

필름형 레벨센서의 민감도 향상을 위한 설계 방법

김병곤^{1,+} · 장수관¹

Design Method for Improving Sensitivity of Film-type Level Sensors

Byeongkon Kim^{1,+} and Sookwan Jang¹

Abstract

To increase the sensitivity of film-type level sensors for water-level measurements, a Wheatstone bridge comprising a half-bridge circuit with a new film-type level sensor design containing four resistors and two electrodes was employed. The proposed film-type level sensor included a temperature compensation feature and demonstrated improved sensitivity owing to a two-fold increase in the voltage output. Furthermore, a repetition error of less than 1.0% was observed for water levels. As the change in resistance varied linearly with the water level, a linear function was derived to represent their relation. Using this derived formula, water level measurements that were twice as precise as those yielded by commercial products were achieved.

Keywords: Film-type level sensor, Wheatstone bridge, Sensitivity, Resolution, Water level, Water pressure

1. 서 론

수위 측정을 위한 레벨센서는 접촉식 레벨센서와 비접촉식 레벨센서가 있고, 이를 연속 측정 방식과 불연속 측정 방식으로 구분할 수 있다. 접촉식 레벨센서는 압력식, 부력식, 차압식 등의 방식으로 액체에 직접 닿아서 액체에 잠긴 깊이의 압력 변화를 계측하여 수위로 환산하는 방식의 센서로 작은 탱크나 공간이 좁은 장소에 설치가 가능한 장점이 있다[1,2]. 비접촉식 레벨센서는 초음파, 마이크로파, 레이저 등 소리와 빛을 이용하여 수면에서 반사되어 돌아오는 시간을 측정하여 수위를 환산하는 방식으로 센서 위치와 수면 간의 거리가 먼 경우나 접촉식 레벨센서의 사용이 곤란한 설치 환경에서 사용된다[3,4]. 비접촉식 레벨센서의 경우 접촉식 레벨센서와 비교하여 비용이 많이 들고, 아울러 먼지, 가스, 수증기 및 부유물 등이 없는 환경에서 사용해야 하는 제약이 있어서 장마철 등의 환경에서는 사용에 어려움이 있다[5].

산업 분야뿐만 아니라 일상에서도 보편적으로 사용되고 있는 수위 측정 센서로는 접촉식 레벨센서인 필름형 레벨센서(eTape,

Milone Technologies, Inc)가 단순한 구조와 안정적인 내구성을 갖고 있고, 측정 반복성이 높아서 액체의 수위 변화 측정에 사용할 수 있는 가성비가 우수한 레벨센서라고 할 수 있다. 다만 수위 계측의 민감도가 미흡하다고 판단하여 본 연구에서는 1개의 필름형 레벨센서의 저항을 4개로 구성하여 필름형 레벨센서 자체로 휘트스톤 브릿지 회로(Wheatstone bridge circuit) [6]가 가능하도록 구성하여 민감도를 향상시켰다. 민감도가 향상된 필름형 레벨센서는 해상도와 관련하여 보다 정밀한 수위 측정이 요구되는 환경에서 성능을 충족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 필름형 레벨센서

2.1.1 저항식 필름형 레벨센서

저항식 필름형 레벨센서는 얇고 유연한 필름에 저항체를 형성하여 수위 측정이 가능하도록 만들어 필름이 물에 닿으면 저항이 변하고 변화된 저항을 통해서 수위를 측정할 수 있다.

Fig. 1은 필름형 레벨센서가 물에 잠길 때의 단면을 표현한 그림으로 수압에 의해서 상하부 필름 사이(E_1-R_1)에 형성된 저항이 잠긴 깊이에 비례하여 감소한다. 필름형 레벨센서는 가변저항(R_1)과 고정저항(R_2)을 포함하고 있고, Fig. 2와 같이 회로를 구성하여 출력 전압의 변화를 확인할 수 있다. 출력 전압은 잠긴 깊이의 변화 즉, 수위 변화에 의해서 변화되기 때문에 전압 신호를 센서가 잠긴 깊이인 수위로 환산이 가능하다.

