



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석 사 학 위 논 문

Quadrature Sampling과 Envelope Model을 이용한
SAW 센서의 정밀온도 측정방법



정 성 훈

부산대학교 대학원

전기전자컴퓨터공학과

2018년 2월

Quadrature Sampling과 Envelope Model을 이용한 SAW 센서의 정밀온도 측정방법

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

정 성 훈

부산대학교 대학원

전기전자컴퓨터공학과

지도 교수 백 광 렬

정 성 훈 의 석사 학위논문을 인준함

2017년 12월 13일

위원장 남 기 곤 인

위 원 백 광 렬 인

위 원 이 장 명 인

차 례

I. 서론	1
II. SAW 온도 센서 신호 측정	6
1. SAW 센서 신호 측정 시스템의 구성	6
2. SAW 센서의 응답 측정 방법	7
III. SAW 온도 센서 신호 분석	11
1. Envelope 추정 - Quadrature sampling	11
2. Envelope 추정 - Exponential modeling	16
IV. 실험환경 및 결과	20
1. 공진 주파수 측정 실험	20
2. 다채널 센서 실험	22
V. 결론	25

표 차 례

[표 1] Quartz의 cutting 방식에 따른 열계수	3
[표 2] Quadrature sampling을 사용했을 때의 RMSE	15
[표 3] 각 방법의 RMSE	19
[표 4] 각 방법을 사용해 구한 공진 주파수의 RMSE	21
[표 5] 각 센서로 측정한 온도의 RMSE	24



그 림 차 례

[그림 1] SAW 필터의 구조	1
[그림 2] IDT의 pitch에 따라 결정되는 공진주파수의 파라미터	2
[그림 3] SAW 센서의 구조	2
[그림 4] RF 송수신 시스템 블록도	6
[그림 5] 센서에서 반사된 신호 측정(공진주파수)	8
[그림 6] 센서에서 반사된 신호 측정(다른 주파수)	8
[그림 7] 측정한 신호를 Downconversion한 결과	9
[그림 8] 수신된 신호를 ADC한 결과	10
[그림 9] Quadrature sampling 결과 (위상 0°)	12
[그림 10] Quadrature sampling 결과 (위상 45°)	13
[그림 11] Quadrature sampling 결과 (노이즈 있을 시)	14
[그림 12] 실제 데이터를 Quadrature sampling 한 결과	14
[그림 13] Gradient descent 알고리즘	17
[그림 14] Quadrature sampling과 Exponential modeling 결합한 결과 - 1	18
[그림 15] Quadrature sampling과 Exponential modeling 결합한 결과 - 2	18
[그림 16] 공진 주파수 측정 방법	20
[그림 17] 각 방법으로 공진주파수를 측정한 결과	21
[그림 18] 항온기	22
[그림 19] 센서와 안테나의 배치	22
[그림 20] SM-432 센서의 온도 측정 결과	23
[그림 21] SM-431 센서의 온도 측정 결과	23

Quadrature Sampling과 Envelope Model을 이용한 SAW 센서의 정밀온도 측정방법

정 성 훈

부산대학교 대학원 전기전자컴퓨터공학과

요약

SAW 온도 센서는 무선 센서이며 RF 신호를 인터페이스로 사용하기 때문에 데이터를 정확히 분석하기가 쉽지 않다. 하지만 SAW 온도 센서 공정에 대한 연구는 활발히 진행되는데 비해, 분석 시스템에 대한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 본 논문에서는 SAW 온도 센서를 이용하여 온도를 무선으로 측정하는 시스템을 구성하고, 정밀한 온도 측정을 위한 방법을 제안한다. SAW 센서를 이용한 온도 측정에는 시스템의 샘플 속도, 센서 응답 신호의 위상 차이, 노이즈에 의한 오차가 발생하게 된다. 논문에서는 Quadrature sampling 방식을 사용해 시스템의 샘플 속도와 신호의 위상에 의한 오차를 개선하고, Exponential modeling을 결합해 노이즈에 의한 오차를 개선했다. 개선된 방식을 적용시켜 온도를 측정해 봤을 때 RMSE는 약 1.12°C 로 나타나는 것을 확인하였다. 뿐만 아니라 다채널 센서를 측정해 여러 지점의 온도를 측정하는 과정까지 완료하였다.

1. 서론

온도 모니터링은 산업 분야에 있어서 필수적인 항목이다 [1]. 온도 모니터링을 통해 공장 설비의 기능 고장 및 오류를 사전에 감지할 수도 있고 [2], 엔진 등의 윤활유 부족 현상으로 인한 마찰을 방지할 수도 있다. 철강 제조에 있어서는 제조하는 물질의 특성 파악 등 여러 방면에 활용 된다 [3].

온도 측정 방식은 크게 유선 측정과 무선 측정 방식으로 나뉜다. 유선 온도 측정 방식에는 열전대(Thermocouple), 서미스터(Thermistor), RTD(Resistance Temperature Detector) 등이 있다. 열전대는 종류가 다른 두 금속의 양 끝을 접속시켜 만든 것이다. 접점에 온도 차가 발생하게 되면 열기전력이 발생하게 되며, 기전력의 크기를 측정해 온도로 변환하는 방식이다. RTD는 금속의 저항 성분이 열에 따라 변하는 것을 이용해 저항 값을 측정해 온도로 변환하는 방식이다. 서미스터는 반도체의 저항 성분이 열에 따라 변하는 것을 이용한 방식이다. 서미스터 방식은 저항 값을 측정해 온도로 변환한다는 점에서 RTD 방식과 유사하지만, 금속을 사용하는 RTD와는 다르게 세라믹 또는 폴리머를 사용한다. 위 세 방식의 정확도와 감도는 사용하는 방식마다 차이가 있지만, 유선 온도 측정 방식은 대체적으로 정확도와 감도가 높은 편이다. 하지만 유선 온도 측정 방식은 닫혀있는 공간이나 움직이는 물체의 온도 측정이 불가능하다. 또, 발전소, 가스 터빈, 항공기 등 관리가 어려운 환경에도 사용하기 힘들다 [4]. 무선 온도 측정 방식은 이와 같은 환경에서도 사용이 가능하기 때문에 정확도나 감도가 떨어지는 단점에도 불구하고 많은 연구가 진행되고 있다 [5], [6]. 무선 온도 측정 방식에는 흔히 알려진 적외선 온도계가 있다. 적외선 온도계는 측정 대상의 적외선 방사율로 온도를 측정하는 방식이다. 이 방식은 비접촉으로 높은 온도를 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 적외선이 도달할 수 없거나 방해받는 환경에서는 사용이 불가능하다. 그러므로 무선 온도 측정에 비해 환경 제약이 개선되었다고 보기 어렵다.

무선 온도 측정의 다른 방식으로, SAW 온도 센서를 이용한 온도 측정 방식이 있다. SAW 온도 센서는 무선으로 동작하고, 입력받는 신호를 전원으로 사용하기 때문에 별도의 유선 전원 공급이 불필요하다 [16], [17]. 또, 수명이 길고 제조 단가도 낮아 생산 및 유지, 관리가 용이하다 [10], [12]. 이런 장점들 때문에 SAW 기술이 발견된 지 오랜 시간이 지났음에도 SAW 센서에 대한 연구는 끊임없이 지속되고 있다 [17]. SAW 온도 센서는 RF 신호를 통해 무선으로 전원을 입력받고, 현재 온도에 대한 정보를 RF 신호로

출력한다. SAW 센서가 출력한 RF 신호를 정확히 분석하는 것은 쉽지 않은 일이고, 많은 연구를 필요로 한다 [14]. 하지만 SAW 센서의 공정에 대한 연구는 활발히 진행되고 있는 반면에 SAW 센서를 분석하는 시스템에 대한 연구는 거의 진행되고 있지 않고 있다. 그러므로 본 논문에서는 SAW 센서를 분석하기 위한 시스템을 개발하고, 센서의 정보를 정밀하게 분석하는 방법을 제안한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 SAW 기술과 응용, SAW 온도 센서의 동작 원리에 대해 설명한다. 3장에서는 SAW 온도 센서와 RF 신호를 송수신하기 위한 시스템을 소개하고, 구성된 시스템으로 센서의 신호를 측정한다. 4장에서는 3장에서 측정한 신호를 효율적으로 분석하는 방법으로 Quadrature sampling을 소개하며, 이를 더 정확하게 분석하기 위해 Gradient descent를 결합한 방법을 제안한다. 5장에서는 4장에서 제안한 알고리즘을 통해 실제 환경에서 다채널 센서의 공진주파수를 측정하고, 온도로 변환한다. 마지막으로 6장에서 결론으로 마무리 짓는다.

