

RLS 알고리즘을 이용한 원격 RF 센서 시스템의 시변 파라메타 추정

김경엽* · 유동국** · 이준탁***

* 동아대학교 전기공학과 박사과정 · ** 동아대학교 전기공학과 석사과정*** · 동아대학교 전기공학과 교수

Time-Varying Parameter Estimation of Passive Telemetry RF Sensor System Using RLS Algorithm

Kyung-yup Kim* · Dong-gook Yu** · Joon-tark Lee***

Department of Electrical Engineering Dong-A University

요약 - 본 연구에서는 *RLS(Recursive Least Square)* 알고리즘을 이용하여 정전용량형 습도센서를 사용한 원격 RF 센서 시스템의 시변 파라메타를 추정하고자 한다. IC 칩 형태의 원격 RF 센서 시스템이 가지는 구성의 복잡성 그리고 전력소모 문제를 해결하기 위해 보다 간단한 유도결합모델이 제안된다. 모델기반의 *RLS* 알고리즘을 수학적 모델로 유도된 시스템에 적용시키기 위해 페이저법을 이용하여 모델의 파라메타를 재배열한다. 오차 제곱합의 수렴특성을 가진 *RLS* 알고리즘을 이용하여 시변 파라메타를 추정하며, 잡음을 내포한 측정 데이터에 대한 추정 성능을 확인함으로써 그 유효성을 검증하고자 한다.

Abstract - In this paper, time-varying parameter of passive telemetry RF sensor system is estimated using *RLS(Recursive Least Square)* algorithm. In order to overcome the problems such as power limits and complication that general RF sensor system including IC chip has, the principle of inductive coupling is applied to model sensor system. The model parameter is rearranged for applying *RLS* algorithm based on mathematical model to the derived model using inductive coupling principle. Time variant parameter of rearranged model is estimated using forgetting factor, and in case measured data is contaminated by noise and modelling error, the performance of *RLS* algorithm characterized by the convergence of squared error sum is verified by simulation.

키워드 - Passive Telemetry RF Sensor System, Inductive Coupling, Phasor Method, Recursive Least Square Estimation, Capacitive Humidity Sensor

1. 서 론

일반적으로 센서는 여러 종류의 물리량을 검지, 검출하거나 판별, 계측하는 소자로서 다양한 플랜트 내에서 인간의 오감의 역할을 하며 정보처리시스템의 판단을 위한 자료들을 제공하고 있다[1]. 이러한 센서는 에너지절약, 자원 절약, 생산부문의 고효율화, 각종 기기의 고성능화, 교통통제의 고도화, 재해 방재 시스템의 효율화 등 사회 각 부문의 요구를 충족시키기 위해 다양한 종류의 개발 및 기능개선을 이루어왔다.

최근 *RFID* 기술의 발전과 더불어 유비쿼터스 서비스의 하드웨어적 기반으로 *RFID* 기반의 센서(이하 *RF*센서) 기술이 부각되고 있다. 이는 미국, 일본, 한국에서 *RFID* 기술과 관련된 특허출원의 약 50% 이상이 센서분야에서 이루어지는 것을 통해 알 수 있다[2]. 기존의 센서와는 달리 *RF* 센

서는 탑재된 칩을 이용하여 수집된 정보를 처리할 수 있으며 이를 구동하기 위한 별도의 구동전력을 센서 내에 구비할 필요가 없는 장점이 있다.

현재 *RF* 센서는 측정된 데이터를 판독하는 방식을 기준으로 3가지 정도로 분류될 수 있는데, 첫째는 공진주파수를 이용하는 방식이며, 둘째는 임피던스 위상을 이용하는 방식 그리고 셋째는 집적회로(IC)를 이용하는 방식이 있다[3][4]. 첫째와 둘째 방식은 정해진 입력주파수 범위내 대해 공진주파수와 위상의 변화를 측정하여 센서 측의 파라메타를 추정하는 것으로 비교적 간단한 구조를 가지고 근거리 측정에 적합하며 IC 방식에 비해 적은 전력소모를 가진다[5]. 셋째 방식은 센서 측에 IC 칩을 내장하여 AD 컨버터를 통해 수집된 데이터를 자체 모뎀을 사용하여 판독기에 전송하는 것으로 앞의 두 방식에 비해 복잡한 센서 구조를 가지며 다른 방식에 비해 전력을 많이 소모하나, 비교적 원거리 전송이 가능하며 현재 가장 광범위하게 사용되고 있는 형태이다[5].