¹ 주식회사 세라토르 (CERATORQ, Inc.)

1003, 8, Ori-ro 651beon-gil, Gwangmyeong-si, Gyeonggi-do 14303, Korea

⁺Corresponding author: bkk@ceratorq.com

(Received: Aug. 7, 2024, Revised: Aug. 16, 2024, Accepted: Aug. 19, 2024)

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

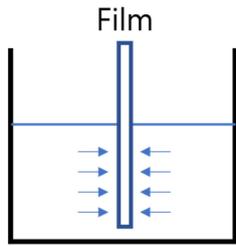


Fig. 1. Shape of an image under water pressure when the film-type level sensor is submerged.

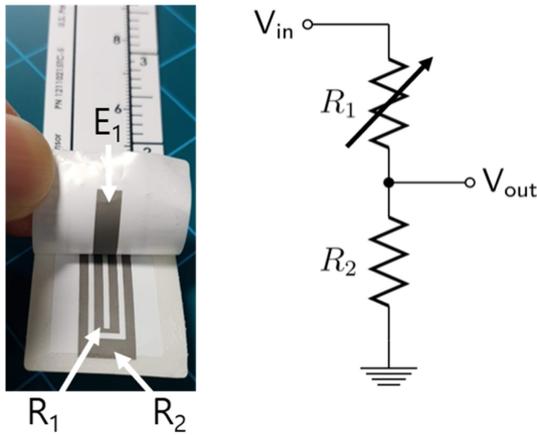


Fig. 2. Electrode pattern and circuit diagram of a conventional film-type level sensor.

필름형 레벨센서는 두께가 얇고 측정 반복성이 우수한 장점이 있지만 수위 측정에 대한 민감도가 높지 않아서 수위를 정밀하게 측정하기에는 적합성이 다소 낮다고 볼 수 있다.

2.1.2 저항식 필름형 레벨센서 개선

저항식 필름형 레벨센서의 민감도를 개선하기 위해서 Fig. 3과 같이 센서 내에 4개의 저항을 하프 브릿지(Half bridge) [6]로 연결하여 센서 자체로 휘트스톤 브릿지 회로를 구성할 수 있도록 설계를 변경하였다.

센서는 전압 입력단자(V_{in} , V_{out})를 갖고 있고, U자 형의 독립된 4개의 저항패턴(R_1 , R_2 , R_3 , R_4)으로 구성되어 있으며 결선에 의해 휘트스톤 브릿지를 형성할 수 있다. 가운데 2개 저항(R_2 , R_3)은 마주보는 전극(E_1 , E_2)과의 접촉으로 인하여 저항이 가변될 수 있고, 이는 저항과 전극이 한쌍으로 구성된 기존 저항식 필름형 레벨센서와 비교하여 동일한 수위에서 2배 높은 전위차를 얻을 수 있다.

개선형 레벨센서는 Table 1에서 볼 수 있듯이 출력(V_{out})은 V_C 와 V_D 의 전위차에 의해서 결정되고 V_C 와 V_D 는 각각 R_1 , R_2 와 R_3 , R_4 의 비율에 의해 정의된다.

R_2 와 R_3 가 가변저항으로 물에 잠기는 깊이에 따라서 R_2 와 R_3 의 저항이 동시에 낮아져 출력(V_{out})이 2배 더 커지는 특성으로

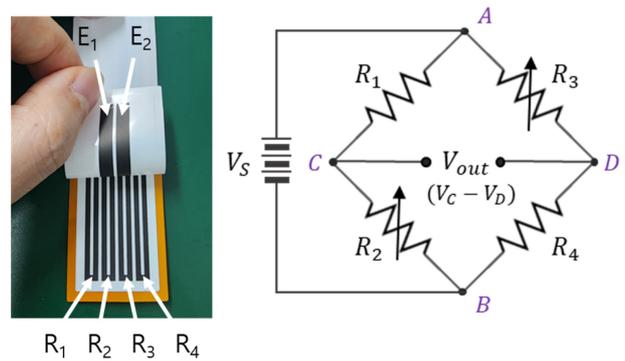


Fig. 3. Improved film-type level sensor involving Wheatstone bridge circuit.