2. SAW와 SAW 온도 센서

2.1. 표면탄성파, SAW

표면 탄성파(Surface Acoustic Wave, 이하 SAW)는 1855년 Rayleigh 경에 의해 발견 되었으며, 1965년 빗살 모양 전극(Inter-Digital Transducer, 이하 IDT)의 발견됨에 의해 전자기기에 응용되기 시작했다 [19], [20]. 그림 1과 같이 압전 물질(Piezo-electric material)에 IDT를 새긴 후 전기 신호를 가하게 되면 압전 효과(Piezo-electric effect)에 의해 물리 파동인 표면 탄성파가 발생하게 된다 [17].

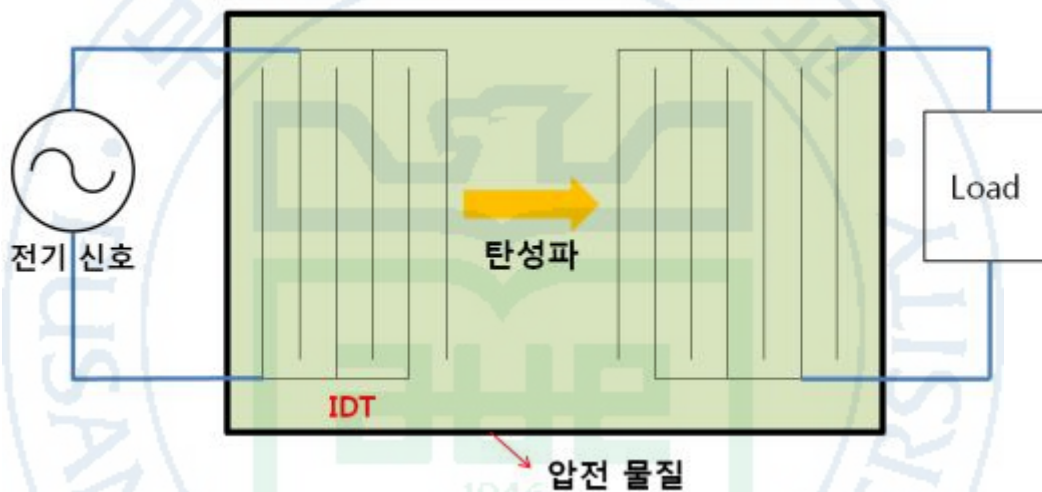


그림 1. SAW 필터의 구조

Fig 1. Structure of SAW filter

그림 1과 같은 구조를 SAW 필터(SAW filter)라고 하며, 이는 SAW를 사용하는 디바이스의 가장 기본적인 형태이다. SAW 필터에 전기 신호가 입력되면 IDT에 의해 표면 탄성파로 변환이 일어나는데, 이 때 특정한 주파수의 신호만 변환이 되며 이를 공진주파수라고 한다. 공진주파수에 가까운 주파수의 신호가 들어오면 신호가 통과되고, 입력되는 신호의 주파수가 공진주파수와 차이가 커질수록 신호의 감쇄가 커진다. 따라서 SAW 필터는 대역 통과 필터(Band-pass filter)와 같은 동작을 한다. SAW 필터의 공진주파수는 그림 2와 같이 IDT의 간격(pitch)과 SAW의 전파 속도(SAW propagation velocity)에 결정된다. SAW의 전파 속도는 사용하는 압전 물질의 재료에 따라 다르며, SAW 필터에 쓰이는 ST-Quartz의 경우는 약 3150m/s 이다.

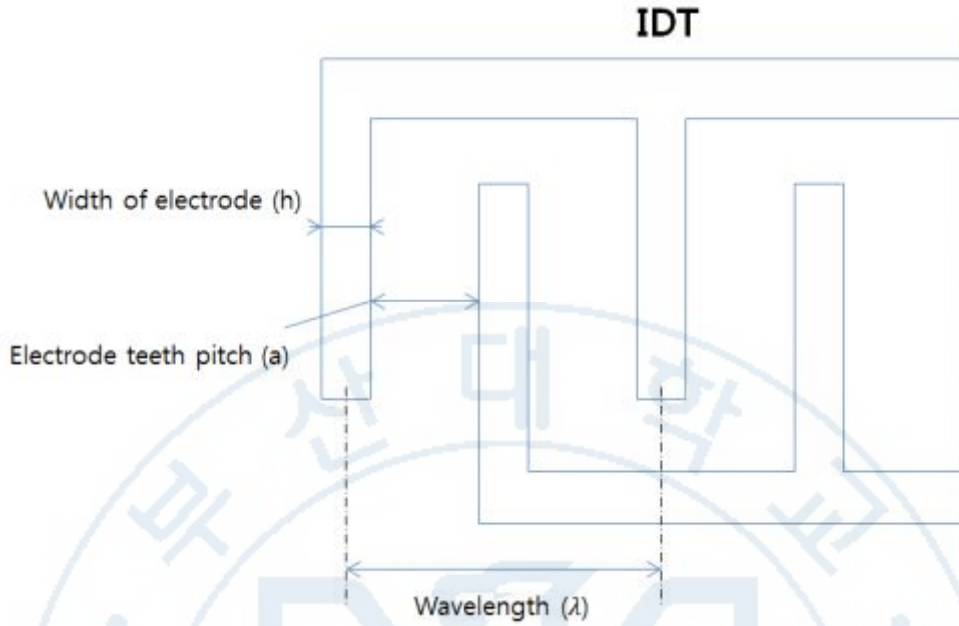


그림 2. IDT의 구조 [18]

Fig 2. Structure of IDT

$$f_R = v/\lambda = v/2(a + h) \quad (2.1.1)$$

공정 파라미터에 의한 SAW 필터의 공진 주파수는, 공식 (2.1.1)을 따른다 [18]. v 는 SAW의 전파 속도이며 a , h 는 전극의 간격에 의해 결정되는 파라미터이다.

SAW 필터는 크기가 작고, roll-off 특성이 매우 좋아 스마트폰 등의 통신 시스템에 많이 사용되고 있다 [-13]. SAW 기술을 이용한 다른 응용 분야는 SAW 센서, SAW RFID 태그 등이 있으며 이들은 SAW 필터의 원리를 응용한 것이다 [15], [16]. SAW 온도 센서는 온도에 따라 공진 주파수가 변화하는 특징을 가지고 있으며 변화하는 공진주파수는 수식(2.1.2)을 따른다 [11].

$$f_T = f_0(1 + \alpha \nabla T) \quad (2.1.2)$$

수식 (2.1.2)에서 α 는 주파수에 대한 열계수(Temperature Coefficient of Frequency, 이하 TCF)이며 이 열계수는 사용하는 압전 물질과 커팅방식에 따라 결정된다 [10]. 일반적으로 압전 물질은 Quartz를 사용하며 표 1에는 Quartz의 cutting 방식에 대한 열계수를 나타낸다.

Cut	Euler angles (for selected propagation directions)	Temperature Coefficient of Frequency(TCF) (ppm/°C)
ST cut (YXI/42.75°)	(0°,132.75°,36°)	21
	(0°,132.75°,65°)	-41
Y cut	(0°,90°,0°)	22
	(0°,90°,52°)	-47
YXI/-30°	(0°,60°,0°)	28
	(0°,60°,60°)	-47
X cut	(90°,90°,-63°)	-52
	(90°,90°,-170°)	36

표 1. Quartz의 cutting 방식에 따른 열계수[10]
Table 1. Temperature Coefficient difference in Quartz

2.2. SAW 온도 센서

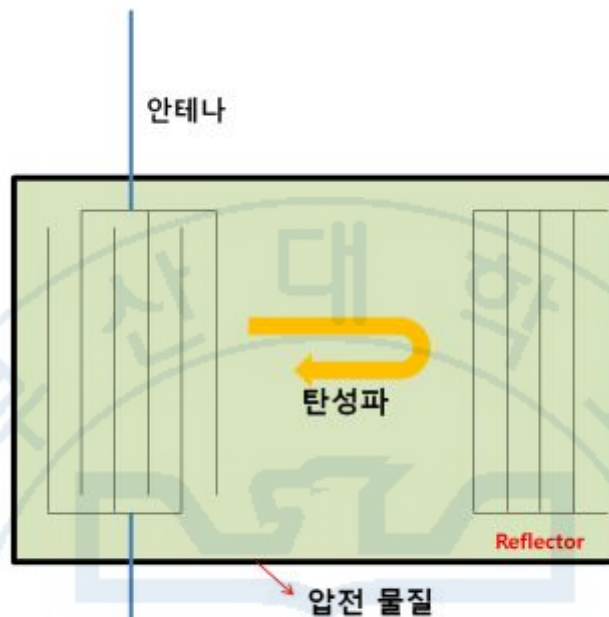


그림 3. SAW 센서의 구조
Fig 3. Structure of SAW sensor

SAW 센서의 구조는 그림 3과 같다. SAW 센서에 RF 신호를 입력하면 안테나를 통해 RF 신호가 전기 신호로 변환되고, 전기 신호는 IDT에 의해 탄성파로 변환된다. 탄성파는 압전 물체의 표면을 따라 움직이고, 반사판(Reflector)에 의해 이동 경로가 변경된다 [8], [9]. 이후 탄성파는 입력됐던 IDT에 의해 다시 전기 신호로 변환되고, 안테나를 통해 방사된다. 이 때 SAW 센서는 입력되는 RF 신호를 전원으로 사용한다. SAW 센서에 전원을 공급하고(RF 신호를 입력하고), 센서의 데이터를 수신하려면(반사된 RF 신호를 수신) RF 송수신 시스템이 필요하다.

