

# 고손실 전송선 모델을 이용한 화학물질 누액 센서의 누출지점 예측

## Leakage Point Prediction of a Chemical Leak Sensor Using a Lossy Transmission Model

송 석 근<sup>1</sup> · 박 검 재<sup>2\*</sup> · 이 창 석<sup>3</sup>

Seok Geun Song<sup>1</sup> · Gumjae Park<sup>2\*</sup> · Changseok Lee<sup>3</sup>

### 요 약

대형 화학공장에 사용되고 있는 스트립 타입의 화학물질 누액센서의 누출지점을 예측함에 있어서, 저항성 센서 물질과 평행하게 인쇄된 그라운드 선 사이의 커패시턴스를 측정하여 누출지점을 예측할 수 있으나, 길이가 길어지면 커패시턴스가 선형적으로 변하지 않아 위치 예측의 정확성이 떨어지는 단점이 있었다. 본 연구에서는 유전체 박막 위에 코팅된 센서 스트립을 고손실 전송선으로 모델링함으로써 누출지점 예측 정확성을 향상시켰다.

### Abstract

In predicting the leakage point of a strip-type chemical sensor used in large-scale chemical plants, the leakage point can be predicted by measuring the input capacitance of the sensor strip, but the position prediction accuracy is poor. In this study, it is demonstrated that the accuracy of predicting leakage points can be improved by modeling the sensor strip as a lossy transmission line.

Key words: Chemical Sensor, Leak Detector, Transmission Line, IoT, Network Module

### I. 서 론

현대 산업에 사용되는 다양한 화학물질은 해당 산업기준에 의하여 철저히 관리되고 있지만, 다양한 요인으로 인체에 해로운 화학물질의 누출이 발생하기도 한다<sup>[1]</sup>. 최근 유해화학물질 누출을 조기에 감지할 수 있는 스마트 화학센서를 개발, 실내 또는 실외에 설치하여 유해 화학물질의 누출 시 이를 곧바로 감지하고, IoT 센서 네트워크를 이용해 그 위치를 전송하여 더 큰 사고로 이어지기

전에 위험에 대한 정보를 제공하는 스마트 센서 시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 일반적으로 화학물질 센서 구조는 유전체 박막 위에 저항성 센서 물질과 금속성 그라운드 라인이 평행하게 인쇄된 스트립 형태이다. 화학물질 이송 파이프를 따라 파이프 외부에 장착되고, 그 외부에 다시 테이핑이 되어 있어 누출 여부를 육안으로 확인하기 어려운 구조이다. 누출지점의 위치를 예측하기 위하여 일정 길이마다 센서의 저항을 측정하고 보고하는 모듈을 배치하여 사용하고 있으나, 최근 모듈 간 커

「이 논문은 2018학년도 한밭대학교 대학회계 연구비를 지원받아 작성되었음.」

한밭대학교 정보통신전문대학원 모바일융합공학과(Department of Mobile Convergence Engineering, Hanbat National University)

\*㈜테크앤(TechAnd Inc.)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0001-9547-0245>), 2: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0005-5375-8450>), 3: 정교수(<https://orcid.org/0000-0001-6835-9114>)

· Manuscript received January 15, 2023 ; Revised February 7, 2023 ; Accepted February 23, 2023. (ID No. 20230115-005)

· Corresponding Author: Changseok Lee (e-mail: cslee@hanbat.ac.kr)

패시턴스를 측정함으로써 모듈 사이에서의 누액위치를 예측하는 방법이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 이 방법은 누액 거리와 커패시턴스 간의 비선형성을 추세선 수식을 만들어 적용해야 한다<sup>[2]</sup>. 센서 스트립은 금속성 이송 파이프에 붙여서 사용하는 것이므로 금속성 이송 파이프와의 접촉 정도에 따라 단위 길이당 커패시터가 달라지므로 예측하기 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 센서 스트립을 고손실 전송선으로 모델링하고, 센서 스트립 설치공사 완료 후, DC 저항 측정과 고주파 특성임피던스를 이용해 단위 길이당 커패시턴스를 계산하여 고손실 전송선 모델을 결정하고, 그 모델과 저주파 커패시턴스 측정을 통해 누액 지점을 계산하는 방법을 제안하고 검증한다.

