

곡면 유리 표면 위에서 박막 측온저항체 온도센서 어레이 제작 및 성능 평가

안철희* · 김형훈* · 박상후* · 손창민* · 고정상†

Fabrication and Performance Evaluation of Thin Film RTD Temperature Sensor Array on a Curved Glass Surface

Chul Hee Ahn, Hyoung Hoon Kim, Sang Hu Park, Changmin Son and Jeung Sang Go

Abstract. This paper presents a novel direct fabrication method of the thin metal film RTD temperature sensor array on an arbitrary curved surface by using MEMS technology to measure a distributed temperature field up to 300 °C without disturbing a fluid flow. In order to overcome the difficulty in the three dimensional photography of sensor patterning, the UV pre-irradiated photosensitive dry film resist technology has been developed newly. This method was applied to the fabrication of the temperature sensor array on a glass tube, which is arranged parallel and transverse to a main flow. Gold was used as a temperature sensing material. The resistance change was measured in a thermally controlled oven by increasing the environmental temperature. The linear increase in resistance change and a constant slope were obtained. Also, the sensitivity of each RTD temperature sensor was evaluated.

Key Words: RTD(측온저항체), Temperature sensor(온도센서), Dry film resist(필름 감광제), Curved surface(곡면), Photolithography(사진작업)

1. 서 론

해양 및 항공기 산업에서 개발된 동력 시스템은 높은 기술력과 신뢰성을 바탕으로 에너지 혹은 산업용으로 응용이 증가되고 있는 추세이다. 국내에서도 동력 시스템에 대한 중요성이 강조되고 있으며 소형 터보제트엔진과 산업용 가스터빈 등이 개발되고 있다. 이러한 가스터빈 엔진은 효율을 높이기 위해 초기에는 고온에 강한 재료 연구에 중점을 두었으나 최근에는 효율적인 열에너지 관리를 이용한 가스 터빈 효율 증가에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 그러나 기존 냉각기술로는 가스터빈의 효율을 향상시키는데 한계에 도달했기 때문에 가스터빈의 효율을 향상시키기 위해 인터쿨러(Intercooler)나 재열기(Recuperator) 등의 열교환 시스템 개발이 요구되고 있다.

재열기는 터빈에서 배기되는 고온 고압의 가스를 이용하여 연소실로 들어가는 공기를 예열함으로써 효율을 증가시키는 장치이며, 인터쿨러는 저압 압축기에서 나온 공기를 냉각시켜 고압 압축기에 유입시켜 밀도 높은 공기를 연소실로 보내 완전 연소를 촉진함으로써 터빈 효율을 증가시키는 역할을 하는 장치이다.

선박용 가스터빈의 경우 압축기, 연소기와 터빈으로 구성되어 있으며 그 효율이 35% 정도이지만, 재열기를 추가로 장착하면 40% 그리고 재열기와 인터쿨러를 함께 장착하면 효율이 45%로 증가하여 고효율 동력 시스템이 얻어진다.

높은 열교환 효율을 가지는 인터쿨러나 재열기는 전열 면적과 유동이 섞이는 현상을 높이기 위해 Fig. 1과 같이 다층의 복잡한 3차원 곡면 구조로 제작된다⁽¹⁾. 복잡한 형상의 시스템 설계 및 열전달 성능 예측을 위해서는 전산해석적 방법과 실험적 방법이 가능하다. 그러나 전체 모델을 전산해석하기 위해서는 수천만 개의 메쉬 수가 필요하기 때문에 전산 성능의 한계가 있으며, 실험에서는 열교환기로 고 레이놀즈 수를

†부산대학교 기계공학부
E-mail : micros@pusan.ac.kr

*부산대학교 기계공학부

가지는 빠른 유동이 유입되기 때문에 복잡한 구조물 내에서 유동의 교란이 없이 압력이나 온도의 측정이 어려운 단점이 있다. 또한 3차원 곡면에서 열전달 효율을 평가하기 위해서는 표면의 온도 분포를 측정하고 이로부터 열전달 계수를 구하여야 한다. 표면이 평면인 경우 다양한 열전달 상관관계수가 측정되어 소개되어 있으나⁽²⁻⁶⁾ 다양한 3차원 곡면에서 일부 제한적인 형상에 대해 실험을 통해 열전달 상관관계수가 소개되어 있다⁽⁷⁾.