SAW 센서의 신호 분석 시스템은 그림 4과 같이 구성된다. 우선 프로세서(DSP, TMS320F28335)가 위상 고정 루프(PLL)을 제어해 특정 주파수 f_0 의 신호를 출력한다. 출력한 신호는 전력 증폭기(Power amp, PA)에 의해 증폭되고, TR 스위치(TR switch)에 입력된다. TR 스위치가 TX mode이면 출력된 신호가 안테나를 통해 방사될 것이고, RX mode이면 안테나로 입력된 신호가 RX 회로로 전달된다. 20us 이상의 시간동안 TX mode로 신호를 출력한 뒤 TR 스위치를 RX mode로 바꾸면 센서로부터 반사된 신호가 RX 회로에 입력된다. 입력된 신호는 -40~ -110dBm으로 신호의 세기가 매우 낮아져 있기 때문에 저잡음 증폭기(Low noise amplifier, LNA)를 거쳐 신호대 잡음 비(Signal to Noise Ratio, SNR)을 최대한 보장해주며 증폭시킨다. LNA를 통해 증폭된 신호는 신호 혼합기(Mixer)에 입력된다. 센서로부터 반사된 신호의 주파수는 약 430MHz 대역으로 매우 높기 때문에, 믹서를 통해 downconversion 한다. Mixer를 통과한 신호는 고주파 성분이 섞여 있기 때문에, 저역 통과 필터(Low-pass filter, LPF)를 통해 고주파 성분을 최대한 제거한다. 저역 통과 필터는 10MHz 의 cut-off 특성을 가진 4차 Butter-worth 필터로 구성했다. 저역 통과 필터를 통과한 신호는 프로세서의 내부 ADC에 입력되고, 이후 프로세서는 ADC한 데이터를 분석한다.

3.2. SAW 온도의 응답 측정 방법

그림 4에서 구성한 시스템을 이용해 SAW 온도 센서로부터 반사되는 신호를 측정 해 보았다. 실험은 SENSEoR 社의 TA4261 센서를 사용했으며, 센서의 공진 주파수 근처의 주파수를 출력했을 때, 반사되는 신호를 측정해 보았다.

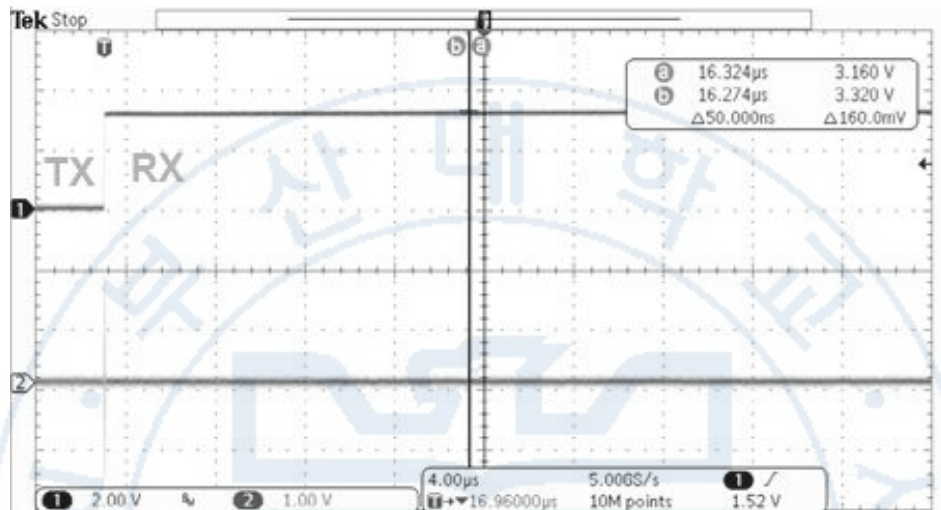


그림 5. 센서에서 반사된 신호 측정(다른 주파수)

Fig 6. Sensor response of other frequencies

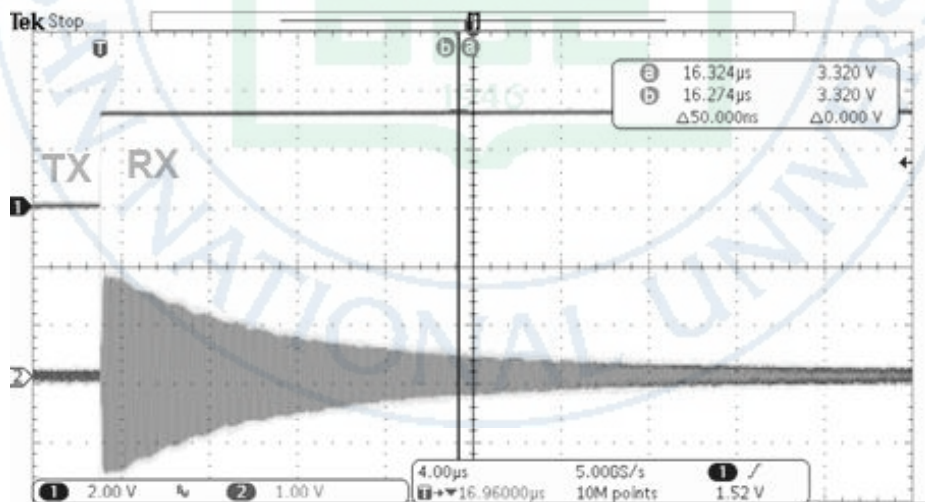


그림 6. 센서에서 반사된 신호 측정(공진주파수)

Fig 5. Sensor response of resonant frequency

반사되는 신호를 측정할 결과는 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 5을 보면 TR switch를 RX mode로 바꾸었을 때 응답 신호가 보이며, 아주 빠른 속도로 감쇄되는 것을 볼 수 있다. 이 때 신호는 지수적(exponentially)으로 감쇄하게 된다 [7]. 반면에 그림 6을 보면 공진 주파수가 아닌 다른 주파수에선 센서로부터 반사되는 신호가 거의 없음을 알 수 있다.