## II. 화학물질 누출 센서의 모델링

화학물질 누액 센서는 다양한 형태로 제작되어 사용되고 있으며<sup>[3]</sup>, 본 논문에서는 그림 1에 나타난 형태의 저항성 센서 스트립 구조를 대상으로 연구하였다. 스트립 타입의 누액센서는 일정 길이마다 측정 모듈들이 필요하며, 각 측정 모듈에 전원을 공급하기 위해 전원선과 통신을 위한 통신선이 필요하다. 전원선과 통신선은 은(silver) 박막 또는 알루미늄 박막으로 제작되며, 저항성 센서 라인과 같은 평면에 배치된다.

그림 2에 센서 스트립의 단면을 나타냈다. 본 연구에 사용된 센서는 저항성 센서 물질의 폭이 5 mm이고, 접지선과의 간극이 2 mm인 구조를 사용하였다. 유전체 테이프의 두께는 0.1 mm이다.

센서 스트립의 단면 구조를 저항성 센서 물질을 중심으로 보면 그림 2에 나타난 바와 같이 CPW(coplanar waveguide) 구조의 전송선으로 모델링할 수 있다. 전송선

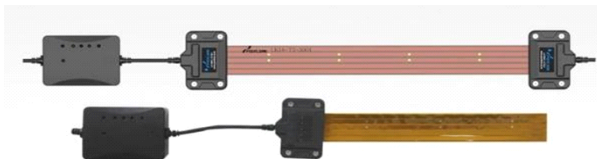


그림 1. 스트립 타입 화학물질 누액 센서  
Fig. 1. Strip type chemical leak sensors.

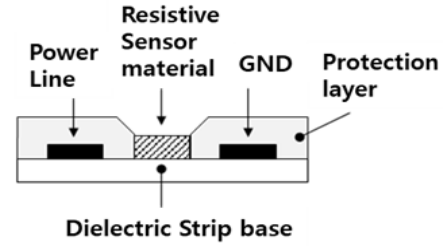


그림 2. 화학물질 누액 센서 스트립의 단면도  
Fig. 2. Crosssection of a sensor strip.

의 특성임피던스  $Z_0$ 와 전파상수  $\gamma$ 은 단위 길이당 직렬 저항  $R$ , 단위 길이당 직렬 인덕턴스  $L$ , 단위 길이당 병렬 컨덕턴스  $G$ , 단위 길이당 병렬 커패시턴스  $C$ 에 의해 결정된다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

일반적인 전송선에서는  $R$ 의 크기가  $j\omega L$ 의 크기보다 매우 작아서 무시되고,  $G$ 의 크기가  $j\omega C$ 의 크기보다 매우 작아서 무시되지만<sup>[4]</sup>, 저항성 센서 물질의 저항값은 825 kΩ/m 정도이고 인덕턴스는 300 nH/m 정도이므로 100 kHz의 주파수에서도 인덕터의 영향은 충분히 무시할 수 있다. 따라서 식 (1) 및 식 (2)는 식(3) 및 식 (4)로 쓸 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{j\omega C}} \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega CR} \quad (4)$$

센서 스트립의 저항성 센서물질이 화학물질에 의해 끊어지면 전송선의 한쪽 끝이 단선된 구조가 되며, 이때의 입력단 임피던스  $Z_{in}$ 은 식 (5)와 같다.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1}{\tanh(\gamma l)} \quad (5)$$

입력단 임피던스  $Z_{in}$ 은 복소수이며 허수부를 이용하면 입력단(직렬) 커패시턴스  $C_{in}$ 을 알 수 있다.

$$C_{in} = \frac{-1}{\omega \text{Im}[Z_{in}]} \quad (6)$$

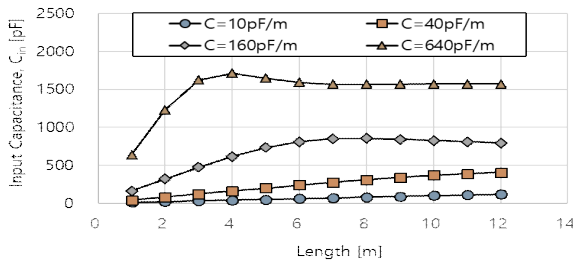


그림 3. 단위 길이당 커패시턴스에 따른 단선 거리별 입력단 커패시턴스

Fig. 3. Input capacitance with different unit capacitance values.

