

온도 센싱을 위한 SAW 센서 네트워크 설계 및 다중경로 반사파 제거

SAW Sensor Network Design and Reflected Waves Removal for Temperature Measurement

Kyung-Soon Lee¹ · Kyung Heon Koo^{2*}

¹Research & Development Center, Woori Navigation Technology, Gimpo 10090, Korea

^{2*}Department of Electronics Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

[Abstract]

If temperature management is required in factory or environmental monitoring, temperature can be measured by connecting various sensors wired or wirelessly. Surface acoustic wave sensors measure temperature using changes in acoustic waves on the sensor surface according to temperature, and are useful for wireless networks. In this paper, in order to build a wireless temperature measurement system in the 900 MHz frequency band, the temperature characteristics of the passive SAW sensor were measured, and the analysis and removal of multipath reflection wave effect inside the high temperature chamber were conducted. The resonant frequency of the SAW sensor was measured, and radio transmission/reception and multipath reflected wave removal techniques were proposed in the shielded chamber.

Key word : Multipath, Reflected power processing, Sensing, Wireless network, Wave reflection.

I. 서론

다양한 생산공정 및 환경감시에 온도 측정 및 관리가 필요하며 예로 LCD 제조공정에는 고온처리 공정을 담당하는 챔버가 사용되고 이때 안정되게 품질 관리를 위하여 챔버 내부 공간의 온도를 섭씨 250℃ 등 일정 온도로 유지하도록 요구된다. 기존에는 이러한 온도측정에 유선센서인 열전대 (thermocouple)를 주로 사용하였다. 유선센서의 경우 고온 챔버의 온도 측정 및 관리를 위해 주기적으로 챔버 공정을 멈추고 사람이 들어가 센서를 설치하고 회수하는 작업이 필요하게 된다. 본 연구는 챔버 내부에 용이하게 설치가능한 소형 경량의 패시브(passive) 표면탄성파 (SAW; surface acoustic wave) 센서를 복수개 설치하여 동작 특성을 분석하였다.

패시브 SAW 센서를 적용한 다양한 무선 온도측정시스템 및 RF 송수신을 위한 효율적 인터로게이터 (interrogator) 구조에 대한 연구가 진행되고 있다 [1], [2]. 무선 온도측정 센서네트워크 설계를 위하여 본 논문은 900 MHz 주파수 대역 SAW 센서의 온도-주파수 특성을 측정하였으며 고온 챔버 내 반사전파 영향을 분석하고 제거하기 위한 기술을 제시하였다. 패시브 SAW 고온센서 무선센싱시스템은 RF 펄스를 송수신하는 RF 하드웨어와 공진주파수 획득 및 온도 변환 소프트웨어, 챔버 내부공진 및 다중경로 반사파 잔여전력을 분석하고 제거하는 알고리즘, 그래픽 사용자 인터페이스 (GUI) 로 구성된다.

II. 본론

본론의 주요 내용으로 900 MHz 대역 신호를 송신 및 수신하는 RF 인터로게이터 (SAW 리더라고도 불림) 및 무선전파 경로 손실 분석, 인터로게이터 설계 및 성능 특성, SAW 축적에너지가 방출되어 인터로게이터에 수신되는 신호의 처리를 위한 디지털 하드웨어 특성을 제시하고 다중경로 반사파 제거 알고리즘 및 유저 인터페이스를 설명하였다.

2-1 RF 인터로게이터 (SAW 리더) 설계

온도측정 무선 센서네트워크는 SAW 센서 및 안테나, 리더 (reader)로도 불리는 인터로게이터 및 분석 소프트웨어, 송수신 채널로 구성되며 그림 1에 제시하였다. SAW 리더에서 송신

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.4.469>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

Received 4 August 2023; Revised 10 August 2023
Accepted (Publication) 28 August 2023 (30 August 2023)

*Corresponding Author

Tel: +82-32-835-8446
E-mail: khkoo@inu.ac.kr

된 전파 펄스는 안테나 부착 SAW 센서에 수신되어, 수 μ s 동안 에너지가 축적된 후 재방출되는 COM (coupling of mode) 현상이 발생하고 이때 온도 변화에 따른 SAW 센서 공진주파수 천이가 발생하여 온도측정에 활용된다 [3], [4].