최근 *RF* 센서는 군사 분야, 보안 분야, 건물 관리 분야 및 의료 분야에서 폭넓게 활용되고 있다[6]. 특히 뼈성장 감시, 혈압 감시, 안압 감시와 같은 목적으로 의료 분야에서 활발히 개발되고 있다. 의료 목적의 센서 시스템은 인체에 이식되는 특성상 그 크기와 출력에 제한을 받는다. 미국국립표준연구소에서는 인체에 이식되는 전자 시스템의 *RF* 출력을 $10[mW/cm^2]$ 로 제한하고 있다[7].

본 연구에서는 비교적 근거리에서 사용될 수 있고, 전력을 적게 소모하며, 잡음환경에서도 정밀하게 측정할 수 있는 *RF* 센서 시스템을 제안하고자 한다. 이를 위해 간단한 구조와 적은 전력 소모량의 특징을 가지는 공진 주파수 모델 및 임피던스 위상 모델에서 사용되는 유도결합원리를 이용한 모델을 채택할 것이며, 잡음 환경에 노출된 관측 데이터를 비교적 정확히 추정하기 위해 오차제곱합의 수렴특성을 지닌 *Recursive Least Square (RLS)* 알고리즘을 적용할 것이다. 또한 손쉽게 구할 수 있는 정전용량형 습도센서를 사용하여 시스템의 활용도를 높이며, 시간에 따라 변화하는 정전용량값을 망각율을 이용한 *RLS* 알고리즘을 사용하여 추정함으로써 그 효용성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 정전용량형 습도센서

일반적으로 폴리이미드(polyimide)는 유전체 물질로서 수분량의 증감에 따라 유전율이 선형적으로 변화하는 특성을 가지므로 정전용량형 습도센서의 재료로 사용되어진다[8]. 본 연구에서는 정전용량형 습도센서로 *Humirel*사의 *HS1100*을 채택하였으며, 이 센서의 정전용량공식은 식 (1)과 같다[9].

$$C = C@55RH \times (1.25 \times 10^{-7} \times RH^3 - 1.36 \times 10^{-5} \times RH^2 + 2.19 \times 10^{-3} \times RH + 9 \times 10^{-1}) [pF] \quad (1)$$

여기서, RH 는 상대습도[%RH]를, $C@55\%RH$ 은 상대습도 55[%RH]에서의 공칭 정전용량($= 180[pF]$)을 나타낸다.

또한 센서의 온도계수가 $0.04[pF/\%RH]$ 이므로 상온 $25[^\circ C]$ 에서 상대습도에 대한 정전용량의 응답특성은 식 (1)의 정전용량 값에 $1[pF]$ 을 더하여 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

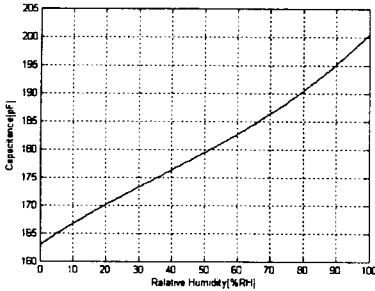


그림 1. HS1100의 응답곡선 ($T_a=25^\circ C$)
Fig. 1 Typical Response Curve of HS1100 in Humidity

2.2 제안된 원격 RF 센서 시스템 모델

보편적인 원격 RF 센서 시스템은 IC 칩을 내장한 형태로 그림 2와 같이 데이터 수집 및 처리부 그리고 통신부로 구성되어 있다[5].

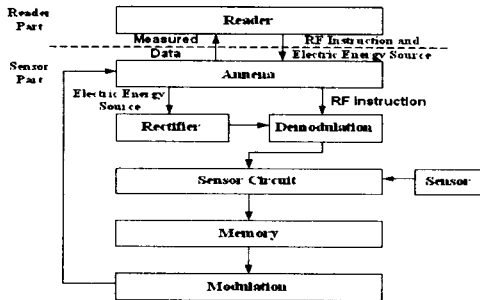


그림 2. 기존의 원격 RF 센서 시스템의 블록도
Fig. 2 Block Diagram of Traditional RF Sensor System

본 연구에서는 보다 간단한 회로를 구성하고 저 전력 소모특성을 가지는 센서 시스템을 구현하기 위해 그림 3과 같은 유도결합원리를 이용한 모델을 제안하여 시스템을 구성하였다.