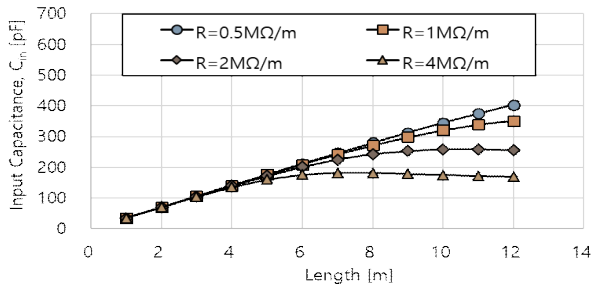


그림 4. 센서 물질의 단위 길이당 저항에 따른 단선 거리별 입력단 커패시턴스

Fig. 4. Input capacitance with different unit resistance values.

그림 3에 주파수 100 Hz에서, 단위 길이당 저항값이 825 kΩ/m로 일정하고, 단위 길이당 커패시턴스  $C$ 가 10, 40, 160, 640 pF/m일 때, 단선 거리에 따라 계산한 입력단 커패시턴스  $C_{in}$ 을 나타냈다. 그림 4에 주파수 100 Hz에서, 단위 길이당 커패시턴스가 35.45 pF/m으로 일정하고, 단위 길이당 저항값  $R$ 이 0.5, 1, 2, 4 MΩ/m일 때 거리에 따라 계산한 입력단 커패시턴스  $C_{in}$ 을 나타냈다.

그림 5에는 단위 길이당 저항값이 825 kΩ/m이고, 단위 길이당 커패시턴스가 35.45 pF/m일 때 주파수 0.1, 1, 10, 100 kHz에서 계산한 입력단 커패시턴스  $C_{in}$ 을 나타냈다.

### III. 문제점 및 해결방안

센서 스트립의 입력 임피던스는 센서 물질의 저항값과 센서 스트립 주변 물질의 거리 및 유전율 그리고 측정 주

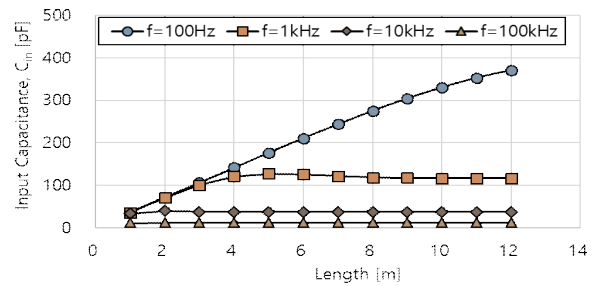


그림 5. 주파수에 따른 단선 거리별 입력단 커패시턴스

Fig. 5. Input Capacitance with different frequencies.

파수에 따라 그 경향이 다르므로 입력 임피던스 측정만으로 누액 지점을 예측하는 것은 부정확하다. 이송용 금속관에 센서 스트립을 부착할 때 0.5 mm 두께의 플리에틸렌으로 분리하였을 경우와 1 mm 두께로 분리하였을 경우, 특성 임피던스가 57 % 증가하는 것을 계산할 수 있으며<sup>[4]</sup>, 이는 단위 길이당 커패시턴스가 25 % 감소하는 것이므로, 추세식을 이용하는 기존의 방법으로는 25 % 이상의 측정 에러가 발생할 수 있다.

그러나 설치 직후 단위 길이당 저항  $R$ 과 단위 길이당 커패시턴스  $C$ 를 측정할 수 있다면, 설치 환경에 따른 에러 요인은 제거할 수 있다.

식 (5)에 사용된  $\tanh(\gamma l)$ 의 값은 복소수인  $\gamma l$ 의 크기가 커지면 실수값은 1로 허수값은 0으로 수렴하는 특성이 있으며 식 (4)에서 알 수 있듯이, 전파상수  $\gamma$ 는 주파수를 높여서 키울 수 있다.  $\tanh(\gamma l)$ 이 1이 되면 식 (5)에 나타낸 바와 같이 입력 임피던스가 특성임피던스가 된다. 따라서 고주파 측정으로 특성임피던스  $Z_0$ 를 측정할 수 있고, DC 측정을 통해 단위 길이당 저항  $R$ 값을 알 수 있으므로 식 (3)을 이용해 단위 길이당 커패시턴스  $C$ 를 계산할 수 있다. 저주파에서 측정한 입력 임피던스  $Z_{in}$ 과 식 (5)를 이용하여 단선거리  $l$ 을 알 수 있다.

### IV. 측정 결과

그림 6에 측정을 위한 테스트 셋업을 나타냈다. 12 m의 센서 스트립을 1 m씩 자르면서 측정하였다. 측정에 사용한 장비는 HP사의 4263B LCR 측정기이다.