곡면에서의 열전달 상관계수를 측정하기 위해 열전대를 곡면에 부착하고 온도를 측정할 경우 센서 구조물과 출력 값을 얻기 위한 전선이 유동에 영향을 미치기 때문에 정확한 온도를 측정하기 어려워 유동이 있는 표면의 국소 열전달 계수를 측정하기 위한 여러 방법들이 고안되고 수행되어 왔다. 그러나 그 측정 한계 온도가 150°C 미만으로 고온 측정에 적용하기 어려운 단점이 있다⁽⁸⁻⁹⁾.

본 논문에서는 3차원 곡면 기판에 다양한 형상의 박막 금속 제작 기술을 제안하고 이를 이용하여 유동에 영향을 미치지 않고 300°C의 고온까지 온도분포의 측정이 가능한 측온저항체 박막 온도 센서를 유리관 위에 제작하여 온도 특성 및 그 성능 평가를 수행하고자 한다.

2. 임의 곡면 금속 박막 패턴 제조

금속 박막을 이용하여 전극이나 센서 구조물의 제작에는 일반적으로 박막 증착, 사진작업 및 식각을 거쳐 원하는 형상의 구조물을 제작하는 마이크로머신(micro-machining) 공정이 이용되고 있다. 특히, 사진 공정은 극 자외선 빛(UV)에 민감한 감광제를 표면에 코팅하고,



Fig. 1. Multi-stacked cross corrugated heat exchanger, hard to install temperature sensors to measure temperature of wall and fluid in the complex channel.

투명한 부분과 불투명한 부분으로 형상이 그려진 2차원 마스크를 이용하여 감광제 위로 UV를 선택적으로 조사하여 감광제를 현상함으로써 원하는 형상의 금속 박막을 얻을 수 있다. 그러나 임의 곡면의 경우, 기존 사진작업 공정을 이용하면 초점거리가 다르기 때문에 정밀한 형상이 얻어질 수 없는 단점이 있다.

논문에서는 기존 사진작업과 달리, 곡면에 2차원적으로 미리 사진작업을 마친 필름 감광제(dry film resist)를 곡면에 부착하여 현상함으로써 곡면에 설계된 위치에서 직접 센서 제작이 가능하도록 하였다. 제조공정도는 Fig. 2와 같다⁽¹⁰⁾.

먼저 Fig. 2(a)와 같이 곡면 기판에 금속을 증착한다. 전기적 절연을 위해 직경 15 mm, 길이 100 mm의 유리관에 유리기판과 센서 층간의 접착력을 향상시키기 위해 크롬을 100 Å 증착 한 후 구리 1000 Å 증착하였다. 다음으로 Fig. 2(b)에 도시한 바와 같이 평면에서 30 μm 두께의 필름 감광제(FF-1030, Kolon)에 다양한 패턴을 가진 마스크를 통해 UV를 조사한다. 이때 유리기판 위에서 최적 UV 노광량 및 시간은 50 mJ과 30초로 각각 얻어졌다.

다음은 라미네이션 공정으로 Fig. 2(c)와 같다. 공정 과정에서 기판의 온도를 일정하게 유지하기 위해 대류식 오븐을 110°C로 가열하고 기판을 넣어 온도 조절판 위에서 2분간 필름 감광제를 곡면 기판에 부착하였다. 금속 박막 위로 감광제가 접착된 유리기판을 현상액에 넣어 일정 시간 현상하면 마스크와 동일한 패턴이 얻어진다. 이때 현상은 Na₂CO₃ 1wt% 수용액에 감광제 접착 기판을 4분간 넣어 현상하였다. Fig. 3은 곡면 패턴 형성용 시험 마스크를 이용하여 감광제를 현상한 결과를 보여준다.