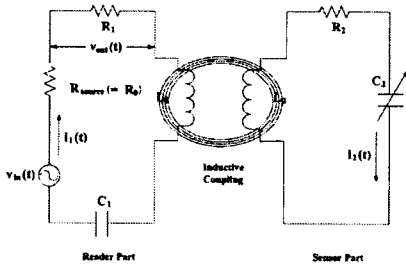


그림 3. 유도결합원리에 따른 원격 RF 센서 시스템
Fig. 3 Passive Telemetry RF Sensor System Based on Inductive Coupling Principle

제안된 모델은 크게 데이터를 처리하는 Reader부와 대상체에 이식되어 데이터를 수집하는 Sensor부로 나눌 수 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 Sensor부는 R, L 그리고 C 로만

이루어져 있어 그 구성이 간단하여 소형제작이 가능하고, 수동소자로만 이루어져 있어 전력을 적게 소모한다. 또한 Sensor부에서 측정된 정전용량 C_2 를 그림 4와 같이 시스템 임피던스의 크기나 위상을 최소화 나타내는 주파수를 읽어 내어 추정할 수도 있다[3][4].

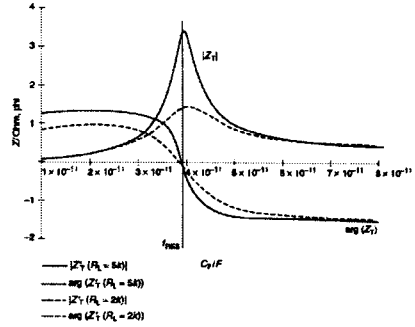


그림 4. (a) 공진주파수를 이용하는 방식
Fig. 4 (a) Data Estimation using resonance Frequency

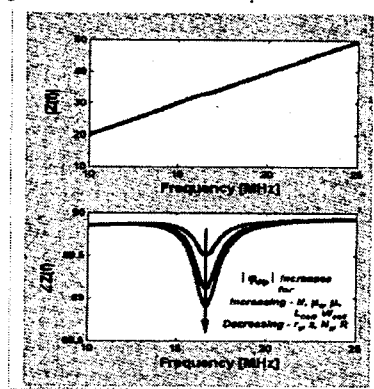


그림 4. (b) 임피던스 위상을 이용하는 방식
Fig. 4 (b) Data Estimation using the Phase of System Impedance

뿐만 아니라, 그림 3에서 제시된 모델에서는 Sensor부의 정전용량 C_2 에 따라 Reader부의 전류 i_1 및 v_{out} 이 가변되는 특징이 있는데, 이를 이용한 새로운 추정모델이 제안될 수 있다.

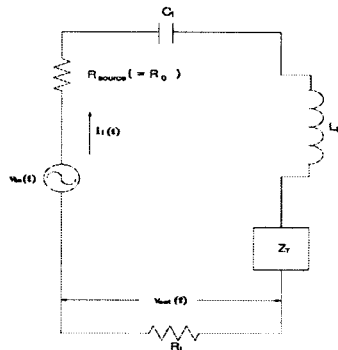


그림 5. 제안된 원격 RF 센서 시스템의 동가회로
Fig. 5 Equivalent Circuit of Proposed RF Sensor System

새로운 추정모델은 그림 5와 같이 유도결합회로의 반사 임피던스 Z_T 를 이용해서 얻어진 등가회로를 수학적으로 모델링함으로써 식 (2) ~ 식 (5)와 같이 유도될 수 있다. 입력 전압 $v_{in}(t)$ 을 $\sqrt{2} V_{rms} \sin(\omega t)$ 일 때, Sensor부의 회로를 1차 축으로 등가하면서 얻게 된 반사임피던스 \dot{Z}_T 는 식 (2)와 같다.

$$\dot{Z}_T = \frac{(\omega M)^2}{R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} [\Omega] \quad (2)$$

여기서, ω 는 입력 주파수[rad/sec]이고, M 은 상호결합계수 [M]이다. 반사 임피던스 \dot{Z}_T 를 포함한 등가회로 전체의 임피던스는

$$Z_{Total} = R_0 + R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \dot{Z}_T \quad (3)$$

이다. 전체 임피던스 Z_{Total} 와 입력 전압 $v_{in}(t)$ 을 이용하여 얻을 수 있는 전류 $i_1(t)$ 를 페이지로 표현하기 위해 시간함수인 입력 전압 $v_{in}(t)$ 를 페이지로 표현하면 $\dot{V}_{in} = V_{rms} \angle 0$ [rad]와 같으므로, 등가회로에 흐르는 전류 \dot{i}_1 는

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{V}_{in}}{Z_{Total}} = \frac{V_{rms}}{R_0 + R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \dot{Z}_T} [A] \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 따라서, 그림 5의 등가회로에서 R_1 양단의 전압강하 $v_{out}(t)$ 을 페이지로 표현한 \dot{V}_{out} 은 식 (5)와 같이 유도될 수 있다.