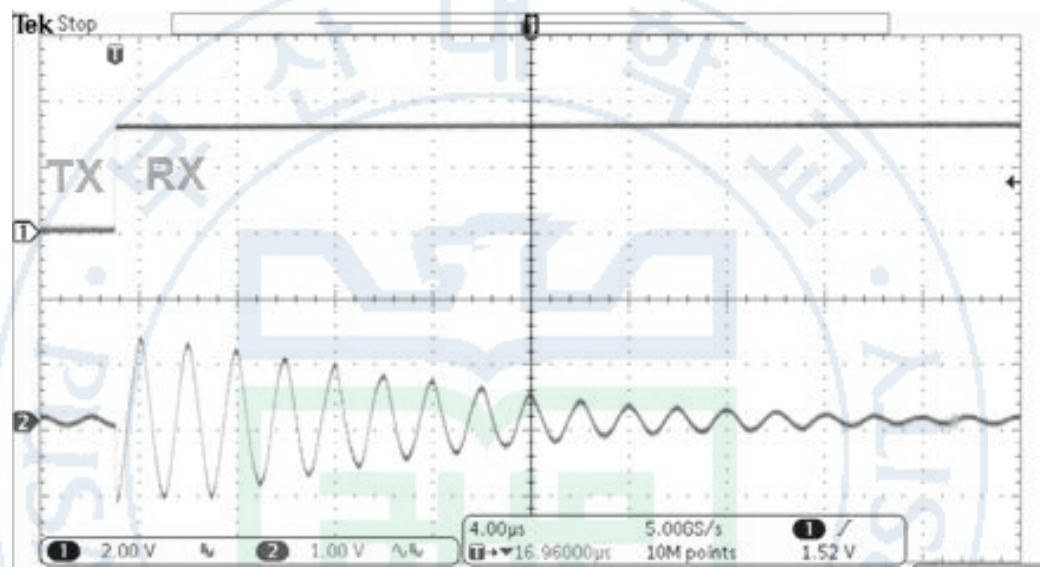


그림 7. 측정된 신호를 Downconversion한 결과

Fig 7. Downconverted data

센서로부터 반사된 신호의 주파수는 430MHz 대역으로, 매우 높은 주파수이기 때문에 이를 분석하기 위해서는 낮은 주파수로 downconversion 해야 한다. 그림 7은 수신된 신호를 downconversion 한 결과이다. Downconversion한 신호의 주파수가 낮으면 낮은 샘플 속도로도 샘플링이 가능하지만, 신호가 시작되는 위상(phase)의 차이 때문에 신호 세기를 측정함에 있어서 오차가 생기게 된다. 반면, Downconversion한 신호의 주파수를 높이면 위상에 의한 오차는 거의 없어지지만 요구되는 샘플 속도가 높아진다.

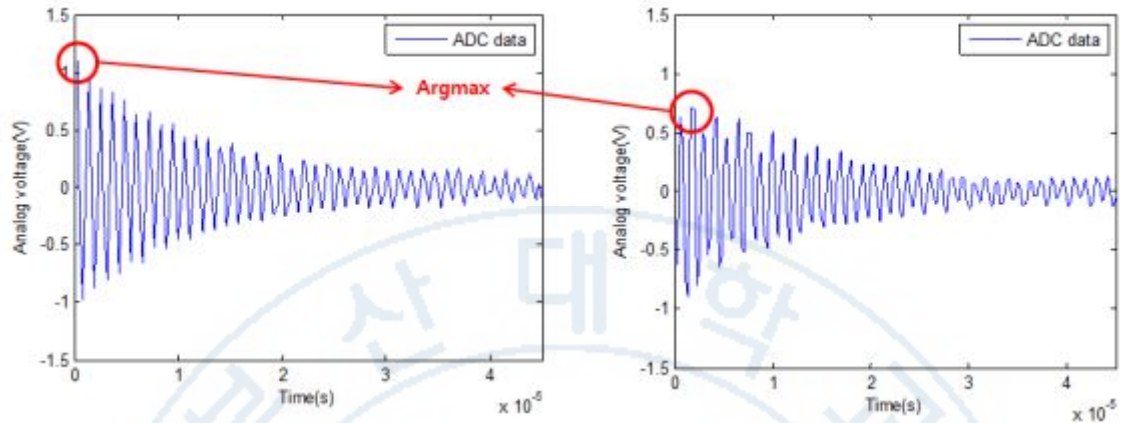


그림 8. 수신된 신호를 ADC한 결과

Fig 8. AD converted signal

그림 8은 센서로부터 반사된 신호를 ADC하는 과정을 두 번 진행한 결과이다. 사용한 ADC는 DSP(TMS320F28335)의 내부 ADC이며, DSP가 안정적으로 낼 수 있는 최대 샘플 속도(sample rate)인 4.16MSPS로 샘플링 하였으며 Downconversion된 신호의 주파수는 위상에 의한 오차를 고려해 1MHz로 설정하였다. 신호세기를 측정하기 위해 ADC한 데이터의 최대값(Argmax)를 찾게 되면 그림 8에서 보이는 것과 같이 측정 할 때마다 오차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 오차는 신호의 위상에 의한 오차 뿐만 아니라 Downconversion된 신호의 주파수에 비해 샘플 속도가 낮기 때문이다. 신호의 주파수의 20배 이상의 샘플 속도로 샘플링 한다면 최대값을 찾는 것만으로도 정확한 세기를 측정할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 더 높은 샘플 속도의 ADC를 사용하지 않고, 근사한 신호 세기를 찾기 위해 신호의 포락선(Envelope)을 추정한다.

4. SAW 온도 센서 신호 분석

4.1. 포락선 추정 - Quadrature sampling

포락선을 추정하기 위한 첫 번째 방법으로 Quadrature sampling 기법을 사용한다. Quadrature sampling은 협대역(narrow band)의, 진폭이 변하지 않는 정현파에 사용하는 방법이다. 신호 주파수의 4배 주파수로 샘플링 한 후 위상이 90도 차이 나는 성분끼리 제곱을 취한 후 더하고 제곱근을 씌우면 정확한 진폭을 찾을 수 있는 방법이다.

샘플링 한 신호를 수식(4.1.1)과 같이 나타내면 위상이 90도 차이 나는 성분은 수식(4.1.2)와 같이 나타낼 수 있다. f_D 는 신호의 주파수이며 f_s 는 샘플 주파수, A 는 신호의 진폭이다.

$$ADC(n) = A \cos(2\pi f_D n / f_s + \theta) \quad (4.1.1)$$

$$ADC(n+1) = A \cos(2\pi f_D (n+1) / f_s + \theta) \quad (4.1.2)$$

Quadrature sampling을 사용해 진폭을 추정한 결과는 수식(4.1.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Env(n) &= \sqrt{A^2 \cos^2(2\pi f_D n / f_s + \theta) + A^2 \cos^2(2\pi f_D (n+1) / f_s + \theta)} \\ &= A \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

본래 Quadrature sampling은 진폭이 일정한 정현파에 사용하는 방법이다. 논문의 시스템에서는 시간에 따라 진폭이 감쇄되는 정현파를 수신하므로 Quadrature sampling 방법을 현재 시스템에 적용시키기 위해 시뮬레이션 해 본 결과는 다음과 같다.

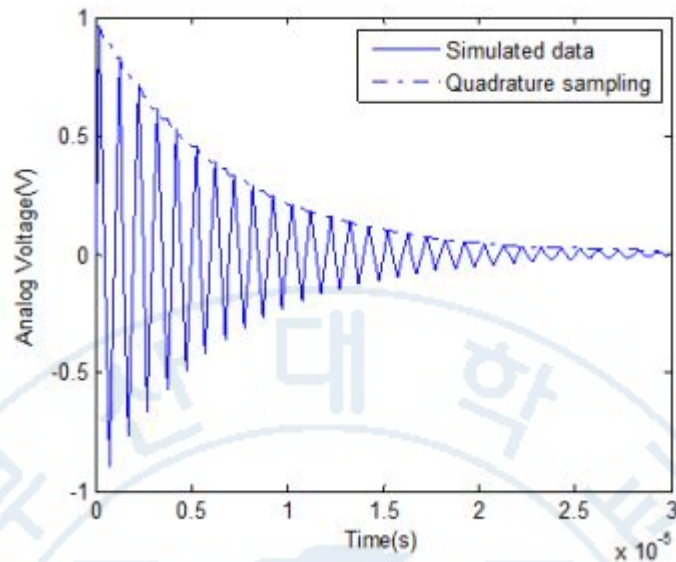


그림 9. Quadrature sampling 결과 (위상 0°)
 Fig 9. Result of Quadrature sampling (Phase 0°)

그림 9의 선 신호는 시간에 따라 감쇄되는 정현파를 시뮬레이션 한 결과이다. 현재 시스템에서 최대 샘플링 주파수가 4.16MSPS이기 때문에 최대 사양에 맞춰 사용하기 위해 신호 주파수는 1/4배인 1.04MHz로 설정했다. 점선 신호는 시뮬레이션 한 정현파에 Quadrature sampling을 적용한 결과이다. 이 그래프를 봤을 때, 시간에 따라 세기가 감쇄되는 정현파에도 Quadrature sampling을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