설계된 RF 인터로게이터는 900 MHz 대 RF 펄스를 1초당 300회 이상 송수신하는 RF 송신기와 수신기, 챔버 고유공진 주파수 분석, 다중경로에 의한 반사파와 잔여전력 분석 및 제거 알고리즘, 센서 공진주파수를 획득하는 DSP로 구성되며 이를 온도정보로 변환하고 주파수 설정 등 유저 인터페이스 기능이 있는 소프트웨어와 함께 사용된다. 그림 2에 RF 인터로게이터 블록도를 제시하였다.

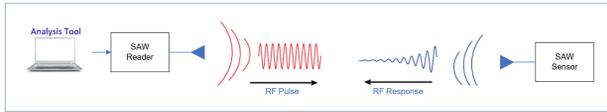


그림 1. 온도측정 무선 센서네트워크 구성도
 Fig. 1. Wireless sensor network construction for temperature measurement

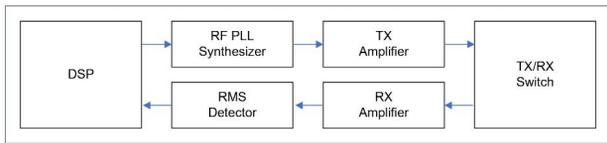


그림 2. RF 인터로게이터 구성블록도
 Fig. 2. Block diagram of the RF interrogator

인터로게이터에서 송수신 신호처리 및 제어를 위하여 DSP를 이용하며 본 연구는 텍사스 인스트루먼트 (TI) 32bit 계열 칩을 사용하며 RF PLL 주파수 발생 제어, 송수신 스위칭, 수신 이득 및 신호 처리를 수행한다. PLL은 SAW 센서에 무선전력을 송신하기 위한 초당 수백회 이상의 주파수 스위프 (sweep) 발생을 제어하며, 송신증폭기는 30dBm 이상으로 전력 증폭, 송수신 스위치는 송신신호 송출 및 수신신호 입력간의 전환을 수행한다. 수신증폭기는 미약한 수신신호의 증폭을 수행하고 Detector는 수신신호를 RMS 평균전압으로 변환한다.

2-2 경로손실 및 송수신 시스템 시뮬레이션

인터로게이터와 SAW 센서간 경로손실은 ADS 시뮬레이터의 반사판 전파모델을 이용하였고, 송신 출력 및 입력 레벨, 안테나 이득을 결정하기 위하여 시스템 시뮬레이션을 하였다. 챔버 크기를 고려하여 거리 1~10 m 사이에서 경로손실 시뮬레이션 결과를 그림 3에 제시하였다. 그림 4는 온도센서 검출 최대거리 7.4 m에서 계산한 송신 최소출력과 이때 수신전력이다. 송신 EIRP가 26 dBm일 때 수신전력은 -78 dBm이다.

SAW 리더 송신부 및 수신부 블록 설계를 위해 시스템 시뮬

레이션을 이용하여 각 구성 블록의 이득과 선형성을 결정하였다. 시뮬레이션 결과 송신부는 출력 27 dBm의 2개 주파수 (tone) 출력에서 -40 dBc 상호변조왜곡 (IMD)을 갖고 최대 선형출력은 30 dBm, 수신부는 -45 dBm의 2개 주파수 입력에서 -70 dBc IMD, 입력전력은 -90 dBm ~ -45 dBm 범위내에 있을 을 그림 5와 6에서 알 수 있다.

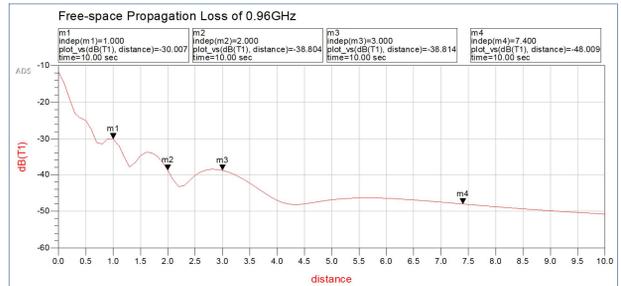


그림 3. 900 MHz 대역 RF 경로손실 시뮬레이션
 Fig. 3. 900 MHz RF path loss simulation (30 dB to 48 dB loss for distance from 1 m to 7.4 m)

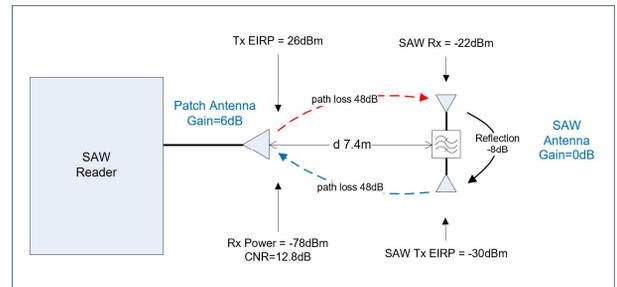


그림 4. 센서 검출 최대거리 7.4 m에서 SAW 리더 송신출력 26 dBm 시 리더 입력신호전력 도출
 Fig. 4. Received input power with 26 dBm Tx power for 7.4 m maximum distance of sensor detection