$$\dot{V}_{out} = \frac{V_{rms} \cdot R_1}{R_0 + R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \dot{Z}_T} [V] \quad (5)$$

페이지 형태로 얻어진 R_1 양단의 전압강하 \dot{V}_{out} 은 실수부와 허수부로 나누기 위해 식 (6) ~ 식 (8)로 재배열된다.

$$\frac{1}{\dot{V}_{out}} = \frac{R_0 + R_1 + j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + j(\omega L_2 - 1/\omega C_2)}}{V_{rms} R_1} \quad (6)$$

$$\frac{V_{rms} R_1}{\dot{V}_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) = \frac{(\omega M)^2}{R_2 + j(\omega L_2 - 1/\omega C_2)} \quad (7)$$

$$\left(\frac{V_{rms} R_1}{\dot{V}_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) \right)^{-1} = \frac{R_2 + j(\omega L_2 - 1/\omega C_2)}{(\omega M)^2} \quad (8)$$

$$= \frac{R_2}{(\omega M)^2} + j \left(\frac{L_2}{(\omega M)^2} - \frac{1}{\omega^3 C_2 M^2} \right) \quad (8)$$

식 (8)의 좌·우변은 실수부와 허수부로 분리될 수 있으며, 아래와 같은 두 개의 방정식 (9)와 식 (10)으로 정리된다.

$$\text{Re} \left(\left(\frac{V_{rms} R_1}{\dot{V}_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) \right)^{-1} \right) = \frac{R_2}{(\omega M)^2} \quad (9)$$

$$\text{Im} \left(\left(\frac{V_{rms} R_1}{\dot{V}_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) \right)^{-1} \right) = \frac{L_2}{(\omega M)^2} - \frac{1}{\omega^3 C_2 M^2} \quad (10)$$

그림 5로부터 새롭게 얻어낸 추정모델인 식 (9)와 식 (10)은 미지의 두 파라메타 C_2 와 M 을 추정하기 위해 모델기반의 추정알고리즘 RLS 알고리즘을 적용하고자 식 (11)과 같이 설계행렬(Design Matrix) A 및 회귀계수 X 그리고 측정 출력변수 Z 로 재배열될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

혹은, $Z = AX$ (11)

이다. 여기서, 모델의 각 파라메타에 대한 정의는 표 1과 같다.

표 1. 설계행렬 A , 회귀계수 X 및 출력변수 Z
Table. 1 Design Matrix A , Regressive Coefficient X and Output Z

z_1	$\text{Re} \left(\left(\frac{V_{rms} R_1}{\dot{V}_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) \right)^{-1} \right)$		
z_2	$\text{Im} \left(\left(\frac{V_{rms} R_1}{\dot{V}_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) \right)^{-1} \right)$		
x_1	$1/M^2$	x_2	$1/C_2 M^2$
a_{11}	R_2/ω^2	a_{12}	0
a_{21}	L_2/ω	a_{22}	$-1/\omega^3$

2.3 RLS 알고리즘을 이용한 파라메타 추정

그림 5의 등가회로로부터 유도된 새로운 모델 식 (11)에서 미지의 회귀계수 X 는 RLS 알고리즘을 이용하여 추정될 수 있다[10]. 측정된 N 개의 입출력 데이터쌍 $\{A(k); Z(k), k=1,2,\dots,N\}$ 을 만족하는 회귀계수 X 는 식 (12) ~ 식 (14)으로 표현되는 RLS 알고리즘에 의해 추정되어진다.

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k-1) + K(k)(Z(k) - A(k)\hat{X}(k-1)) \quad (12)$$

$$K(k) = P(k)A^T(k) \quad (13)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} (P(k-1) - P(k-1)A^T(k)\lambda F + A(k)P(k-1)A^T(k))^{-1} A(k)P(k) \quad (14)$$

여기서, $\hat{X} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2]^T$ 이고, $\hat{Z} = [\hat{z}_1 \ \hat{z}_2]^T$ 이며, λ 는 망각율을 나타낸다. 식 (12)에 따르면 추정된 회귀계수 \hat{X} 는 매 샘플마다 측정된 입출력 데이터 쌍을 이용하여 주기적으로 업데이트된다. 이는 그림 6과 같이 도식적으로 표현가능하다.

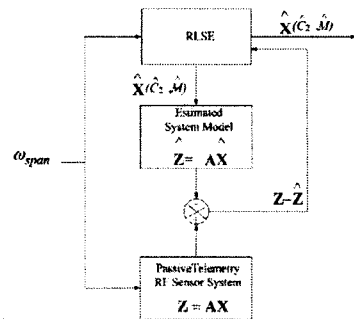


그림 6. RLS알고리즘의 블럭도

Fig. 6 Block diagram of RLS Algorithm

여기서, ω_{span} 은 시스템에 입력되는 각속도의 범위를 나타내며, k 번째 데이터 쌍에 사용되는 설계행렬 $A(k) = [a_{11} \ a_{12}; a_{21} \ a_{22}]$ 의 각 요소 값을 결정하는 인자로 사용된다.