마지막으로 습식 식각 공정을 통해 Fig. 2(e)와 같이 금속 식각 액에 감광제가 제거된 금속 박막을 노출시켜 금속 박막을 제거하고 Fig. 2(f)와 같이 식각 방지막으로 사용한 감광제를 제거함으로써 공정을 완료한다. 금속 박막 제거에는 CR-7 용액을 사용하여 70초 동안 구리와 크롬을 식각하였고, NaOH 수용액에서 감광제를 제거하였다. 곡면 유리기판 위에서 다양한 패턴 제작 결과 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 특히, 감광제 현상 결과 얻어진 Fig. 3의 사진과 달리 Fig. 5는 구리가 감광제 패턴 아래로 과식각(over-etching)되었음을 볼 수 있다. 이는 식각 용액으로 사용된 CR-7의 구리 식각률이 280 nm/min이고 크롬의 식각률은

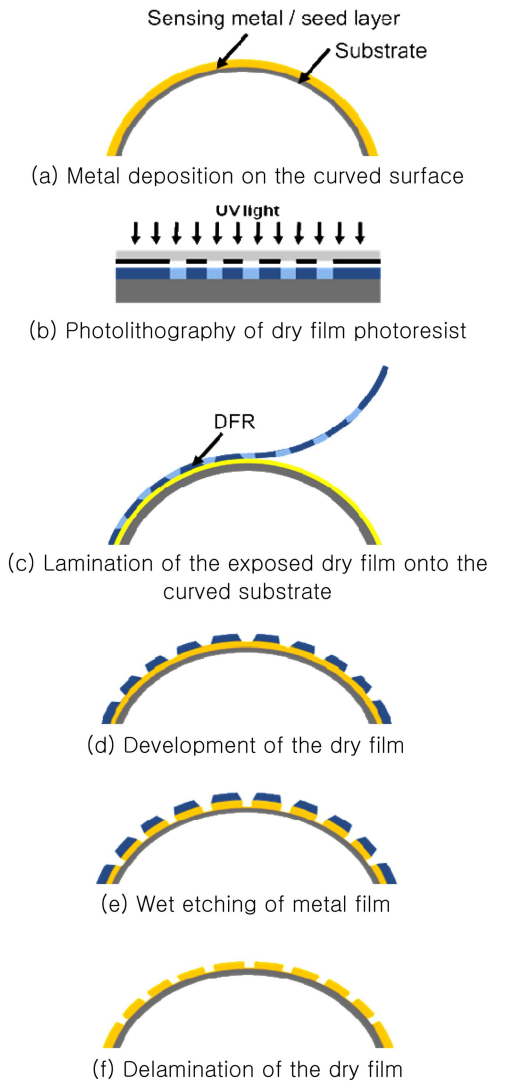


Fig. 2. Fabrication process of direct metal patterning on the curved surface.

170 nm/min으로 구리의 식각률이 크롬에 비해 높아서 크롬이 식각 되는 동안 구리도 함께 측면으로 식각 되기 때문에 과식각이 발생하였다. 그러므로 두 금속을 선택적으로 식각 할 수 있는 용액을 사용함으로써 이러한 과식각의 문제를 방지할 수 있다.

3. 측온저항체 박막 온도센서 곡면 제작

위에서 개발된 금속박막 형상 곡면 제작 기술을 임



Fig. 3. Patterning of the developed dry film photoresist on the curved surface.

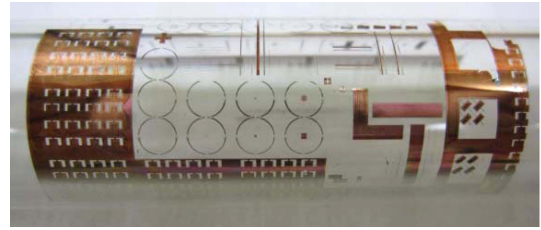


Fig. 4. Direct metal patterning on the curved surface.