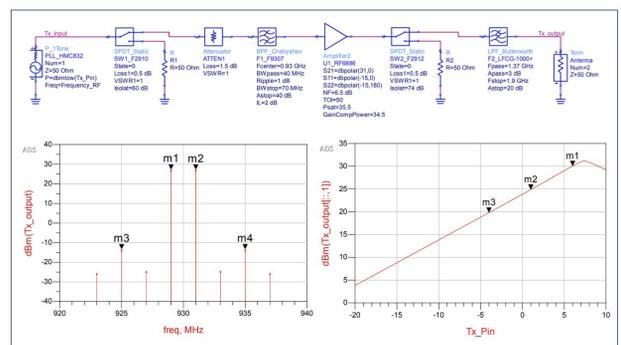


그림 5. RF 송신부 시뮬레이션 결과 27 dBm 2 주파수 출력에서 IMD -40 dBc이며 최대 선형 출력은 30 dBm 임.
 Fig. 5. Tx simulation shows -40 dBc IMD with two frequencies of 27 dBm power and 30 dBm maximum linear output power

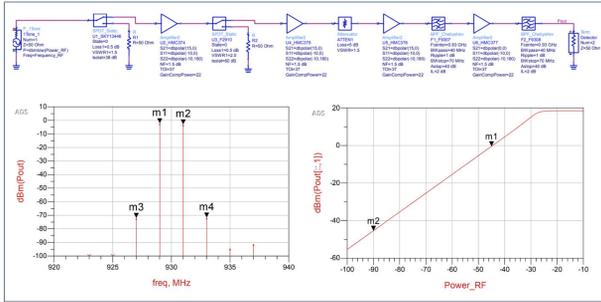


그림 6. RF 수신부 시뮬레이션 결과 -45 dBm 2 주파수 입력에서 IMD는 -70 dBc이며 입력은 -90 dBm에서 -45 dBm

Fig. 6. Rx simulation shows -70 dBc IMD with 2 tones of -45 dBm input power and the possible input range of -90 dBm to -45 dBm

2-3 SAW 센서 공진기 시뮬레이션 및 온도특성

표면탄성과 SAW 센서의 공진주파수를 구하기 위해 등가 회로 및 회로망 합성법을 이용할 수 있다 [3], [4]. 또한 COM (coupling of mode) 이론을 이용하여 시뮬레이션할 수 있다 [4], [5], [6]. 고온 측정에 활용되는 SAW 센서로 Langasite (GaLa 3013Si) 센서가 있으며 그 구조를 그림 7에 제시하였다. 그림 8에서 열전대로 측정된 약 400°C 온도 변화 (TC-CH5-Temp)에 대해 Langasite 센서 공진기는 7 MHz의 공진주파수(RD-CH5-Freq) 천이가 발생함을 확인할 수 있다.

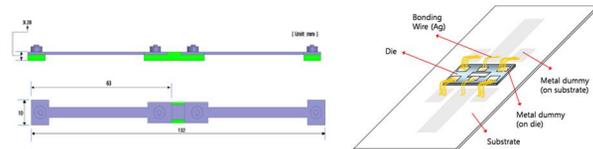


그림 7. Langasite SAW 온도센서 외형 및 구조
Fig. 7. Shape and structure of a Langasite SAW sensor

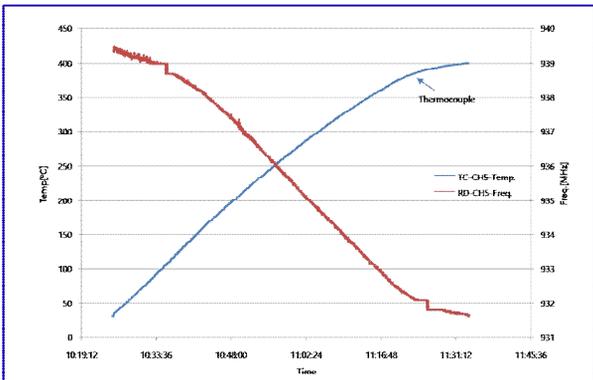


그림 8. 온도에 따른 Langasite SAW 센서의 공진주파수 천이
Fig. 8. Resonant frequency shift of a Langasite SAW sensor with temperature change

