Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 29, No. 1 (2020) pp. 40-44
http://dx.doi.org/10.5369/JSST.2019.29.1.40
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

플렉서블 기판상에 제작한 다기능 화재센서에 관한 연구

서준영[1] · 고동완[1] · 최준석[1] · 노재하[1] · 정정열[2] · 이문진[2] · 이상태[3] · 장지호[1,+]

Multifunctional Fire Sensor Fabricated on a Flexible Substrate

JoonYoung Seo[1], Dongwan Ko[1], Junseck Choi[1], JaeHa Noh[1], Jung-Yeul Jung[2], MoonJin Lee[2], Sangtae Lee[3], and Jiho Chang[1,+]

Abstract

An integrated multifunctional sensor, capable of raising an early electric-fire warning, was fabricated. An arc-light, temperature, and humidity sensor was fabricated on a flexible substrate using a printed thin film of indium tin oxide. A polyethylene terephthalate (PET) substrate was used as the flexible substrate. The sensor was fabricated on a PET substrate, and its operating characteristics were tested. The operating performances of the sensor when serving as an arc-light, a temperature, and a humidity sensor were estimated to be 0.6247 Ω/W, 80.6 Ω/K, and –4.08 Ω/RH, respectively. The feasibility of the proposed fire sensor was demonstrated; it costs low and offers multiple functionalities

Keywords: Flexible substrate, Printed electronics, Multifunctional sensors, Fire alarm sensor

1. 서 론

화재는 막대한 재산과 인명 손실을 동반하는 재난으로, 이를 초기에 감지하여 피해를 줄이기 위한 노력은 경제적, 사회적으로 매우 중요하다[1]. 특히 전기 화재는 부주의를 제외하면 전체 화재의 50%를 차지하고 있고[1], 전기 화재 중에서도 배전반의 화제가 차지하는 비중이 45%이지만 인명피해가 발생하는 비율은 70%로 가장 높다[2]. 따라서 여러 가지 형태의 화재감시 기술이 개발되어 있다. 이때 화재 시 발생하는 열, 불꽃, 연기 등 다양한 물리적 변화를 이용하여 검출하는 것이 가능하다. 따라서, 종래의 연구에서는 화재에 의해 발생하는 열, 불꽃, 연기 등 여러 가지 신호를 여러 개의 센서를 이용하여 감지하고, 이를 종합하여 화재 경보의 신뢰성을 높이려는 방향으로 연구가 진행 되었다[3]. 하지만 이러한 화재감지센서 기술들은 주로 화재 발생한 후 이에 대응하여 작동하는 방식으로, 화재가 발생하고 센서가 검출 가능한 정도로 시간이 경과된 후에야 검출이 가능해지는 한계가 있었다[4]. 조기에 화재 경보를 발생할 목적으로 방전아크를 검출하기 위한 전자식[5] 및 광학식[6] 아크센서가 개발이 되어 있으나 아직 단가가 너무 비싸고, 아크검출만으로는 신뢰성 있는 화재경보를 발생할 수 없다는 문제점이 지적되고 있다[7]. 그래서 조기에 신뢰성 있는 화재 경보 발생이 가능하도록 습도의 변화, 온도의 변화, 아크광의 발생 등 여러 가지 신호를 동시에 감지하기 위한 다기능 복합 방식의 화재감지센서가 필요하다. 기존에 단위 센서를 조합한 센서 시스템은 개발되었지만, 아직 경제성이나, 크기, 성능 등 여러 가지 면에서 상용화의 요구조건을 만족시켜 상업적으로 개발에 성공한 사례는 없다[8].

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하여 경제적이며 소형 경량화가 가능하여 가정용 배전반에도 설치가 가능한 다기능 화재검출 센서를 개발하기 위하여 아크광, 온도, 습도 등을 종합하여 화재 경보를 발생할 수 있는 센서를 플렉서블 기판에 인쇄전자 공정으로 제작하는 방법에 대하여 연구하였다.