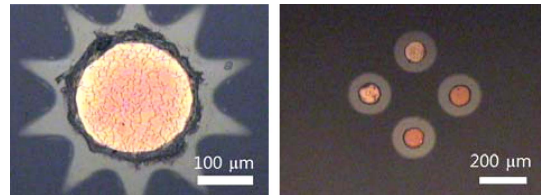


Fig. 5. Undercut of the metal patterns after removal of Cu/Cr metal layer.

의 곡면 위에 박막의 온도 센서를 직접 제작하는데 적용하였다. 온도 변화에 따른 전기적 신호를 감지하기 위해 단일 박막 공정으로 얼라인먼트(alignment)의 문제가 없어 공정이 단순한 측온저항체(RTD: resistance temperature detection) 센서를 제작하였다. 박막 측온저항체 온도 센서는 단순한 공정의 장점뿐만 아니라 선형성이 좋은 장점이 있다.

온도와 금속 박막의 전기 저항과의 관계는 식(1)과 같다. 여기서 R 은 측온저항체의 저항 값이고 T 는 온도, α 는 온도저항계수이다.

$$\frac{\Delta R}{R_{initial}} = \alpha T \quad (1)$$

박막 측온저항체 제작에 사용된 금속은 산화도 서열 마지막에 위치하여 온도의 증가에도 산화가 거의 발생하지 않는 금(Au)을 사용하였다⁽¹¹⁾. 측온저항체의 형상

은 Fig. 6에 도시한 바와 같으며, 이때 두께 0.3 μm , 선 폭은 50 μm 와 100 μm 로 동일한 저항 값을 갖도록 길이를 각각 14.2 mm와 28.3 mm로 설계하였다. 이때 측정 점의 면적은 1.15 \times 1.182 mm²와 2.3 \times 2.364 mm²로 각각 계산되었다. 그리고 온도 분포를 측정하기 위해 센서를 십자형으로 배열하였고 각 센서의 위치를 영문과 아라비아 숫자로 나타내었다. 또한 전극 선이 온도 측정에 미치는 영향을 줄이기 위해 전선의 선폭을 200 μm 로 센서 폭보다 두 배 넓게 설계하였다.

온도 분포를 측정하기 위한 박막 측온저항체 센서 어레이를 제작할 곡면 기판은 전기적 절연성과 고온에서의 안정성이 높은 파이렉스 유리(#7740) 관을 기판으로 사용하였고, 이때 외경은 20 mm였다.

앞에서 개발된 박막 금속 곡면 직접 패터닝 공정을 이용하여 박막 측온저항체 온도센서를 제작하였다. 측온저항체로 사용될 금속인 금의 유리기판 표면 부착력을 높이고 또한 과식각 문제를 해결하기 위해 금과 식각율이 다른 티타늄을 증착하였다. 증착된 티타늄의 두께는 300 Å였으며, 금의 두께는 3000 Å이다. 필름 감광제에 측온저항체 형상을 제작하기 위해 UV를 50 mJ을 노광하였고, 110°C로 조절되어 있는 온도 조절 오븐에서 라미네이팅하여 금이 증착되어 있는 곡면 유리기판에 필름 감광제를 부착하였다. 그리고 HCl과 HNO₃를 3대1의 비율로 혼합하여 30°C에서 60초 동안 금을 식각하였고, 티타늄은 H₂SO₄와 H₂O₂를 5:1로 혼합한 용액에 넣어 120°C에서 60초 동안 식각하였다. 티타늄 습식 식각 과정에서 감광제도 함께 제거되기 때문에 NaOH 수용액을 이용한 감광제를 제거 공정은 생략하였다. 제작 결과 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 선택적 식각을 이용하여 과식각 없이 정밀한 패턴이 얻

