Temperature Sensor Array(온도센서 어레이), Flexible Printed Circuit Board(연성회로기판), Resistance Temperature Detector(측온저항체), MEMS Fabrication Process(MEMS 제조 공정)

1. 서 론

냉장고, 에어컨 및 컴퓨터 등과 같은 전자 제품의 효율을 향상시키기 위해 열에너지의 매니지먼트는 필수적이다. 이들 전자 제품들은 열전달 효율 증가 및 설치

공간의 제약으로 인해 일반적으로 곡면 형상으로 제작되고 있다.

특히 열에너지 효율을 평가하기 위해서는 고체 표면의 온도 분포를 측정하고 이로부터 열전달 계수를 구하여야 한다. 표면이 평면인 경우, 다양한 열전달 상황에 대한 열전달 계수에 대한 상관식이 소개되어 있으나 곡면에서의 열전달 계수의 경우, 곡면에 온도센서를 부착하고 그 분포를 측정하기 곤란하기 때문에 열전달 계수의 상관식에 대한 소개가 부족하다⁽¹⁾.

곡면에서의 열전달 계수를 측정하기 위해 기존 열전대나 열저항 변화를 이용하는 온도센서를 부착하여야 하는데 이는 유체의 유동에 영향을 미치기 때문에 정확한 열전달 계수를 예측하기 어려운 단점이 있다. 그러므로 곡면에서의 온도 분포를 가시화하고 이로부터 열전달 계수를 얻기 위한 온도 분포 측정 기술에 대한

†School of Mechanical Engineering Pusan National University

E-mail : micros@pusan.ac.kr

*School of Mechanical Engineering Pusan National University

**Department of Aerospace Engineering Pusan National University

***Division of Mechanical and Information Engineering Korea Maritime University

****Rolls-Royce International limited

*****Korea Institute of Machinery and Materials

연구가 필요하다.

곡면을 갖는 고체 표면의 온도 분포를 측정하기 위한 방법은 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째로 곡면에 온도센서 어레이를 직접 제작하여 온도 분포를 측정하는 방법이 있다. 또 다른 방법으로 연성 재질의 기판에 온도센서를 배열로 제작하고, 이를 곡면에 부착하여 온도 분포를 측정하는 방법이 있다.

일반적으로 온도센서는 2차원 평면에 형상을 제작하는 반도체 공정을 이용하여 제작한다. 그러나 곡면 위에 온도센서를 직접 제작할 경우, 회전을 이용한 감광제의 도포, 피사체와의 거리에 따라 형상 정밀도를 갖는 사진 공정 및 센서 형상 식각 등의 제조 공정에 많은 한계가 있다.

본 연구에서는 온도 분포를 가지는 곡면의 온도가시화를 위해 연성회로기판에 미소기전집적 기술(MEMS)을 이용하여 곡면에 부착 가능한 온도센서 어레이를 제작하고, 제작된 온도센서의 성능 특성을 평가하고자 한다.

2. 온도 가시화 센서 어레이 설계

곡면에 부착할 수 있는 연성회로기판(FPCB; flexible printed circuit board) 제조 기술과 반도체 공정 기술을 이용하여, 전극 와이어가 제작된 연성회로기판 위에 구리 박막을 증착, 식각하여 온도센서 어레이를 제작한다.

온도 측정은 온도를 전기적 신호로 전환하여 측정하는 측온저항체(resistance temperature detector)인 구리 박막을 이용하였다. 측온 저항체는 금속의 전기 저항이 온도 변화에 따라 변하는 성질을 이용하여 전기 저항과 온도와 관계로부 찾고 이로부터 저항 변화에 따라 온도를 측정하는 원리이다. 그리고 선형성이 좋은 장점이 있다. 온도와 금속의 전기 저항과의 관계는 식 (1)과 같이 주어진다⁽²⁾.

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

상온에서 초기 저항 값이 40 Ω이 되도록 온도센서 하나의 길이는 14.15 mm, 선폭은 50 μm, 두께는 3000 Å으로 설계하였으며, 설계된 센서의 크기는 1.22 mm × 2.18 mm이다. 계산에서 구리의 비저항 ρ는 0.0172 μΩ·m, 선형계수 α는 0.00393/°C로 사용하였다.

온도센서 어레이를 제작할 연성회로기판의 재질은 절연성, 열적 내성, 기계적 강도, 화학적 내성 및 고온

에서의 안정성을 가진 폴리이미드(polyimide)를 사용하였다^(3,4,5,6,7).