III. SAW 센서의 공진주파수 측정

3-1 단일 SAW 센서 공진주파수 측정

실제 송수신기와 안테나를 이용하여 SAW 센서공진기에 RF 스위프 신호를 송신하고 SAW 공진에 따른 반사파 잔여전력을 분석하여 공진주파수와 온도측정이 가능한 시스템을 구성하였다. 그림 9의 스펙트럼은 공칭 927 MHz SAW 센서를 실험용 쉴드박스(shield box)에 넣고 927~929 MHz를 8 kHz 간격 스윕하며 송신 후 측정된 센서 측정 에너지의 재방출 특성이다.

SAW 센서를 쉴드박스에 위치한 경우 그 내부에서 다양한 다중경로 반사전력이 생기며 이를 제거하여야 정확한 공진주파수를 획득할 수 있다. 센서 측정 에너지가 재방출되는 과정을 반사파와 함께 수신한 경우 반사파 제거 전 1MHz 넓은 대역폭이 제거 후에는 대폭 감소하여 정확한 단일 공진주파수 획득이 가능하였다. 공진주파수를 환산하여 온도 측정을 할 수 있으며, 그림 10에 센서 공진주파수가 온도 변화에 따라 천이하는 측정 예를 제시하였다. 복수의 센서를 사용하는 경우 각각의 온도 및 공진주파수 특성을 데이터베이스화하여 사용하여야 한다.

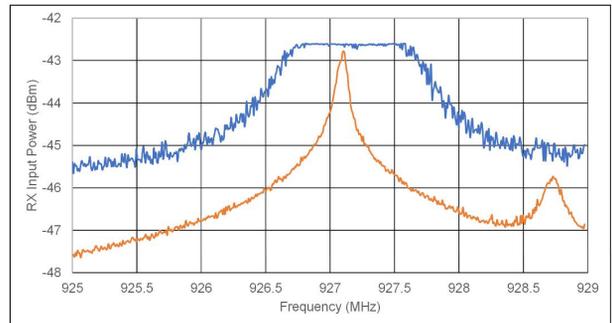


그림 9. 쉴드박스 내에 공칭 927 MHz SAW 센서를 넣어 925~929 MHz를 8 kHz 간격 스윕 송신하여 재방출된 수신 신호를 반사파 제거하기 전/후 스펙트럼 결과

Fig. 9. Received spectrum before/after reflected waves elimination from SAW sensor re-emission in shield box for sweeping 925~929 MHz with 8 kHz step (blue : before, orange : after)

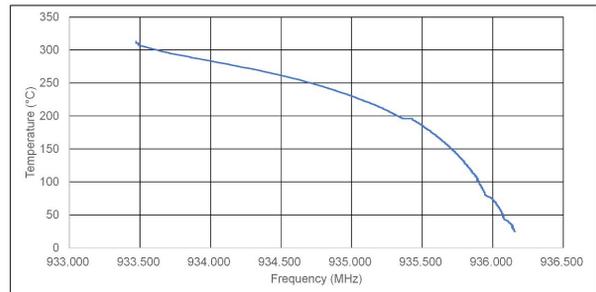


그림 10. 온도변화와 챔버 내 SAW 온도센서 공진주파수 측정
Fig. 10. Measured resonant frequency with temperature

3-2 다중경로 반사파 제거 및 유저 인터페이스

다양한 크기의 고온 챔버에서 발생하는 고유 공진 및 다중경로, 다중반사에 의한 반사파 잔여 전력을 능동적으로 제거할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이는 챔버의 도체 벽면에 의한 많은 수의 반사파와 SAW 센서 공진에 의한 재방출 신호의 상호 지연시간이 상이한 점을 이용하여 이를 검출하고 판단할 수 있도록 시간 영역에서 고해상도 위상지연 분석 및 자동 보정변수 도출이 가능하도록 설계하였다. RF 송수신기의 Rx 및 Tx 스위칭 시간을 다중경로 반사파와 SAW 센서의 재방출에너지 신호가 서로 구별되도록 최적화하였다. 최대 13 μ s까지 위상지연을 검출하고 제거할 수 있다.

무선 센서네트워크의 송수신 하드웨어 제어 및 획득 데이터를 현시하는 윈도우 기반의 유저 인터페이스를 개발하였다. 이를 통하여 입력력 포트 및 안테나 선택, 송수신 주파수 관련 설정, 수신기 검파 레벨 및 스위칭 시간 등을 설정할 수 있으며 복수개 센서에 의한 온도 획득이 가능하도록 하였다.