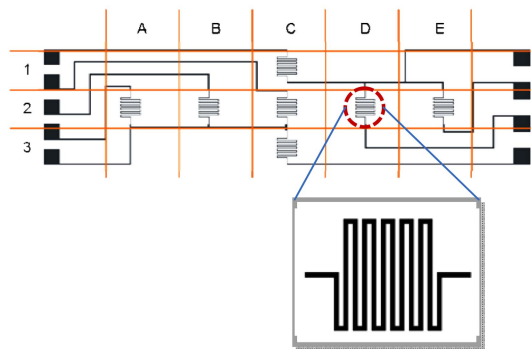
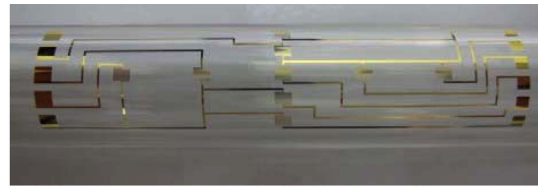
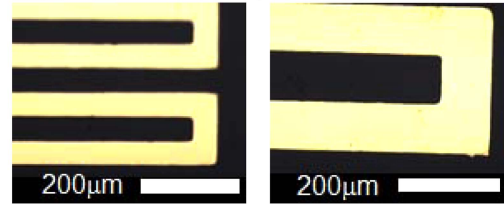


Fig. 6. Thin film RTD temperature array with minimum line width of 50 μm and 100 μm .



(a) RTD sensor array on the glass tube



(b) 50 μm

(c) 100 μm

Fig. 7. The pictures of the fabricated thin film RTD temperature sensor array on the curved surface and the line width of sensor of 50 μm and 100 μm without the over-etching.

어졌다.

4. 측온저항체 온도센서 성능 가시화

제작된 박막 측온저항체의 성능을 평가 하기 위해 상온에서 1000°C까지 온도 조절이 가능한 전기로와 RTD 온도 센서로부터 측정된 저항 값을 읽고 기록하는 데이터 수집 장치(DAQ34970A, Agilent)로 구성하였다. 또한 센서로부터 측정된 온도를 비교하기 위해 K-type 열전대를 박막 측온저항체 온도센서 어레이가 제작되어 있는 유리관에 함께 설치하였다.

측온저항체와 데이터 수집장치간의 전기적 연결은 Fig. 8에 도시하였듯이 고온에서 견딜 수 있는 단열 피복 도선을 사용하여 각 센서를 연결하였으며, 측온저항체의 전극과 도선의 연결 부위는 기계적인 고정을 위해 은 파우더가 섞여 있는 접착제로 접합하였다. 이



Fig. 8. Electrical interconnection of RTD temperature sensor array to the high temperature electrical wires.

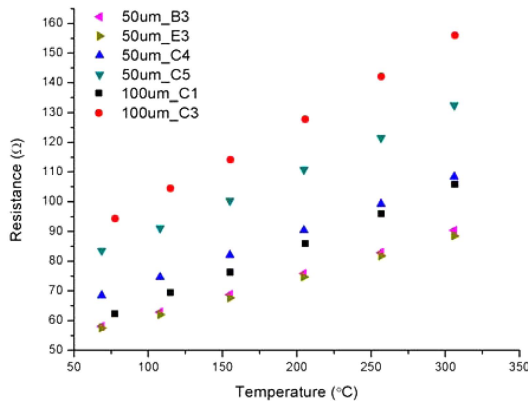


Fig. 9. Resistance measurement for increasing temperature and its repeatability.

때 금속 접촉체를 전극과 전기적으로 완전하게 도전시키기 위한 온도는 500°C였다.

데이터는 각 센서에서 1초 간격으로 100번 측정하여 온도 및 저항 값을 평균하여 얻었으며, 100 μm 선폭의 측온저항체 센서들은 C1 및 C3 위치에서, 그리고 50 μm 선폭의 측온저항체는 B3, C4, C5, E3 위치에서 측정하였다. 온도 측정 구간은 50°C에서 300°C까지 50°C씩 증가시켜 가면서 측정하였다. 또한 측정 정밀도를 조사하기 위해 3회씩 반복 시험을 수행하였다.