연성회로기판에 제작될 센서의 출력 신호를 읽기 위한 전극 와이어는 기판의 공간을 활용하기 위해 센서가 제작될 반대 면에 위치하도록 설계하였으며, 기판에 커넥터를 직접 연결할 수 있도록 전극 배열을 조절하였다. 센서와 전극 와이어와의 연결을 위하여 기판에 구멍을 내어 접점을 가지도록 하였으며, 50 mm × 50 mm 면적 안에 10 × 10로 총 100개의 온도센서가 배열 되도록 설계하였다.

와이어의 저항 값이 온도 측정에 미치는 영향을 최소화하기 위해 전극 와이어의 선폭을 150 μm, 접점과의 연결 부위는 100 μm, 두께는 10 μm로 센서의 설계 값보다 크게 하였으며, 센서와 연결될 접점의 반경은 250 μm 크기를 갖도록 설계하였다.

3. 온도 가시화 센서 어레이 제작

연성회로기판을 이용한 온도센서 어레이는 반도체 제조 공정 기술과 연성회로기판 제작 기술을 이용하여 제작하였으며, 공정 순서는 다음과 같다.

첫째로 온도센서 어레이가 제작될 연성회로기판을 Fig. 1(a)와 같이 연성회로기판의 아랫면에 임베디드된 구리 박막을 식각하여 전극 와이어를 제작하였으며, 윗면 역시 임베디드된 구리 박막을 식각하여 온도센서와 와이어와의 접점을 제작하였다. 윗면의 접점과 아랫면의 구리 와이어와는 기판에 구멍을 형성하고 홀을 도금하여 전기적으로 연결하였다.

둘째로 제작된 연성회로기판에 Fig. 1(b)와 같이 실리콘 웨이퍼에 감광제(AZ5214E)를 500 rpm으로 5초간 회전시킨 뒤, 1000 RPM으로 속도를 올려 30초간 회전시켜 감광제를 웨이퍼에 고르게 코팅하고 105 °C에서 2분간 열처리(soft bake)를 진행함과 동시에 감광제의 점성력을 이용하여 연성회로기판을 웨이퍼에 부착하였다.

셋째로 연성회로기판이 부착되어 있는 웨이퍼를 Fig. 1(c) - (d)와 같이 사진작업 공정 중 형상 반전 공정(image reversal process)을 적용하여 감광제에 센서 형상을 형성하였다. 105°C에서 2분 동안 열처리(soft bake)를 수행한 후, 64.26 mJ의 광량을 조사한 후, 110 °C에서 5분간 반전 열처리(PEB)하였다. 기판이 실리콘 웨이퍼일 경우 110°C에서 2분간 반전 열처리를 하여도

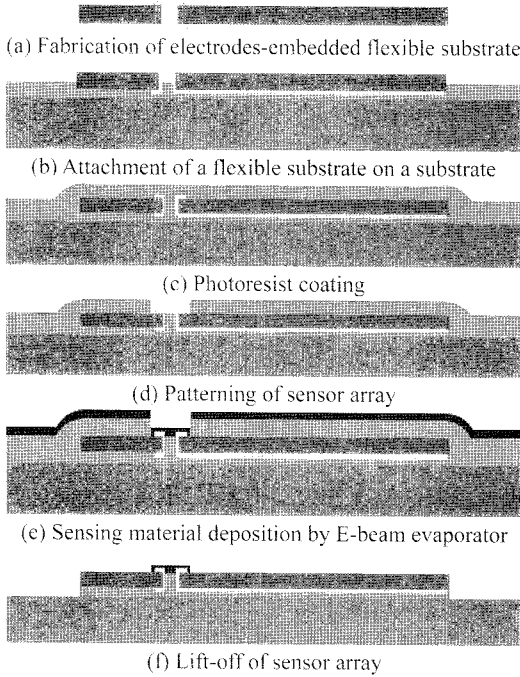


Fig. 1. Fabrication process of temperature sensor array on a flexible substrate

충분하나 연성회로기판을 붙여 공정을 진행하기 때문에 열처리 시간이 증가하였다. 광량 196.35 mJ로 전면노광(flood exposure)후 기판을 현상액(AZ300MIF)을 이용하여 감광제에 패턴을 형성하였다.

넷째로 Fig. 1(e)와 같이 E-beam 증착기(E-beam evaporator)로 금속의 부착력을 향상시키기 위해 200 Å두께의 크롬을 증착한 후, 이어서 3000 Å두께의 구리

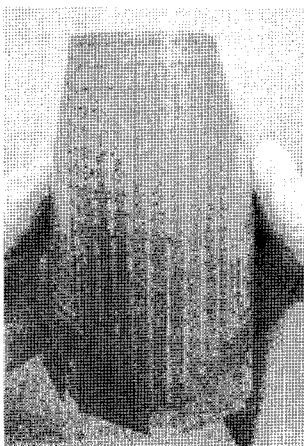


Fig. 2. A fabrication result of the temperature sensor array on a flexible substrate

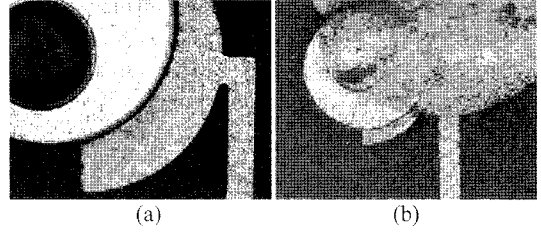


Fig. 3. (a) Disconnected junction, (b) Connected by using silver paste

를 최종적으로 증착하였다.