Table 1. Comparison of circuits between conventional and improved film-type level sensors.

Level Sensor	Conventional (Fig. 2)	Improved (Fig. 3)
Method	Voltage divider	Wheatstone bridge
Formula	$V_{out} = \frac{R_2}{(R_1+R_2)} \times V_{in}$	$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ or $R_1R_4 = R_2R_3$ $V_C = \frac{R_2}{(R_1+R_2)} \times V_S$ $V_D = \frac{R_4}{(R_3+R_4)} \times V_S$ $V_{out} = V_C - V_D$

인하여 센서의 민감도를 높일 수 있다.

2.1.3 개선형 레벨센서 제작

필름형 레벨센서가 수압에 의해 압착되면서 저항이 변화될 수 있도록 측정범위와 민감도의 조절이 가능한 압저항형(Piezoresistive-

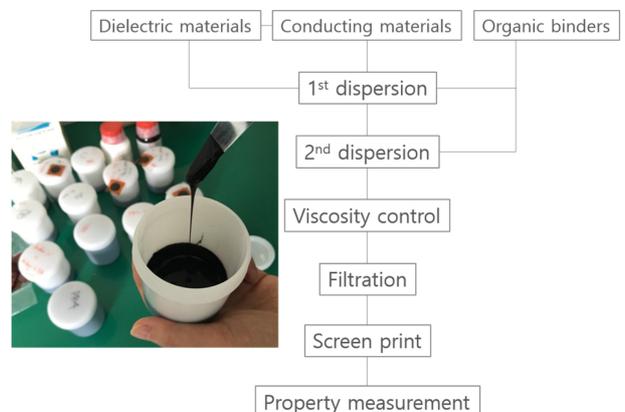


Fig. 4. Piezoresistive pastes that exhibit resistance changes due to external force and the process of making them.

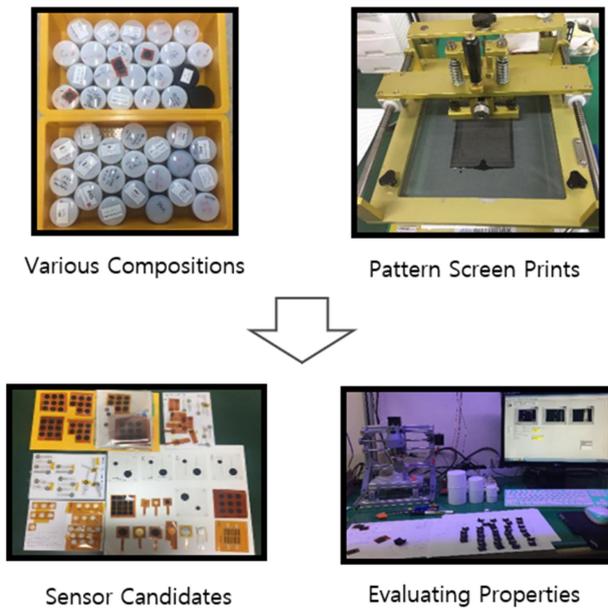


Fig. 5. Example of the process from mixture compositions to evaluations.

type) [7]의 센서 조성으로 Antimony, Silicon, Magnetite, Talc, Silica, Graphite, Molybdenum, Carbon, Bentonite Sulfide 및 Oxide 화합물 등의 원료를 조합하였다.

인쇄성과 부착성 향상을 위해 Elastomers, Silicones, Polyester, Phenoxy, Polypropylenes, Epoxy, Acrylic, Polyethylenes, Vinyl, Polyamide Polymers 등의 고분자 재료를 유기 바인더로 사용하였다. 유전성, 반도체성, 도전성 원료 분말과 유기 바인더의 혼합을 균일하게 하기 위해서 1차, 2차 분산 공정에서 2000 rpm의 페이스트 믹서를 2분간 구동하여 혼합하였다. 점도 조절 시에는 3-roll mill로 혼합하여 분산성을 유지하도록 하였다. 인쇄 후 85°C에서 30분간 경화 후 상온에서 2시간의 aging을 거친 후 하중에 따른 저항변화의 조성별 전기적 특성 평가를 진행하였다(Fig. 5).