3-3 다중 SAW 센서 공진주파수 특성

서로 다른 공진주파수를 갖는 5개 SAW 센서를 쉴드박스에 위치시켜 인테로게이터에서 전파를 송신하고 SAW 센서에서 재방출된 신호를 수신하여 각 센서들의 공진주파수를 측정하였다. 900 MHz대 40 MHz 대역폭 신호를 8 kHz 간격으로 스위핑 송신하여 다른 공진주파수를 갖는 센서에 인가하면 센서에 축적된 에너지가 재방출하고 이를 수신한 신호를 다중 반사파 제거 알고리즘을 적용하여 주파수 스펙트럼을 획득하였다. 그림 11에 획득된 스펙트럼 결과를 제시하였으며 이를 분석하면 서로 다른 5개의 공진 주파수를 추출할 수 있다.

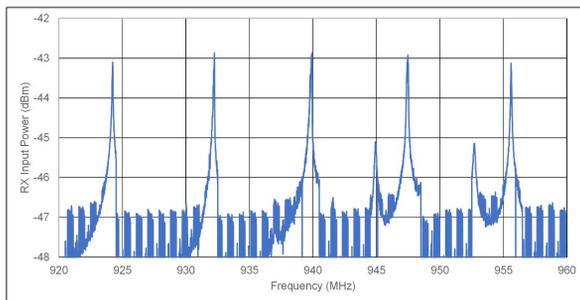


그림 11. 쉴드박스 내 서로 다른 5개 공진주파수 SAW 센서들에 40 MHz 대역폭 전파를 스위핑 송신하여 재방출된 신호를 수신하여 반사파 제거한 후 스펙트럼 모양

Fig. 11. Received spectrum after reflected waves elimination from 5 different SAW sensors in shield box for sweeping 40 MHz bandwidth

IV. 결론

열처리를 위한 고온 챔버를 운영하는 LCD 제조공정에 활용하기 위하여 온도 측정용 무선 온도센서 네트워크 기술을 개발하였다. 표면탄성파 (SAW) 센서는 온도에 따라 공진주파수 천이 특성이 있으므로 넓은 범위 온도측정이 가능하다. 센서에 안테나를 연결하여 900 MHz대 전파를 수신한 후 SAW 축적에너지 재방출이 가능하였다. SAW 센서의 온도에 따른 공진주파수 천이를 측정하고 고온 챔버 내부에 센서가 있을 경우 발생하는 많은 다중경로, 다중반사에 의한 내부 반사파를 제거하여 센서의 공진주파수를 도출하고 측정 온도를 제시하는 동작시스템을 개발하였다.

SAW 센서 공진주파수는 900 MHz 대역 RF 펄스신호를 1초당 300회 이상 송수신하는 하드웨어와 챔버 고유공진 및 반사파 잔여전력 제거 알고리즘으로 추출하여 해당 온도 변환 소프트웨어에 활용할 수 있었다. 단일 SAW 센서 및 최대 5개의 센서를 무선으로 연결하여 공진주파수 및 챔버 내 다양한 위치의 온도를 측정하였으며, 향후 더욱 많은 센서 연결 및 동작거리 증대를 통하여 대형 플랜트에 적용을 모색하고자 한다.

Acknowledgments

본 연구는 인천대학교 자체과제 (2021-0388)에 의하여 수행된 결과의 논문입니다.

References

- [1] F. Lurz, T. Ostertag, B. Scheiner, R. Weigel and A. Koelpin, "Reader architectures for wireless surface acoustic wave sensors," *Sensors*, 2018, 18, 1734.
- [2] G. Bruckner and J. Bardong, "Wireless readout of multiple SAW temperature sensors," *Sensors*, 2019, 19, 3077.
- [3] C. Cambell, *Surface Acoustic Wave Devices and their Signa Processing Applications*, Academic Press, 1989.
- [4] P. V. Wright, "Analysis and design of low-loss SAW devices with internal reflections using coupling of modes theory," in *Proceeding of the 1989 Ultrasonics Symposium*, pp. 141-152, 1989.
- [5] K. Hashimoto and M. Yamaguchi, "General purpose simulator for leaky surface acoustic wave devices based on coupling of modes theory," in *Proceeding of the IEEE 1996 IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 117-122, 1996.
- [6] G. Kovacs, "A generalized P-matrix model for SAW filter," in *Proceeding of the 2003 IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 707-710, 2003.