곡면 직접 제작 박막 측온저항체 온도 센서의 성능 측정결과를 Fig. 9에 도시하였다. 온도 증가에 따른 저항 측정 결과, 측온저항체의 선폭이 50 μm 인 경우와 100 μm 인 경우 모두 초기 저항 값은 다르지만 온도 증가에 따라 선형적으로 증가하였으며, 그 기울기가 일정함을 알 수 있었다. 이때 초기 저항 값이 다른 이유는 곡면에 제작된 도선의 길이가 서로 다르기 때문이다. 반복 측정에서도 동일한 저항 값이 측정됨을 알 수 있었다. 그리고 식(1)을 사용하여 계산한 온도계수는 50 μm의 최소 선폭에서는 0.00288±0.00016/°C과 최소 선폭 100 μm의 경우 0.00353±0.00015/°C로 넓은 선폭에서 더 민감하게 저항이 측정됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

임의 곡면으로 이루어진 기관 표면에 금속 패턴을 형성하는 새로운 제조방법이 제안되었으며, 이를 이용하여 박막 측온저항체 온도를 유리관 위에 제작하고 그 성능을 가시화 하였다. 곡면에 직접 제작한 박막 측

온저항체 온도센서를 이용하여 300°C까지 측정이 가능함을 보였다. 센서와 같이 기관에 제작되어 있는 도선의 길이가 센서 위치에 따라 다르기 때문에 각 센서의 초기 저항 값들이 다르게 측정되었으나 온도에 따른 저항 증가는 매우 선형적으로 일어났다. 이는 초기 저항에 대한 저항변화를 측정하여 각 측온저항체 온도 센서의 온도계수가 균일한 값을 가짐을 확인하였다.

또한 곡면에 직접 제작된 박막 온도센서는 두께가 얇아서 유동에 영향을 주지 않고 온도 분포의 측정이 가능하기 때문에 향후 연구에서는 재열기나 인터쿨러와 같은 복잡한 형상의 열교환기 성능 평가에 적용할 계획이다.

후 기

“이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.K20702001648-10E0100-07010).”

“이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0058999).” “이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구기반확충사업 No.2009-0077 809).”

참고문헌

- 1) <http://www.apiheattransfer.com>.
- 2) A. Datta, *et al.*, 2006, “Batch Fabrication and Characterization of Micro-Thin-Film Thermocouples Embedded in Metal”, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 153, pp. H89-H93.
- 3) X. Zhang, *et al.*, 2006, “Design, fabrication and characterization of metal embedded thin film thermocouples with various film thicknesses and junction sizes”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. 900-905.
- 4) K. Kreider, 2009, “Thin film thermocouples for internal combustion engines”, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 4, pp. 2618-2623.
- 5) K. G. Kreider and F. DiMeo, 1998, “Platinum palladium thin-film thermocouples for temperature measurements on silicon wafers”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 69, pp. 46-52.

- 6) S. P. Jang, *et al.*, 2003, "Experimental investigation of thermal characteristics for a microchannel heat sink subject to an impinging jet, using a microthermal sensor array", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 105, pp. 211-224.
- 7) Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 2001, "Introduction of the heat transfer 4th Edition", JohnWiley & Sons Inc, pp.370-406.
- 8) Peter T. Ireland, *et al.*, 1999, "Turbulent heat transfer measurements using liquid crystals", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 355-367.
- 9) Cheol Hyun Hong, *et al.*, 2003, "Experimental Study on the Measurement Method of Heat Transfer Coefficients Using a Transient Liquid Crystal Technique", *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, No.5, pp. 581-589.
- 10) C. H. Ahn *et al.*, 2010, "Fabrication and Performance Evaluation of Temperature Sensor Array on a 3-Dimensional Curved Surface", *Proceedings of the 12th Korean MEMS conference*, pp173-174.
- 11) H. Schmidbaur, *et al.*, 2005, "Understanding gold chemistry through relativity", *Chemical physics*, Vol. 311, pp. 151-161.