3. 결과 및 고찰

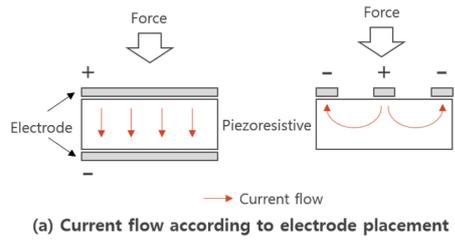
3.1 개선형 레벨센서 평가

3.1.1 저항/전극 페이스트

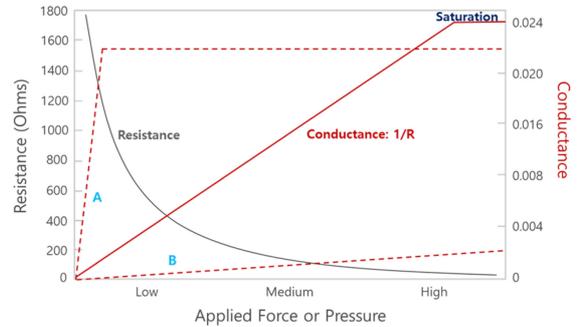
다양한 재료를 조합한 조성물은 하중별 압저항 특성을 평가하였고, 원료분말의 함량(Solid loading)을 높여가면서 전기전도도를 함께 측정하여 반복성이 우수한 센서 조성을 도출하였다.

압저항 효과(Piezoresistive effect)는 외력에 의해 저항이 변화되는 현상으로 원료분말 간의 접촉 면적이 크거나 도전성이 높으면 접촉 저항이 낮아지고 접촉 면적이 작거나 도전성이 낮으면 접촉 저항이 높아진다.

접촉 저항을 낮도록 설계하면 Fig. 6의 압력과 전기전도도의



(a) Current flow according to electrode placement



A : High Slope → High Resolution → Narrow Measurement Range

B : Low Slope → Low Resolution → Wide Measurement Range

(b) Proportionality between external force (or pressure) and conductance

Fig. 6. The relationship between applied force (or pressure) and conductance of sensor materials.

변화 그래프에서 A의 현상과 같이 낮은 압력 범위에서 최대 전기전도도에 빠르게 도달하게 되고, 접촉 저항을 높게 설계하면 B와 같이 넓은 압력 범위에서 전기전도도는 선형적으로 변화하게 된다. 필름형 레벨센서는 수 cm 이내의 낮은 수압에서도 빠른 저항 변화(Fig. 6 A-slope)가 요구되기 때문에 도출한 조성 중 수십~수백 옴(Ohm) 수준의 민감한 조성을 선정하여 필름형 레벨센서에 적용하였다.

3.1.2 휘트스톤 브릿지 회로를 적용한 필름형 레벨센서

기존 방식의 필름형 레벨센서를 개선하기 위해서 입출력 전압 단자를 갖는 독립된 4개의 저항(R_1, R_2, R_3, R_4)과 서로 이격된 전극 2개가 필요하고, 이러한 구성은 필름형 레벨센서가 자체적으로 휘트스톤 브릿지 회로가 되도록 구성할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 4개의 저항 중 가운데 2개의 저항(R_2, R_3)은 2개의 전극(E_1, E_2)과 접촉하여 저항이 가변될 수 있도록 하는 것을 특징으로 한다.

하부필름에 인쇄된 저항부(R_1, R_2, R_3, R_4)와 상부필름에 인쇄된 전극부(E_1, E_2)가 맞닿을 수 있도록 마주보게 배치하고, 상부 필름과 하부필름 사이의 공간이 0.15 mm가 이격되도록 필름 외곽부에 2 mm 폭으로 점착되도록 양면테이프를 재단하고 필름이 휘어지지 않고 텐션을 유지할 수 있도록 합지하였다.