[1] 한국해양대학교 전자소재공학전공 (Major of Electronic Materials Engineering, KMOU), Busan, 49112, Korea
[2] 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 (Maritime Safety and Environmental Research Division, KRISO), Daejeon, 34103, Korea
[3] 한국해양대학교 해양플랜트 운영학과 (Department of offshore plant management, KMOU), Busan, 49112, Korea
[+] Corresponding author: jiho_chang@kmou.ac.kr
(Received : Dec. 10, 2019, Revised : Jan. 7, 2020, Accepted : Jan. 15, 2020)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/bync/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 실험 방법

2.1 센서의 제작조건

본 실험에서는 전기 화재 경보용 다기능 센서를 제작하기 위

하여 인쇄공정을 연구하고, 제작한 아크광, 온도, 습도 센서의 동작 특성을 조사하였다. 인쇄공정을 적용할 대상으로는 석영판, 베이크라이트, PET (polyethylene terephthalate)기판을 사용하였다. 석영판은 시판되는 기판 (10 cm×10 cm, t=1 mm), 회로기판용 재료인 베이크라이트 판 (10 cm×10 cm, t=1.6 mm), 유연성 PET (10 cm×10 cm, t=0.13 mm) 기판을 시험하였다. 인쇄 전 모든 기판은 유기 세척을 하였고, 질소를 이용하여 건조시킨 후 사용하였다. 인쇄용 페이스트는 ITO 나노분말과 유기바인더를 혼합하여 제작하였다. ITO 나노분말은 상용 InSnO (Sn~10 wt%)를 사용하였고, 분말의 입도는 45±25 nm 였다. 페이스트(paste)를 제작하기 위한 바인더는 α-terpineol 과 ethyl cellulose 를 19:1의 무게비로 혼합한 점성을 갖는 유기용액을 사용하였다. 인쇄용 페이스트 제작은 ITO 와 바인더를 1:1의 무게 비로 고르게 혼합하여 사용하였다.

ITO 인쇄박막은 Fig. 1에 보인 것처럼 센서의 용도에 따라, 18×18 mm^2의 정사각형 형태, 지그재그 형태 (18×18 mm^2), 양쪽에서 마주보는 빗 형태로 (18×16 mm^2) 등으로 제작하였다. 또한 습도 센서 제작을 위해서는 Ag 페이스트 (CANS사의 ELCOAT P-100)를 빗 형태로 1차 인쇄한 위에 감습제로 사용한 ethyl cellulose를 정사각형 (20mm×20mm) 형태로 인쇄하였다. 인쇄 후 바인더 제거를 위한 열처리를 하였다. 바인더 제거를 위한 열처리 공정 시 기판이 변형되면 인쇄 박막의 박리 등이 일어날 수 있으므로 각 기판 별로 열처리 온도를 조사하여 최적화하였다.

2.2 센서의 표면 및 특성 분석

인쇄박막의 물성분석은 다음과 같이 진행하였다. 광학현미경과 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopy, FE-SEM)을 이용하여 표면형상과 박막 두께를 분석하였다. 기판과 박막의 표면에너지는 접촉각 측정기를 이용하여 측정하였다. 인쇄박막의 전기적 특성을 파악하기 위하여 I-V sourcemeter (Keithly 2400) 를 사용하였다. 박막의 저항은 Keithly 사의 6485 picometer를 활용하여 측정 하였으며 박막의 구석 부분에 probe 탐침을 이용하여 접촉을 하였다. 온도변화에 따른 저항의 변화는 온도가변형 I-V 접촉 장치에 깊은 준위간 천이분광분석기(Deep Level Transient Spectrometer, DLS-83D)를 연결하여 측정하였고, 습도 변화는 항온항습조를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 다양한 기판상의 인쇄 특성

Fig. 1은 본 실험에서 제작한 인쇄박막 센서의 실물 사진이다. Fig. 1(a)는 석영기판, 1(b)는 베이크라이트판, 2(c)는 PET기판 위에 제작한 시료의 사진이다.