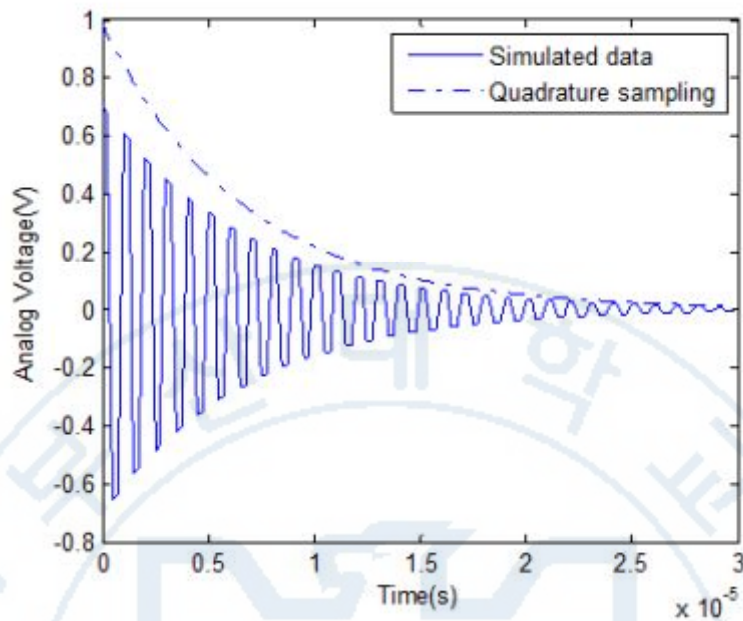


그림 10. Quadrature sampling 결과 (위상 45°)
Fig 10. Result of Quadrature sampling (Phase 45°)

그림 9는 신호의 위상이 0도로, 신호 세기 측정에 있어서는 가장 위상에 대한 오차가 적게 나타나는 이상적인 경우라고 할 수 있다. 그림 10은 위상이 최악의 경우일 때 Quadrature sampling을 적용한 결과이다. 이 결과를 통해 Quadrature sampling 방식을 사용하면 위상에 대한 오차는 거의 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다.

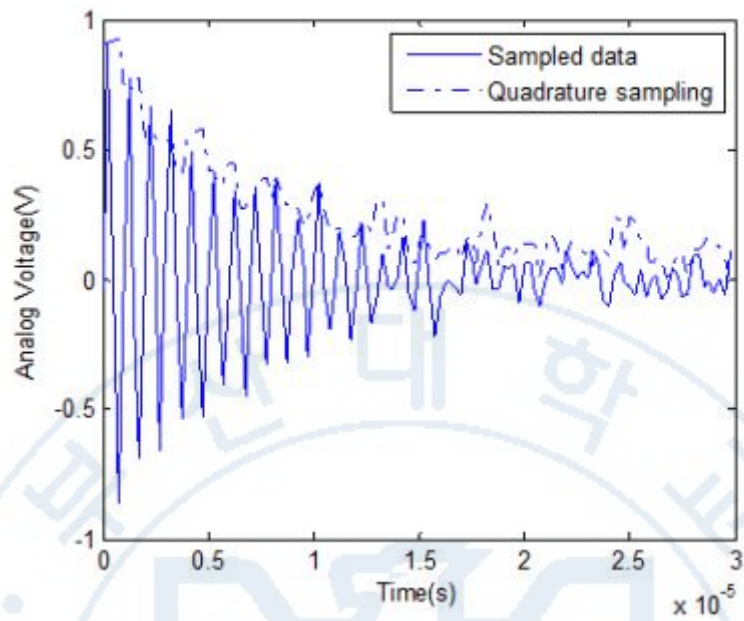


그림 11. Quadrature sampling 결과 (노이즈 있을 시)

Fig 11. Result of Quadrature sampling (with noise)

하지만 그림 11을 보면 위상이 이상적인 경우일 때도 신호에 노이즈가 섞이게 되면 Quadrature sampling 결과에 오차가 생기는 것을 볼 수 있다.

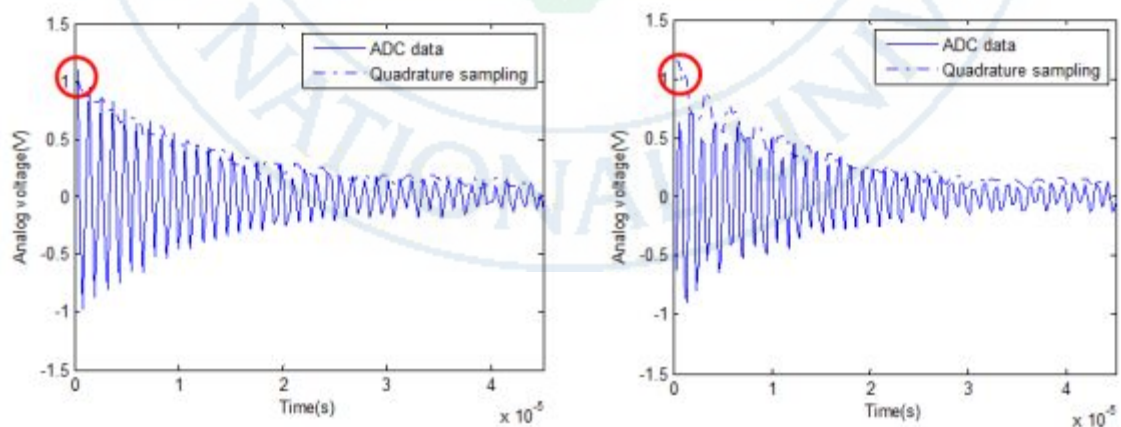


그림 12. 실제 데이터를 Quadrature sampling한 결과

Fig 12. Quadrature sampled result of real data

그림 12는 실제 신호를 ADC한 데이터에 Quadrature sampling방법을 적용시킨 결과이다. 선 신호가 수신된 신호를 샘플링한 결과이며 점선 신호가 Quadrature sampling한 결과이다. 위의 그림을 보면 어느 정도 신호의 포락선을 찾아가는 것을 볼 수 있지만, 실제 신호 세기에 대한 RMS 에러를 구해보면 오차가 크게 개선되지 않았음을 알 수 있다. 이는 샘플 속도 및 위상에 대한 오차는 줄어들었지만 노이즈에 의한 오차가 남아 있기 때문이다. 표 2는 Quadrature sampling의 RMS 에러를 나타낸 것이다.

Method	RMSE
Argmax	0.52V
Quadrature sampling	0.43V

표 2. Quadrature sampling을 사용했을 때의 RMSE
Table 2. RMSE of Quadrature sampling

4.2. Envelope 추정 - Exponential modeling

Quadrature sampling 방법은 위상에 대한 오차가 적게 발생하지만, 노이즈에 의한 오차가 크게 나타나는 것을 확인 하였다. 이 문제 때문에 RMS 에러도 크게 개선되지 않았는데, 보다 더 정확한 포락선을 추정하기 위해 신호의 감쇄를 지수함수로 모델링하는 과정을 진행했다.

수신된 신호를 샘플링한 데이터를 수식(4.2.1)과 같이 나타낸다.

$$ADC(n) = \alpha e^{-\beta n/f_s} \cos(2\pi f_D n/f_s) \quad (4.2.1)$$

모델링 할 포락선은 수식(4.2.2)와 같이 나타낼 수 있으며, α, β 에 대한 함수로 나타나게 된다.

$$A(\alpha, \beta, n) = \alpha e^{-\beta n/f_s} \quad (4.2.2)$$

이 때, 비용 함수(Cost function)은 수식(4.2.3)과 같이 나타나며, 비용이 최소가 되는 α, β 를 찾으면 가장 근사한 포락선을 구할 수 있다. N은 샘플링한 데이터의 개수, $Env(n)$ 는 앞서 Quadrature sampling 방법으로 구한 envelope이다.

$$Cost(\alpha, \beta) = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (Env(n) - ADC(\alpha, \beta, n))^2} \quad (4.2.3)$$

여기서 비용이 최소가 되는 α, β 를 찾기 위해 경사 하강법(Gradient descent) 방법을 사용한다.

경사 하강법은 국소 최소값(local minimum)을 찾기 위한 알고리즘이다. 비용 함수의 미분값을 구해 가중치를 줘서 현재 추정치에 더하며, 이를 통해 그 다음 추정치를 찾아가는 알고리즘이다. 알고리즘 진행은 그림 13과 같다.