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 저항부와 전극부를 맞닿도록 합지한 상태를 모식화한 것으로 저항부와 전극부가 양면 테이프에 의하여 이격되어 있음을 보여준다. 수위측정 시 수압에 의해서

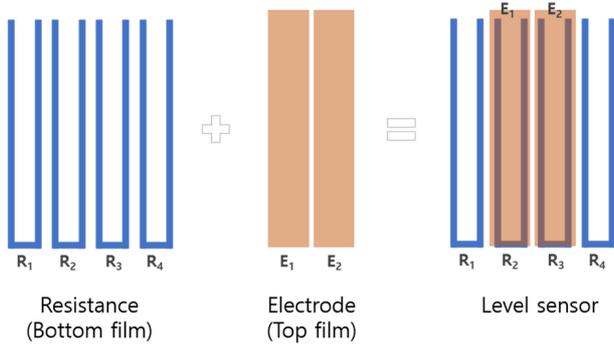


Fig. 7. A schematic diagram of the configuration of the improved film-type level sensors.

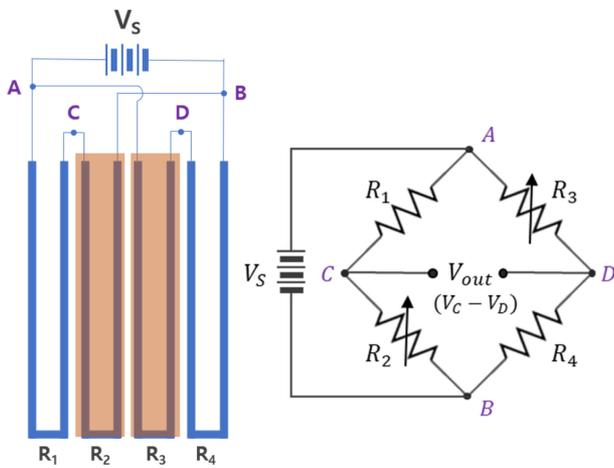


Fig. 8. Electrode connections forming the Wheatstone bridge circuit in the improved film-type level sensors.

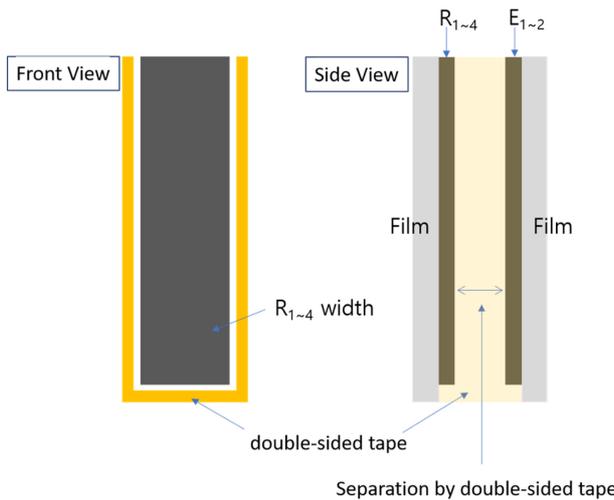


Fig. 9. Description of a state where the resistive components and electrode components are laminated in contact with each other.

이격된 저항부와 전극부는 붙게 되고, 전극에 의해서 R_2 , R_3 의 저항은 낮아지게 된다.

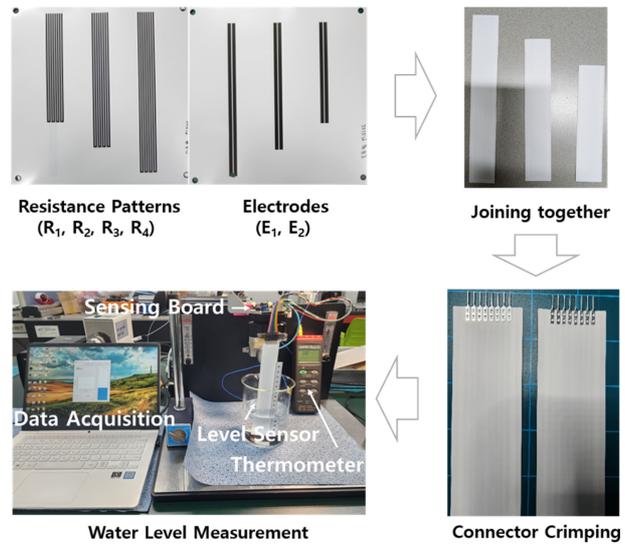


Fig. 10. Steps from the fabrication to the evaluation of the improved film-type level sensors.