각각의 기판은 접촉각 측정기를 이용하여 표면에너지를 측정하였다. 측정 결과 Fig. 1(a) 석영기판은 80 mJ/m^2, (b)베이크라이트판은 56 mJ/m^2, (c) PET기판은 30 mJ/m^2 로 각각 측정되었다. 각 기판은 앞에서 설명한 것과 같이 초음파 세척을 진행하였고, 박막의 균질도 (homogeneity)를 확보하기 위하여 기판의 표면에너지에 따라 인쇄용 페이스트의 혼합비를 조절하여 점도를 조정하였다.

일반적으로 인쇄박막의 균질도를 결정하는 젖음정도 (S)는 기판의 표면에너지(γ_{sub}), 페이스트의 표면에너지(γ_{pst}), 기판과 페이스트의 계면에너지($\gamma_{s\text{-}p}$)에 의해서 결정되며, 수식으로는 $S = \gamma_{sub} - \gamma_{pst} - \gamma_{s\text{-}p}$ 로 표현할 수 있다[9]. 이때 S>0이면 기판 표면에 평탄한 박막 형성이 가능해지고, S<0이면 페이스트가 응집하여 평탄한 박막 제작이 곤란해진다. 따라서 균질한 박막을 제작하기 위해서는 기판의 표면에너지가 감소하면 페이스트의 표면에너지도 낮아져야 균질한 박막의 인쇄가 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 페이스트의 점도도 낮아져야 한다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서도 기판의 표면에너지에 따라 페이스트의 점도를 조정하여 인쇄 조건을 결정하였다.

인쇄된 박막은 여분의 바인더를 제거하기 위하여 열처리를 진행하였다. 이러한 열처리를 바인더 제거 (debinding) 공정이라고도 한다. 일반적으로 이 공정은 바인더를 제거하는데 충분한 온도와 시간이 필요하지만 공정 중 기판의 변형이 발생하면 박막의 기계적 성질이 열화 되고 전기적 특성도 변화할 것이므로 기판의 변화가 관찰되지 않는 범위에서 결정되어야 한다. 실험적으로는 석영기판의 경우에는 250°C 정도까지 특별한 변형이 관찰되지 않았고, 베이크라이트 기판은 150°C에서 변형이 관찰되고 PET기판의 경우 110°C에서 유리화에 의한 변형이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 근거로 각각의 기판별 열처리 온도를 결정하였다.

본 실험에서는 인쇄박막의 표면과 인쇄 전사율을 통하여 박막의 균질성을 파악하였다. 표면 관찰 결과 주목할 만한 변화는 보이지 않았지만 전사율 (전사율=인쇄된 박막의 폭/마스크 선폭 사이즈×100%)의 관점에서는 석영 기판 (98%)이 PET 기판 (92%)보다 약간 높은 전사율을 보였지만 센서의 구현 가능성을 파악하는데 큰 문제는 없는 수준으로 판단하였으며, 본 연구에서 시험한 기판 중에 가장 경제적이며 가정용 소형 배전반 등에도 설치가 용이할 것으로 판단되는 PET 기판을 집적형 센서 실험용

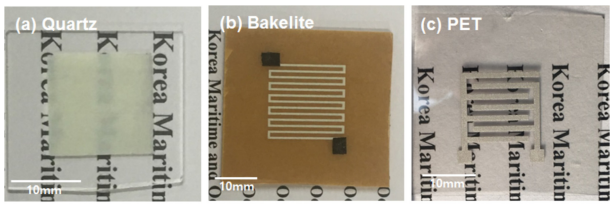

Fig. 1. Photograph of ITO thin film sensors printed on (a) Quartz, (b) bakelite, (c) PET substrates

기판으로 선택하였다.

3.2 플렉서블 기판(PET)상의 인쇄특성

Fig. 2는 PET기판 위에 제작한 (a) 아크광센서 (b) 온도센서, (c) 습도센서의 사진이며 Fig. 2(d)는 상온에서 별도의 자극이 없는 경우 측정한 인쇄박막 센서의 전류-전압 특성이다. 아크광 센서의 경우 수광면적을 확보하기 위하여 정방형 형태로 제작하였고, 온도 센서의 경우 온도에 따른 저항의 변화를 분명하게 관찰하기 위하여 지그재그 형태로 제작하였으며, 습도센서는 유기재료 (ethylcellulous) 감습제 층 아래에 빗 형태의 전극이 마주보는 형태로 위치하도록 제작하였다. 제작한 시료에서 측정한 저항은 각각 다음과 같다.