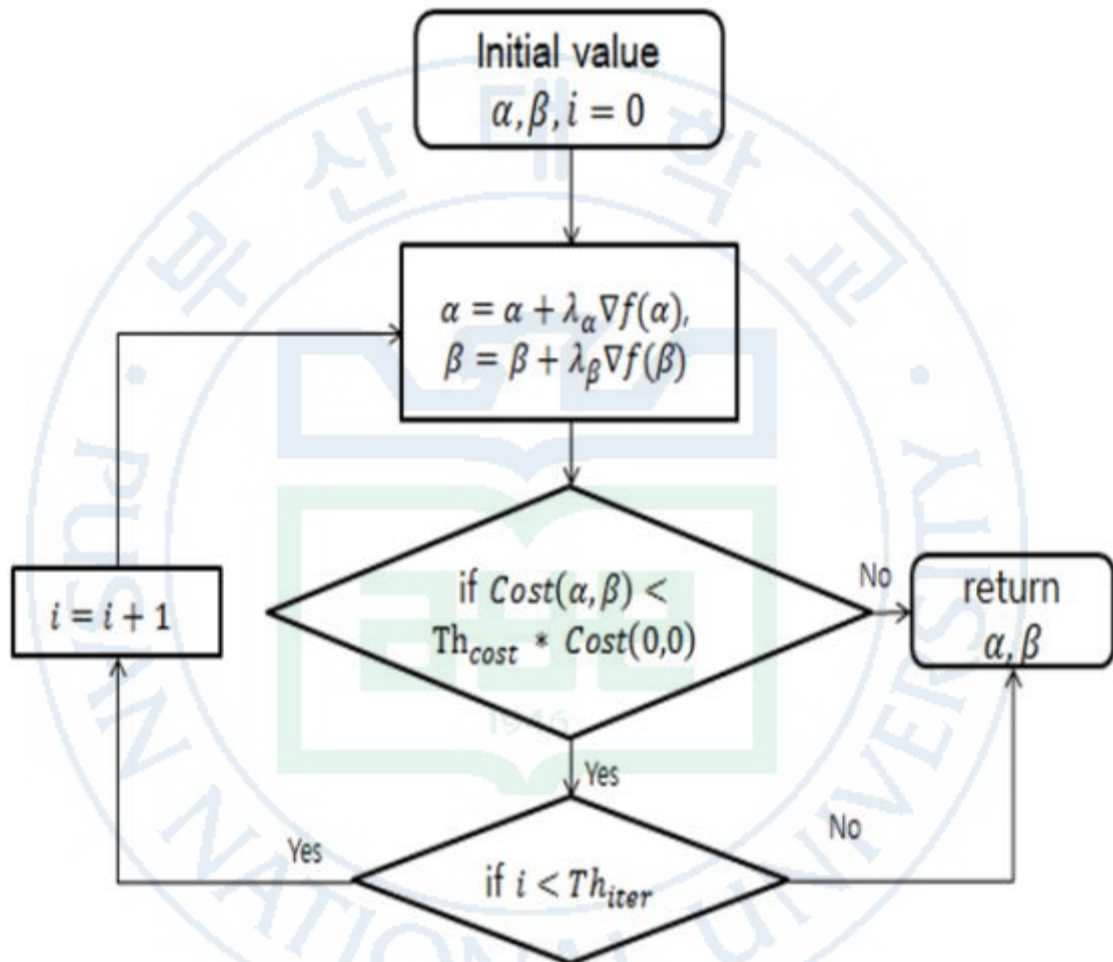


그림 13. Gradient descent 알고리즘

Fig 13. Gradient descent algorithm

경사 하강법 알고리즘의 특성 상 완벽한 최소값을 찾는 것은 거의 불가능 하고, 최소값에 가까워질수록 의미없는 반복이 많아지기 때문에 비용과 반복에 대한 임계치를 걸어두었다.

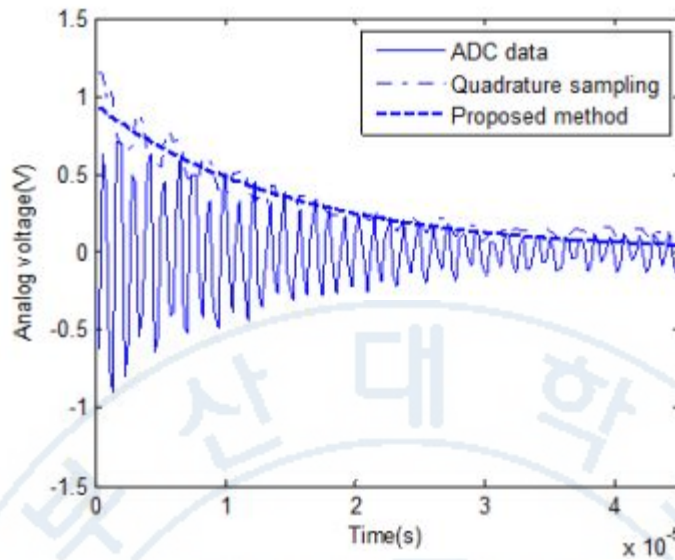


그림 14. Quadrature sampling과 Exponential modeling
결합한 결과 - 1

Fig 14. Result of Quadrature sampling and Exponential
modeling combined - 1

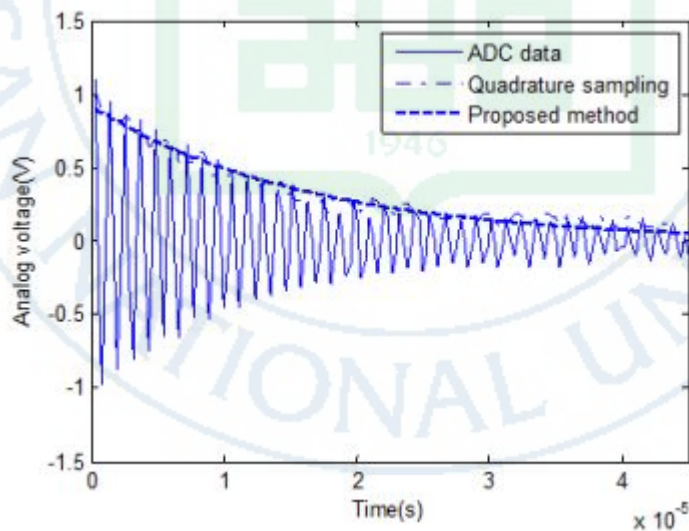


그림 15. Quadrature sampling과 Exponential modeling
결합한 결과 - 2

Fig 15. Result of Quadrature sampling and Exponential
modeling combined - 2

그림 14과 그림 15은 실제 신호에 이 방식을 적용했을 때의 결과이다. 선 신호는 수
 신된 신호를 ADC한 결과이며, 얇은 점선 신호는 Quadrature sampling을 진행했을
 때, 굵은 점선 신호는 Quadrature sampling과 Exponential modeling을 결합했을 때
 의 결과이다. 앞의 두 그림을 보면 두 방식보다 신호의 세기를 잘 추정하는 것을 볼 수
 있고, RMS 에러를 구해보면 결과가 많이 개선되었음을 알 수 있다. 세 방식에 대한
 RMS 에러는 표 3과 같다.

Method	RMSE
Argmax	0.52V
Quadrature sampling	0.43V
Quadrature sampling + Exponential modeling	0.18V

표 3. 각 방법의 RMSE
 Table 3. RMSE of each method

5. 실험환경 및 결과

5.1. 공진 주파수 측정 실험

공진 주파수를 측정하기 위한 방법은 그림 16과 같다. 우선 시스템에서 특정 주파수 f_0 를 f_{\min} 부터 출력한다. f_{\min} 은 센서 동작 주파수의 최소값이다. 신호를 20us 이상 출력한 후 TR 스위치를 RX로 바꿔 센서로부터 반사된 신호를 수신하고, 믹서를 통해 주파수를 downconversion한다. 믹서를 통과한 신호는 ADC되어 프로세서에 입력된다. 프로세서는 입력된 신호를 Quadrature sampling 및 Exponential modeling하여 신호 세기를 측정하며, 이 과정이 모두 끝나면 주파수 f_0 를 증가시켜 출력한다. 이 때 주파수 f_0 는 센서 동작 주파수의 최대값인 f_{\max} 에 도달할 때 까지 1000단계로 나누어 증가시킨다. 센서 동작 주파수를 전부 출력한 뒤에는 측정된 신호 세기를 통해 공진 주파수를 찾아낸다.

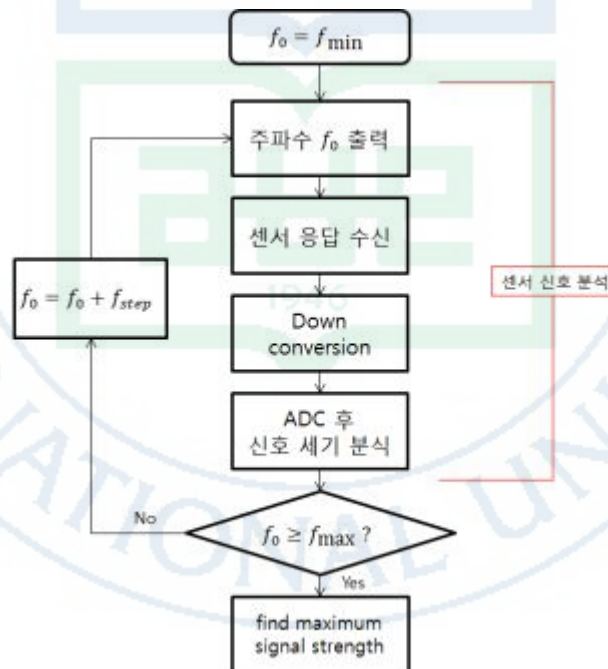


그림 16. 공진 주파수 측정 방법

Fig 16. Measuring resonant frequency

공진 주파수 측정 실험은 SENSEoR社의 TSA4261센서를 사용했으며 안테나와 센서 사이의 거리를 30cm 띄워놓고 실험을 진행하였다.