그림 7에 측정 결과와 모델링을 통해 계산한 결과를 나

타냈다. 12 m 센서스트립의 DC 저항은 9.9 M $\Omega$ 이었으며, 따라서 단위 길이당 저항값은 825 k $\Omega$ /m이다. 고주파에 해당하는 10 kHz와 100 kHz에서 측정된 12 m 스트립의 입력 임피던스값과 식 (6)을 이용하여 측정 주파수에서의 특성 임피던스를 측정하고 이를 이용하여 단위 길이당 커패시턴스를 추출하여 표 1에 나타냈다. 측정값으로부터 커넥터의 기생성분인 병렬 커패시턴스 9.27 pF를 제거한 후 이후 계산을 진행하였다.

100 Hz에서 측정된 임피던스 결과로부터 계산한 길이와 실제 길이의 오차를 표 2에 나타냈다. 12 m 범위에서 5 % 이내의 정확도로 측정할 수 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

화학물질 누액 센서 스트립을 고손실 전송선으로 모델링하고, 설치 직후 DC 저항과 고주파 임피던스를 측정하여 단위 길이당 저항값과 단위 길이당 커패시턴스값을

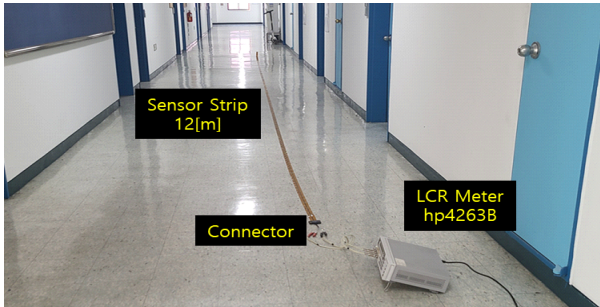


그림 6. 측정 셋업

Fig. 6. Setup for the measurement.

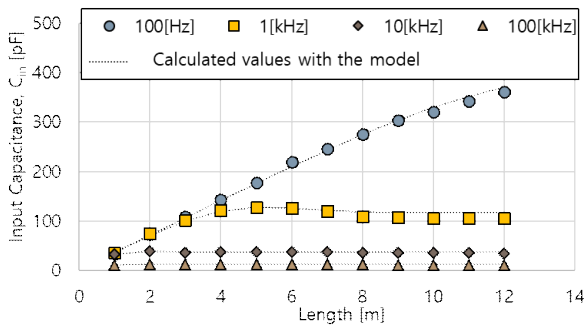


그림 7. 측정값과 계산값의 비교

Fig. 7. Measured values and calculated values.

표 1. 단위 길이당 커패시턴스 추출

Table 1. Extracted capacitance per meter.

Frequency [kHz]	Re( $Z_0$ ) [k $\Omega$ ]	Im( $Z_0$ ) [k $\Omega$ ]	C [pF/m]
10	131	140	35.8
100	133	141	35.1

표 2. 누액 거리 측정 오차

Table 2. Measurement errors.

Length [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Error [%]	-32	4.4	4.6	1.9	0.1	3.7	0.1	-0.1	0.5	-3.1	-3.6	-4.9

추출하고, 지속적으로 저주파 임피던스를 측정하여 누액 지점을 계산하는 방법을 제안하고 검증하였다. 센서 스트립의 설치 환경에 의한 단위 거리당 커패시턴스값의 변화가 고려된 특성을 측정하여 모델링하고, 그 모델을 이용하여 거리를 예측함으로써 설치 환경과 관계없이 거리 예측이 가능함을 알 수 있었다.

## References

- [1] H. K. Kim, S. Lim, "Flexible microfluidic metamaterial absorber for remote chemical sensor application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 2, pp. 123-130, Feb. 2016.
- [2] M. Shin, S. Jeong, D. Kim, J. Kim, and D. Kim, "Development of a impedance measurement controller for a leak detection sensor," in *Summer Annual Conference of IEIE*, Jeju, Jun.-Jul. 2021, pp. 1278-1280.
- [3] K. J. Min, "Yumin ST establishes Saudi production base... 'Film-type liquid sensor sold in 15 middle eastern countries'," 2022. Available: <https://www.hankyung.com/economy/article/202206031503i>
- [4] Chemandy Electronics, "Coplanar waveguide with ground characteristic impedance calculator." Available: <https://chemandy.com/calculators/coplanar-waveguide-with-ground-calculator.htm>