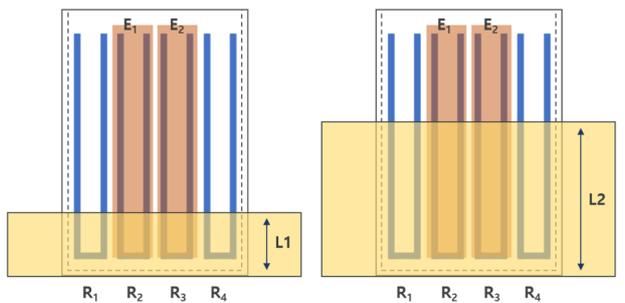


Fig. 11. Illustration representing a repeat test of the improved film-type level sensors.

0.08 mm 두께의 PE/PP 재질의 혼합필름은 칼금형을 이용하여 정사각형 형태로 타발하였고, 사각의 외곽에 가이드 홀을 형성하여 인쇄 및 합지 공정에서 패턴이 유지되도록 하였다. 타발된 양면테이프도 인쇄 패턴과의 간격을 유지하도록 하부필름, 양면테이프, 상부필름 순서로 합지하였고 이러한 과정을 Fig. 10에 나타내었다.

길이에 대한 텐션 차이를 확인하기 위해서 $28 \times 150 \times 0.36$, $28 \times 180 \times 0.36$ 과 $28 \times 210 \times 0.36$ (W×L×T, mm)의 3종의 필름형 레벨센서를 제작하였고, 길이와 상관없이 수압에 대한 저항 변화 특성이 동일함을 확인하였다.

필름 내부에 있는 저항부와 전극부를 외부 회로 커넥터와 연결하기 위해서 전극핀 8개를 crimping하였고, 수위 측정 시 필름 내부의 공기 흐름이 원활하도록 crimping한 부위에는 양면테이프를 사용하지 않았다.

아날로그 데이터를 얻을 수 있도록 제작한 측정 회로(Sensing board)에 PC와 USB단자로 연결하여 시리얼 통신을 하였고, 센서의 반복성은 동일한 수위에서의 저항을 측정하여 편차로 계산하였다.

Fig. 11과 같이 물속에 L1 (50 mm)과 L2 (100 mm)의 깊이

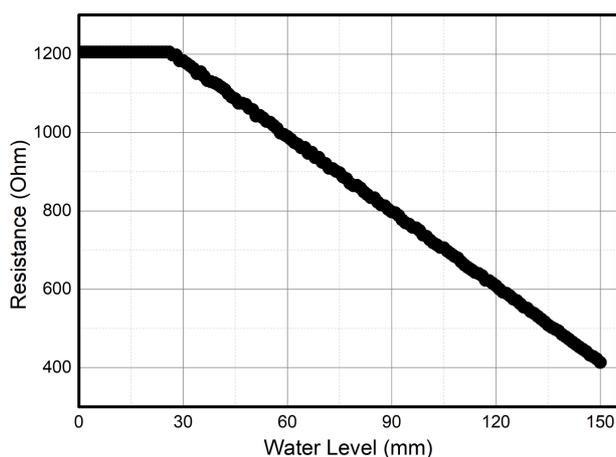


Fig. 12. Characteristics of R_2 and R_3 resistances in the improved film-type level sensors.

를 반복적으로 교차하여 해당 깊이에서의 저항을 확인하였다. R_2 저항을 5회 평균하여 L_1 은 1062 Ω , L_2 는 740 Ω 의 값을 얻었고 반복 평가에서의 저항의 편차는 1.0 % 수준으로 Fig. 12와 같은 그래프를 얻을 수 있었다.