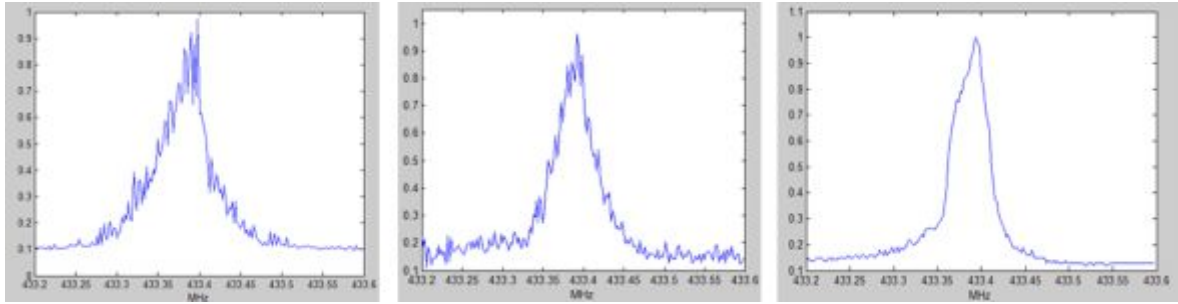


그림 17. 각 방법으로 공진주파수를 측정한 결과

Fig 17. Measured Resonant frequency by each method

실험 결과는 그림 17와 같다. 첫 번째는 ADC한 데이터의 Argmax를 통해 공진 주파수를 추정한 결과이다. 두 번째는 Quadrature sampling을 적용시킨 결과이며, 세 번째는 Quadrature sampling과 Exponential modeling을 결합했을 때의 결과이다. 위 실험들의 RMS 에러를 구해보면 표 4와 같고, 본 논문에서 제안한 방법을 사용했을 때 가장 에러가 개선되었음을 볼 수 있다.

Detect method	RMSE	
	Frequency	Temperature
Argmax	10.54kHz	4.75°C
Quadrature sampling	8.83kHz	3.98°C
Quadrature sampling+ Exponential modeling	3.18kHz	1.43°C

표 4. 각 방법을 사용해 구한 공진 주파수의 RMSE

Table 4. RMSE of measured resonant frequency by each method

5.2. 다채널 센서 실험

다채널센서로 온도측정을 하기 위한 실험 환경은 다음과 같다. 일정한 온도를 유지해 주기 위해 그림 18과 같이 Vötsch社의 VC4018 항온기를 사용했으며, 센서와 안테나의 배치는 그림 19과 같이 구성하였다.



그림 18. 항온기
Fig 18. Thermostat

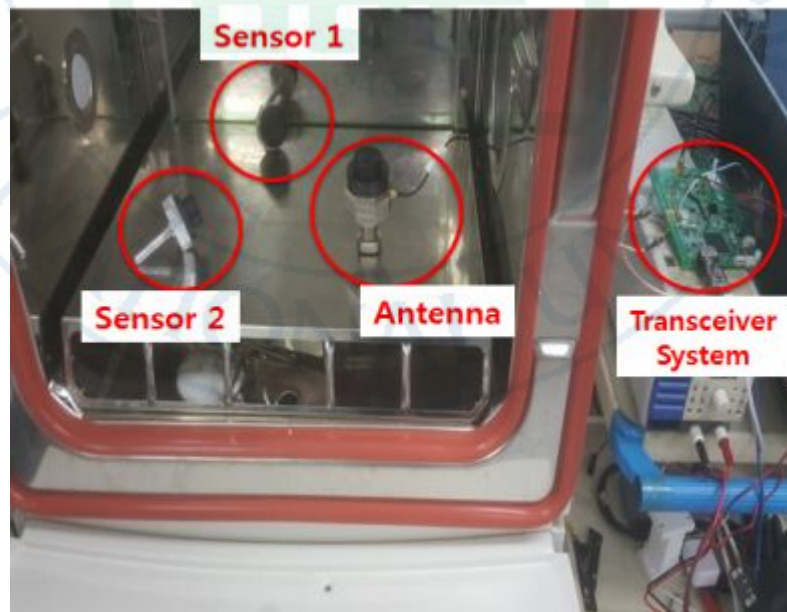


그림 19. 센서와 안테나의 배치
Fig 19. Arrangement of sensors and antenna

다채널에 이용된 센서는 1) Sengenuity社의 SM-432 와 2) Sengenuity社의 SM-431 센서이다. 측정된 온도는 20도부터 65도까지 5도 단위로 증가시키며 진행했고, 실험 결과는 그림 20, 그림 21과 같다.

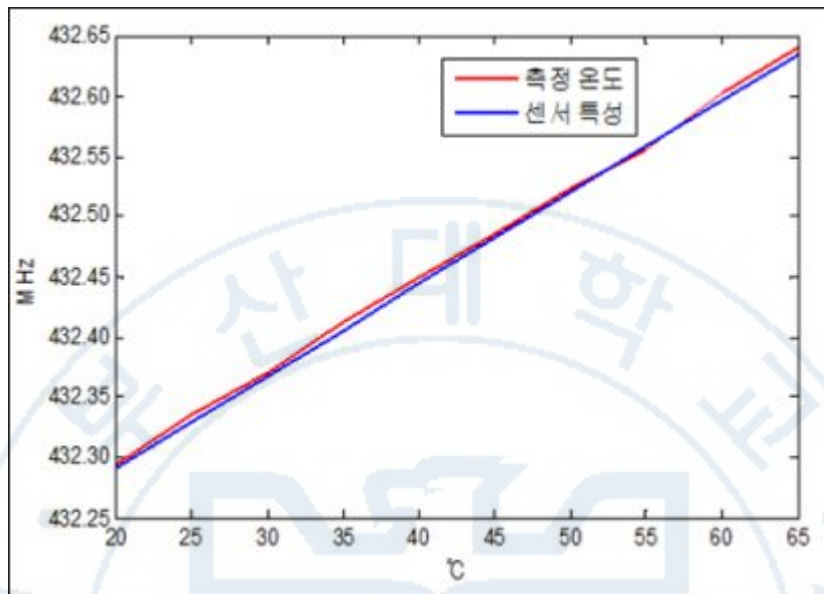


그림 20. SM-432 센서의 온도 측정 결과
Fig 20. Measured temperature using SM-432

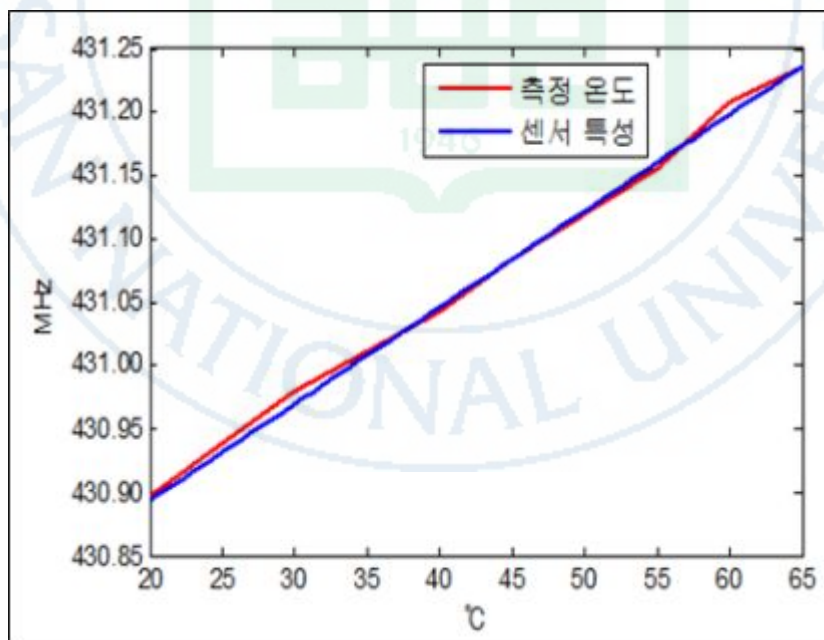


그림 21. SM-431 센서의 온도 측정 결과
Fig 21. Measured temperature using SM-431

이 실험에서 RMS 에러를 구해보면 표 5와 같이 나타나게 된다.