마지막으로 Fig. 1(f)와 같이 금속이 증착된 시편을 아세톤 용액에 넣고 감광제를 제거함으로써 온도센서 어레이 제작을 완료하였다. Fig. 2는 곡면 위에 부착 가능하도록 제작된 굽힘 가능한 온도센서 어레이를 보여준다.

Fig. 3(a)와 같이 연성 기판 밑면에 제작된 배선과 센서를 이어주기 위한 접합 부위와 증착된 구리의 두께 차이와 E-beam 증착기의 증착 특성인 그림자 효과(shadow effect)로 인해 센서와 와이어간의 접합부위의 전체적 연결이 좋지 않아 스크린 프린팅 공정을 이용하여 금속 페이스트로 Fig. 3(b)와 같이 센서와 전극 와이어를 접합하였다.

4. 온도 가시화 센서 어레이 저항 측정

제작된 온도센서 어레이의 온도 측정을 위한 실험 장비 구성은 Fig. 4와 같이 센서에 균일한 온도를 가할 수 있는 오븐과 센서의 저항 값을 읽을 데이터 로거(DAQ) 장비로 구성하였으며, 온도에 따른 저항을 측

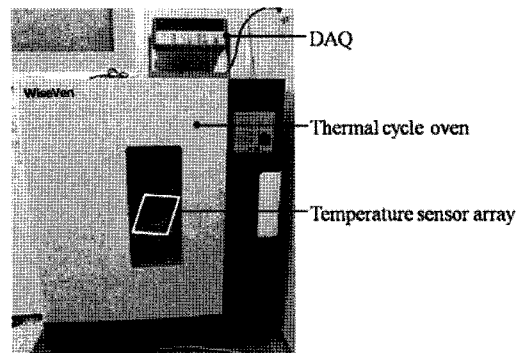


Fig. 4. A measurement system for a temperature sensor array

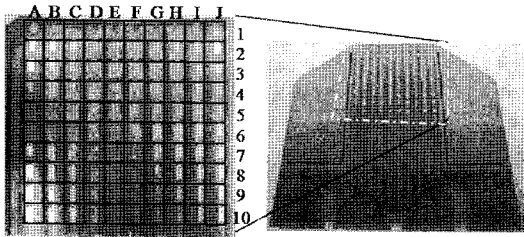


Fig. 5. Grid for the temperature sensors

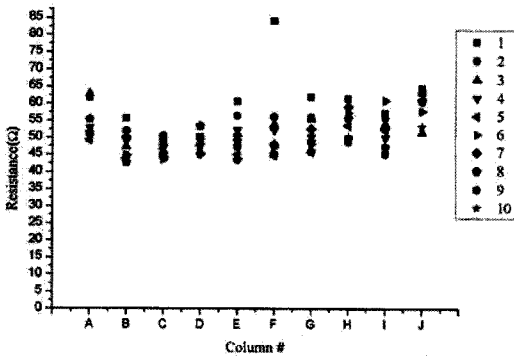


Fig. 6. Resistance measurement at each temperature sensor array at a room temperature

정하기에 앞서 Fig. 5와 같이 센서의 위치에 따른 좌표를 부여하였다.

상온에서 각 센서의 저항 값들은 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 일정한 분포를 가지지만 동일한 값을 가지지 않는다. 상온에서 센서의 저항 값은 42.6-64.2 Ω의 분포를 가지며 평균 51.56 Ω으로 나타났다. 센서의 저항 값이 실제 값인 40 Ω보다 실제 저항이 크고 다르게 나타난 이유는 측정 시 전극 와이어의 저항 값 2.6-