제작한 필름형 레벨센서의 저항 변화의 선형성을 확인했기 때문에 반복 평가에서 도출된 저항과 깊이의 관계를 통해서 함수를 도출할 수 있었다.

$$L = -0.155R + 214.91 \quad (1)$$

여기서 L 은 물에 잠긴 깊이이고, R 은 필름형 레벨센서가 L 의 깊이만큼 잠겼을 때의 저항을 의미한다.

수식 (1)을 이용하여 센서를 물속으로 1 mm씩 이동하여 수위를 측정 한 결과 1.5 mm 해상도로 측정이 가능하였다.

기존 제품(eTape, PN-12110215TC-8)의 경우 3 mm 수준으로, 본 연구에서 제작한 개선형 레벨센서는 민감도 향상으로 기존 제품과 비교하여 2배 높은 해상도의 결과를 얻었다. 다만 최소 감지 깊이는 두 샘플 모두 25 mm 이상으로 확인되었다. 이는 측면부와 하단부가 양면테이프를 둘러싸여 센서 하단부의 텐션이 상대적으로 높아서 낮은 수위의 수압에 대한 반응성이 없는 구조적인 문제로 판단되었다.

4. 결 론

수위 측정에 보편적으로 사용되는 저항식 필름형 레벨센서의 민감도를 높이기 위한 방법으로 센서 내부에 4개의 저항과 2개의 전극을 이용하여 자체적으로 휘트스톤 브릿지 회로가 되도록

구축하였다. 동등 수위에서 2배 높은 출력 전압은 센서의 민감도를 향상시켰고, 기존 제품과 비교하여 2배 높은 해상도 구현이 가능하였다.

개선된 필름형 레벨센서에서 인쇄된 저항은 낮은 수위에도 빠른 저항 변화가 가능할 수 있도록 설계하였고 반복성과 수위 측정에 대한 편차를 평가하였다. 각 수위에 대한 저항 편차는 1.0 % 수준이었고, 수위에 대한 저항의 선형성으로부터 저항과 수위의 연관성을 함수식으로 도출하였다.

필름형 레벨센서는 수압에 반응할 수 있는 유연성(재료 기술), 합지 시 굴곡이 생기지 않도록 텐션 유지(공정 기술), 물에 잠길 때와 나올 때에 센서 내부로 공기가 원활하게 이동할 수 있는 유로 확보(설계 기술)가 필요하기 때문에 각각의 요소 기술이 개선된다면 보다 신뢰도가 높은 필름형 레벨센서 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전사업 기술사업화 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00247279).

REFERENCES

- [1] C. A. Belsteling, "A Look at Level Measurement Methods", *Instrum. Control Syst.*, Vol. 54, pp.37-45, 1981.
- [2] H. Golnabi and P. Azimi, "Design and performance of a cylindrical capacitive sensor to monitor the electrical properties", *J. Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 9, pp.1699-1705, 2008.
- [3] H. Golnabi, "Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection", *Opt. Laser. Eng.*, Vol. 41, pp. 801-812, 2004.
- [4] E. Vargas, R. Ceres, J. M. Marti'n, and L. Caldero'n, "Ultrasonic sensor for liquid-level inspection in bottles", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol. 61, No. 1-3, pp. 256-259, 1997.
- [5] A. Kulkarni, R. N. Karekar, and R. C. Aiyer, "Liquid Level Sensor", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, No. 10, pp. 105108-105113, 2005.
- [6] B. H. Choi and C. H. Ryu, "Understanding the Principles of Wheatstone Bridge Circuit", *J. Korean Soc. Explos. Blasting Eng.*, Vol. 35, No. 2, pp. 9-17, 2017.
- [7] D. Y. Lim, T. W. Ha, and C. H. Lee, "Development of Integration Pressure Sensor Using Piezoresistive Effect of Chemical Vapor Deposition (CVD) Produced Multilayer Graphene", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 32, No. 6, pp.470-474, 2023.