아크광 센서의 경우 3.8×10^{3} Ω, 온도 센서의 경우 1.5×10^{7} Ω, 습도 센서의 경우 3.75×10^{8} Ω의 저항이 측정되었다. 모든 시료의 열처리는 100°C에서 3시간 동안 진행하였다. 각 센서의 형태가 다름에도 불구하고 인쇄 전사율이나 균질도의 관점에서 문제점은 발견되지 않았다.

Fig. 3은 Fig. 2에서 보인 세 가지 형태의 센서를 하나의 PET 기판 위에 집적해 제작한 결과이다. 제작과정은 ITO 인쇄, 디바인딩 열처리, Ag 인쇄 및 경화, 감습제 인쇄 및 경화의 과정으로 제작하였다. 본 실험에서 시험 제작한 센서 전체의 크기는 50 mm×50 mm로 PET기판 위에 제작되어 유연성을 가지고 있음을 알 수 있다. 센서의 무게는 0.5 g으로 가볍고 작아 가정용 소형 배전반과 같이 매우 제한된 공간에 설치하는 것도 문제가

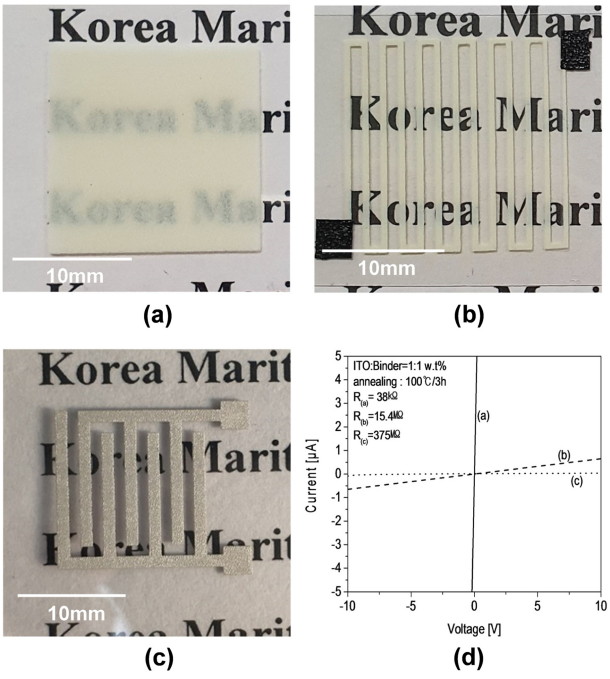

Fig. 2. ITO film sensors printed on PET substrates. (a) Arc sensor (b) Temperature sensor (c) Humidity sensor and (d) I-V characteristic of each sensor.

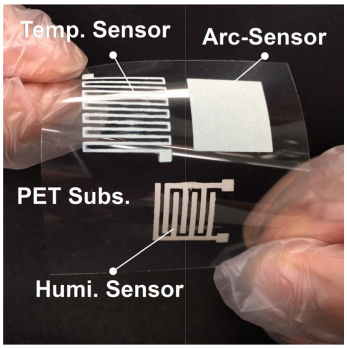

Fig. 3. Intergrated ITO thin film sensors on PET substrate.

없다고 판단하였고, 이렇게 경제적이며 공학적 활용 가치가 높은 점이 종래의 센서에 비교해 장점으로 볼 수 있다고 판단된다.

3.3 센서별 동작특성

Fig. 4는 PET 기판 상에 구현한 아크광 센서의 동작 특성이다.