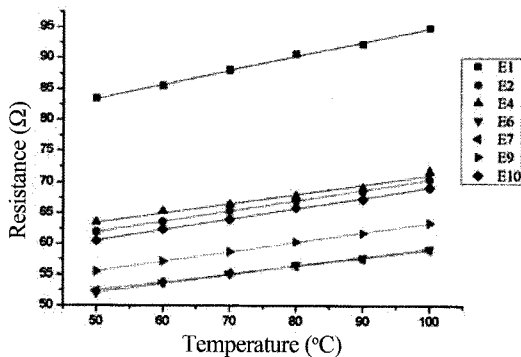


Fig. 7. Linear fit of resistance change for increasing temperature at column E

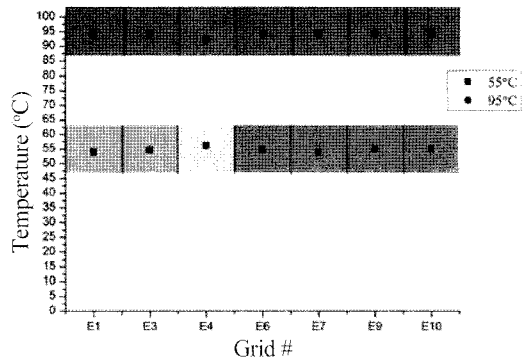


Fig. 8. Measurement of temperature distribution at column E and visualization of temperature distribution

24.2 Ω이 더 해졌기 때문이다.

50°C에서 100°C까지 10°C씩 온도를 증가시켜 가며 온도에 따른 각 센서의 저항 값을 측정하였다. E열에서 측정한 저항 값을 Fig. 7에 도시하였다. 각 센서의 저항 값이 온도에 따라 선형적으로 저항 값이 증가함을 볼 수 있다. 온도 변화에 따른 저항 값 변화는 평균 0.164 Ω/°C, 표준 편차는 0.018 Ω/°C로 나타났다. 각 센서의 온도에 따른 저항 값을 선형화 하여 얻은 기울기 값과 초기 저항 값을 식(1)의 온도에 대해 정리한 식(2)에 적용하여 55°C와 95°C에서 측정한 온도를 Fig. 8에 가시화하였다.

$$T = \frac{1}{\alpha}(R - R_0) \quad (2)$$

실험을 통해 얻은 초기 저항 값과 기울기 값을 바탕으로 측정한 온도의 평균 오차는 55°C에서 1.63%, 95°C에서 2.89%로 얻어졌다. 오차가 발생한 이유는 온도 측정 중 구리가 산화되어 측온저항체의 저항 값이 달라졌기 때문이다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 온도장의 가시화를 위해 반도체 제조 공정 기술과 연성회로기판 제작 기술을 이용하여 온도 센서 어레이를 제작하고 그 성능을 평가하였다.

전극 와이어가 제작된 폴리이미드 연성회로기판에 측온저항체를 50 mm×50 mm 면적 안에 10×10의 배열을 갖도록 설계, 제작하였다. 기판에 제작되어 있는 와이어의 길이가 위치에 따라 달라 센서의 초기 저항

값들이 설계 값에 비해 다소 크게 나왔으나 온도에 따른 센서의 저항 값을 보정하여 온도측정이 가능함을 보였다. 온도에 대한 저항 값의 기울기 값과 초기 저항 값을 이용하여 온도를 측정된 결과, 동일 온도에 대한 센서의 평균 오차는 55°C에서 1.63%, 95°C에서 2.89%임을 알 수 있었다. 이러한 오차는 센서 표면에 산화 방지막을 제작함으로써 줄일 수 있을 것이다.

곡면에 부착 가능한 온도센서 어레이를 이용하여 냉장고, 에어컨 및 컴퓨터 등과 같은 전자 제품의 효율을 향상시키기 위한 열에너지의 메니지먼트에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 2001, "Introduction of the heat transfer 4th Edition," John Wiley & Sons Inc, pp.370-406
- 2) Ogam technology, www.ogamtech.com
- 3) S.Y. Xiao, L.F. Che, X.X. Li, Y.L. Wang, 2007, "A novel fabrication process of MEMS devices on polyimide flexible substrates," Microelectronic Engineering, Vol.85, pp. 452-457
- 4) Fukang Jiang, Gwo-Bn Lee, Yu-Chong Tai, Chih-Ming Ho, 1999, "A flexible micromachine-based shear-stress sensor array and its application to separation-point detection," Sensors and Actuators, Vol.79, pp. 194-203
- 5) Kui Liu, Wei-zheng Yuan, Jin-jun Deng, Bing-he Ma, Cheng-yu Jiang, 2007, "Detection of the boundary-layer separation point based on the flexible sensor arrays," Microsystem Technology, Vol.14, pp. 1-6
- 6) Bonnie T. Chia, Duo-Ru Chang, Hsin-Hung Liao, Yao-Joe Yang, Wen-Pin Shih, Fu-Yu Chang, Kuang-Chao Fan, 2007, "Temperature Sensor Array Using Flexible Substrate," IEEE 20th International Conference , pp.589-592
- 7) Takao Someya, Tsuyoshi Sekitani, Shingo Iba, Yusaku Kato, Hiroshi Kawaguchi, Takayasu Sakurai, 2004, "A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications," Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 101, No. 27, pp.9966-9970