	RMSE
센서 1	1.12°C
센서 2	1.58°C

표 5. 각 센서로 측정한 온도의 RMSE
Table 5. RMSE of measured
temperature using each sensor



6. 결론

무선 온도 측정은 유선 온도 측정 방식에 비해 환경 제약을 적게 받는다는 장점이 있다. SAW 온도 센서는 무선동작 뿐만 아니라 무전원 동작을 하며 노화가 거의 일어나지 않아 무선 센서로써의 장점이 매우 크다. 이 때문에 SAW 센서 공정에 대한 연구가 활발히 일어나고 있는 반면에, 이를 분석하는 시스템에 대한 연구는 거의 진행되고 있지 않다.

본 논문에서는 SAW 온도 센서를 사용하기 위한 시스템을 개발하였고, SAW 온도 센서의 응답 신호를 보다 정확히 측정하기 위한 방법을 제시했다. 논문에서 제시한 방식을 사용했을 때는 제한된 샘플 속도로 신호 세기를 효율적으로 측정할 수 있다. 이 방법을 이용해 센서의 공진 주파수 측정했고, 이를 온도로 변환하는 실험을 진행하였다. 뿐만 아니라, 다채널의 SAW 온도 센서를 분석해 여러 지점의 온도를 모니터링할 수 있었다.

현재 시스템을 사용하면 온도 센서 뿐만 아니라, SAW 기술을 사용한 다른 센서(압력, 습도, 화학 등)들의 데이터도 분석할 수 있을 것이며, 종합 상태 모니터링 시스템을 구현할 수도 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] M. Tooley, Plant Process Engineering 360. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2009
- [2] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, and F. G. Bulnes, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing," *Sensors*, pp. 12305- 12348, 2014
- [3] S. Bagavathiappan, B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring—A review," *Infrared Phys. Technol.*, pp. 35-55, 2013
- [4] Hasanul Karim, "Concept and Model of a Metamaterial-Based Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications", *IEEE Sensors Journal*, pp. 1445- 1452, 2015
- [5] T. T. Thai et al., "A novel passive wireless ultrasensitive RF temperature transducer for remote sensing," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. (MTT)*, pp. 473- 476, 2010
- [6] J. Goetz, "Sensors that can take the heat, Part 1: Opening the high temperature toolbox," *Sensors* pp. 20-39, 2000
- [7] Matthias Hamsch, "An Interrogation Unit for Passive Wireless SAW Sensors Based on Fourier Transform", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, pp 1449- 1456, 2004
- [8] H. Skeie and P. A. Nysen, "Surface acoustic wave passive transponder having acoustic wave reflectors," U.S. patent 4 625 208, Nov. 25, 1986
- [9] A. Pohl, G. Ostermayer, and F. Seifert, "Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q SAW resonators," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, pp. 1161- 1168, 1998
- [10] Sergei Zhgoon, "SAW Temperature Sensor on Quartz", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, pp. 1066- 1075, 2015
- [11] 김기복, "SAW 온도센서용 음향 반사판 분석 및 무선 온도 측정", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, pp. 54- 62, 2013
- [12] X. Q. Bao, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "SAW temperature sensor and remote reading system," *IEEE Ultrasonics Symp.*, Vol. 2, pp. 583-585, 1987
- [13] L. Reindl, G. Scholl "Theory and Application of Passive SAW Radio Transponders as Sensors", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, pp 1281- 1292, 1998
- [14] Yumei Wen, Ping Li "Detecting and Evaluating the Signals of Wirelessly

Interrogational Passive SAW Resonator Sensors", IEEE Sensors Journal, pp 828- 836, 2004

[15]Surface acoustic wave devices, Wikipedia

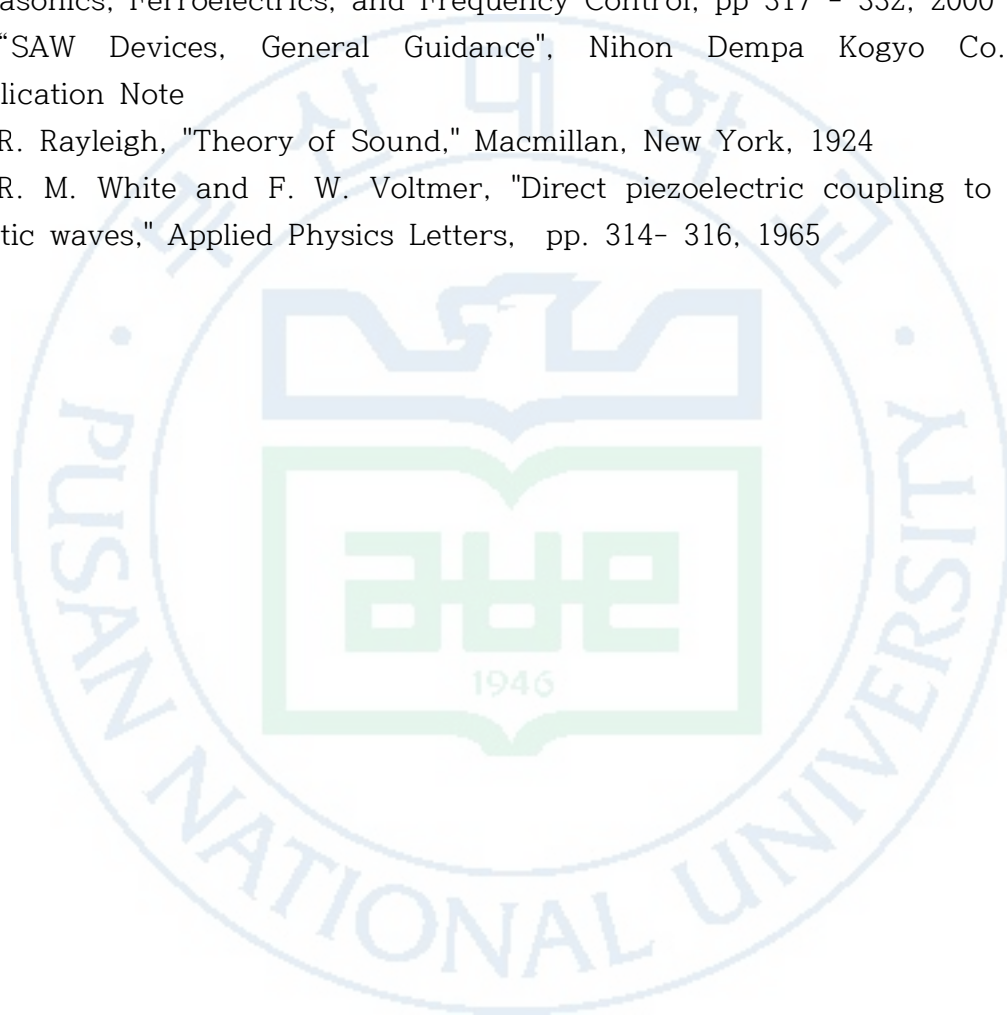
[16]M.F. Lewis, C.L. West "Recent developments in SAW devices", IEE Proceedings A- Physical Science, Measurement and Instrumentation, pp 186 - 215, 1984

[17]Alfred Pohl, "A review of wireless SAW sensors", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, pp 317 - 332, 2000

[18]"SAW Devices, General Guidance", Nihon Dempa Kogyo Co., LTD. Application Note

[19]R. Rayleigh, "Theory of Sound," Macmillan, New York, 1924

[20]R. M. White and F. W. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves," Applied Physics Letters, pp. 314- 316, 1965



Precise Temperature Measurement Method of SAW Sensor Using Quadrature Sampling and Envelope Model

Sunghoon Jung

Department of Electrical and Computer Engineering
The Graduate School
Pusan National University

Abstract

In this paper, wireless monitoring of temperature using SAW temperature sensor was designed. Further, this paper propose method of measuring sensor's accurate data. When measuring signal strength from the sensor, errors due to sample rate, phase difference, noise occurs. This paper uses Quadrature sampling to reduce errors from sample rate and phase difference. After that, combines Exponential modeling to reduce error of noise. Measuring the temperature using proposed method, RMSE of 1.12°C was possible. Furthermore, measuring multi point temperature using multi-channel sensors were possible.