동작 특성 확인을 위해서 아크광과 분광특성이 유사한 수은 램프를 사용하였고, 10 mm 떨어진 위치에서 광파워미터의 감도를 254 nm로 설정하고 측정한 수은 램프의 최대 광출력은 9.5 mW 였다. 수은 램프의 분광 스펙트럼 측정에서는 일반적인 수은 램프의 스펙트럼에서 보이는 254 nm 와 546 nm 에 강한 강도를 갖는 피크가 존재함을 확인하였다. 실제 아크광도 강한 UV 파장대의 피크와 넓은 가시광 파장대에 걸쳐 약한 강도를 갖는 스펙트럼 분포를 보이므로 분광하지 않고 광출력 필터만을 이용하여 광출력을 1~5mW까지 변화시키면서 실험하였다.

ITO인쇄 박막의 동작전압은 1V에서 측정하였다. 암실에서 측정한 인쇄박막 센서의 기준 저항은 38 kΩ 이었다. 센서의 감도는 $S=(R-R_0)/R_0\times100\%$ (R_0 기준저항, R 광조사 저항)로 정의하였고, 변환율은 Δ(R)/Δ(mW)로 광출력 증가에 대한 저항의 변화율로 정의하였다. Fig. 4에서 센서의 감도는 0.36mW에서 23.5 kΩ,

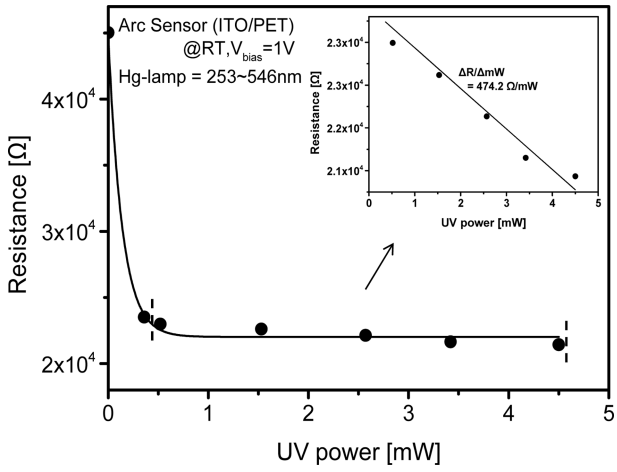

Fig. 4. Sensing properties of arc sensor.

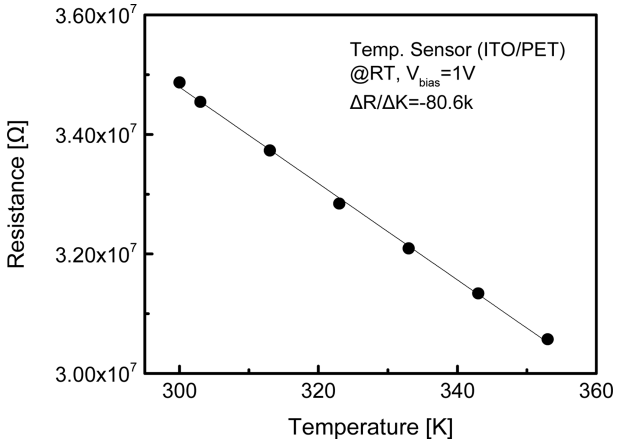

Fig. 5. Sensing properties of temperature sensor

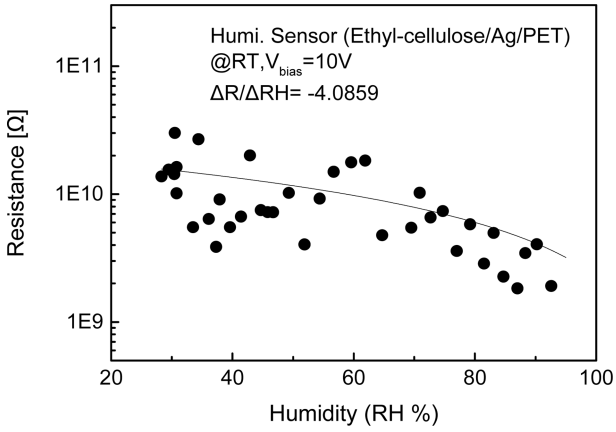

Fig. 6. Sensing properties of humidity sensor.

4.8mW에서 21.4 kΩ 로 변화하였고, 변화율은 474.2 Ω/mW 로 파악되었다.

Fig. 5는 PET 기판 상에 구현한 ITO 인쇄박막의 온도 센서 동작 특성이다. 제작된 ITO 인쇄박막의 대기 중 상온 (22±1°C)에서 측정한 기준 저항은 15.4 MΩ 이었다. 실험은 온도 변화가 가능한 측정 스테이지를 사용하여 온도를 22~60°C 범위에서 변화시키며 저항의 변화를 측정하였다. 최고 온도를 60°C로 제한한 이유는 최근 개발된 배전반용 자동 소화기의 동작 온도가 60~100°C 정도임을 참고하여 보다 낮은 온도에서 화재의 조짐을 검출하는 것이 가능함을 확인하기 위해서였다[10].

센서의 온도 특성 측정은 진공 중에서 진행하여 대류에 의한 열손실은 배제하였다. 시료 저항의 온도변화는 $R=R_0+\alpha\Delta T$로 나타낼 수 있는데 이때 온도저항계수(temperature coefficient of resistance) α는 dR/dT로 정의된다. 본 실험에서 ITO 인쇄박막의 온도저항 변환계수는 –0.002 /°C 로 측정되었다. 일반적으로 스퍼터법으로 제작한 ITO 코팅막의 온도저항계수가 양의 부호를 가져 금속과 유사한 특성을 보인다[11,12]. 이에 비해 본 연구에서 측정한 ITO 인쇄박막의 온도저항계수는 음의 부호를 보여 반도체 같은 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 동일한 범위의 온도변화에 대해서 스퍼터로 제작한 상용 ITO 코팅막에 비해서 ITO 인쇄박막이 10배 정도 큰 온도저항 변화율을 보였다. 이는 센서 제작 시 온도변화에 대한 높은 감도가 기대 가능하다는 점을 시사한다.

또한 센서 응용의 관점에서 반드시 확인하여야 할 점이 자체 발열 여부이다. 특히 저항형 온도센서의 경우 자체 발열 여부가 센서의 응용 가능성을 판단하는 중요한 기준이 된다. 본 연구실에서 확인한 결과 상용 ITO 코팅막의 경우 1V 의 바이어스를 인가한 경우 150초 경과 후 19.3°C 에서 23.6°C 까지 온도가 상승하였으나, ITO 인쇄박막의 경우 동일한 조건에서 20.3°C에서 20.4°C로 주목할 만한 온도 변화는 관찰 되지 않았다. 그러나 10V 바이어스일 경우, ITO 코팅막은 19.7°C에서 150°C로, ITO 인쇄박막의 경우 20.2°C에서 20.8°C로 변화하였다. 이 결과는 자체 발열의 관점에서 인쇄 ITO 박막을 온도 센서로 활용하는 것이 가능하다는 점을 시사하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 PET기판상에 구현한 습도 센서의 동작 특성이다. 습도센서는 두께 20 μm의 Ag 페이스트를 이용한 빗(comb) 형태의 전극을 제작하고, 그 위에 두께 124 μm의 감습층 (ethyl cellulous)을 제작하였다. 습도센서는 습도가 높아지면 감습제 표면의 표면저항이 변화하여 센서의 동작저항이 변화한다. 따라서 감습 물질의 종류, 감습층의 두께, 하지 전극의 구조 등 실험적으로 최적화하여야 할 여러 가지 요인이 있지만, 본 실험에서는 최적화 실험은 진행하지 않았다.

본 실험에서는 검교정된 항온항습조를 사용하여 온도를 27°C 고정하고, 습도를 20%~95%까지 변화하며 센서의 저항변화를 관찰하였다. 센서의 외부 바이어스는 10V 였고, 대기 중 측정한 기준 저항은 375 MΩ 이었다. 측정 결과 습도가 증가함에 따라 저항이 감소하는 경향이 확인되었고 습도의 변화율 (ΔR/Δ%RH)은 –4.08 이었다. 단 센서의 출력이 평균 저항의 20% 정도의 범위에서 변화하여 향후 최적화를 통한 입출력의 상관성을 개선할 필요가 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 실험에서는 가정용 소형 배전반에도 쉽게 설치하여 전기화재를 조기에 경보 할 수 있는 센서를 제작하기 위하여, PET 기판 위에 ITO인쇄 박막을 이용한 다양한 센서를 제작하고 동작을 확인하였다. 다양한 설치 상황에 대응 가능하도록 석영, 베이크라이트, PET 기판 등에 ITO 인쇄박막 제작 조건을 조사하였다. 세 가지 기판 중 가장 활용이 용이할 것으로 판단되는 PET 기판을 선택하여 아크광, 온도, 습도 센서를 제작하고 각각의 동작 특성을 확인하였다. 그 결과 아크광 센서와 온도센서는 적용 가능한 동작범위에서 기존의 센서에 비교 가능한 정도의 성능을 보임을 확인 할 수 있었고, 습도센서는 센서 구조의 최

적화가 필요하다는 결론을 얻었다.

감사의 글

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구{위험유해물질(HNS)사고 관리 기술개발}이다. (D11502119H480000120)

REFERENCES

[1] http://www.nfa.go.kr/ (retrieved on Jul. 23, 2019)
[2] http://electimes.com/ (retrieved on Apr. 12, 2016)
[3] K. H. Chang, J. B. Lee, S. Y. Jo, G. M. Jeong, and H. S. Ahn, “Design and Implementation for a New Type of Integrated AFCI”, *Korean Inst. Electr. Eng.*, Vol. 2010, No. 4, pp 129-130, 2010.
[4] J. J. Kim, D. K. Kwak, T. J. Lee, D. H. Park, and J. H. Kim, “A study on Current Status and Problem Analysis of Flame Detector”, *Korean Inst. Power Electron.*, Vol. 2017, No. 7, pp 495-496, 2017.
[5] S. J. Park, S. C. Hwang, G. Ming, and G. S. Kil, “Detection of series Arc Signals by TEV Sensor in Low-voltage Switchboard”, *Korean Soc. Railw.*, Vol. 2010, No. 4, pp 1418-1422, 2016.
[6] D. B. Kim, H. S. Park, I. K. Kim, and D. Z. Lee, “Development of Partial Discharge and Arc Detecting System in Switchgear Panel”, *Korean Inst. Electr. Eng.*, Vol. 2010, No. 11, pp 256-257, 2010.
[7] K. H. Chang, K. M. Kim, J. O. Kim, and H. S. Ahn, “Design and Implementation of a ZigBee Network-based Intergrated AFCI”, *Inst. Internet, Broadcast. Commun.*, Vol. 10, No. 4, pp 41-48, 2010.
[8] G. H. Lee, W. S. Lim, and S. K. Kim, “Study on the Development of Optical Sensor Linear Fire Detection System Using Raman Scattering”, *Korean Inst. Fire Sci. Eng.*, Vol. 30, No. 4, pp. 27-38, 2016.
[9] S. M. Kang, Y. J. Jung, and J. H. Lee, “Comparison of the Properties of Almotriptan PVA Hydrogel Depending on the ratio of PEG and confirmation of potential as transdermal formulation”, *Korean Soc. Life Sci.*, Vol. 24. No. 4. pp 437-446, 2014.
[10] Y. K. Choi, B. D. Yoon, E. K. Kim, and M. C. Shin, “A Study on the Development of an Automatic Fire Extinguisher for Power Sub-station systems”, *Korean Inst. Fire Sci. Eng.*, Vol. 2010, No. 10, pp. 345-348, 2010.
[11] C. Trejo-Cruz, A. Mendoza-Galván, A. M. López-Beltrán, and M. Gracia-Jiménez, “Effects of air annealing on the optical, electrical, and structural properties of indium-tin oxide thin films”, *Thin Solid Films*,Vol. 517, No.16, pp. 4615-4620, 2009.
[12] D. P. Seo, J. E. Heo, T. H. Jang, C. Kim, and Y. J. Jo, “Crystalline State and Temperature-dependent Conductivity of Annealed ITO Thin Films”, *New Phys. Sae Mulli*, Vol. 66, No. 4, pp. 392-397, 2016.