2.4 시뮬레이션

본 장에서는 그림 5로부터 얻어진 새로운 시스템 모델인 식 (11)의 회귀계수 X 를 RLS 알고리즘을 나타내는 식 (12) ~ 식 (14)을 사용하여 추정하고자 한다. 먼저, 파라메타 C_2 값을 시뮬변으로 설정하여 제안된 원격 RF 센서 시스템의 추정 성능을 확인하고 이후에 파라메타 C_2 값을 시변으로 설정하여 실제와 유사한 환경에서의 추정 성능을 확인하고자 한다. 이를 위해 원격 RF 센서 시스템의 파라메타를 표 2와 같이 설정하였다.

표 2. 원격 RF 센서 시스템의 파라메타

Table 2 Parameters of Passive Telemetry RF Sensor System

Parameter	Value	Parameter	Value
L_1	100[mH]	Initial value of C_2	300[pF]
C_1	1[pF]	Initial value of M	3[μF]
L_2	555.6[mH]	R_0	5[Ω]
C_2	180[pF]	ω_{span}	155[kHz] ~ 160[kHz]
	190[pF]		151[kHz] ~ 160[kHz]
	200[pF]		147[kHz] ~ 160[kHz]
R_1	10[Ω]	R_2	200[Ω]
Number of Data Pairs (N)	53	Noise (SNR)	27[dB]

2.4.1 시불변 파라메타 C_2 추정

표 2와 같이 설정된 시스템 모델 식 (11)에서 추정해야 할 회귀계수 x 를 구성하는 파라메타 C_2 와 M 이 시 불변일 경우, 망각율 $\lambda=1$ 로 설정하여 추정한 결과는 그림 7과 같다.

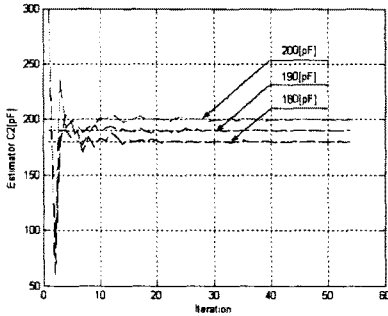


그림 7. 정전용량 파라메타 C_2 추정의 수렴패턴
Fig. 7 Convergence Patterns of C_2

C_2 가 180[pF], 190[pF] 및 200[pF]일 때, 제한한 원격 RF 센서 시스템은 RLS 알고리즘으로 각각의 C_2 에 대해 0.0742[%], -0.0808[%] 및 0.1536[%]와 같은 퍼센트 오차를 가지며 추정을 완료하였으며, 그림 8에서 볼 수 있듯이 총 53개의 데이터 쌍 중에서 30번째 데이터 쌍에서 ± 0.5 [%] 이내 (-2.9 [%RH] \leq 습도오차 ≤ 2.9 [%RH])의 퍼센트 오차로 추정하였다.

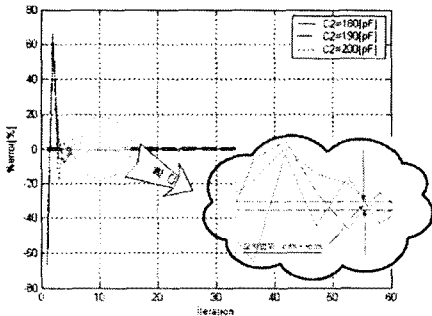


그림 8. 정전용량 C_2 추정오차의 수렴패턴
Fig. 8 Convergence Patterns of C_2 Estimation Error

여기서, 출력변수 Z 는 측정 가능한 V_{out} 을 포함하는 요소로 SNR이 27[dB]이며, 입력주파수의 변이에 따라 그림 9와

같은 크기와 위상을 나타낸다.

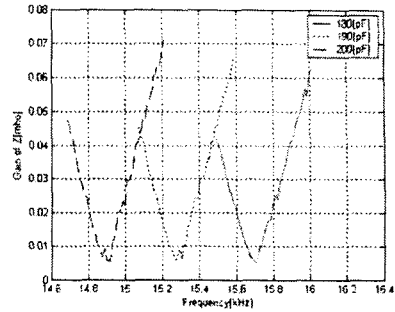


그림 9. (a) 측정 가능한 출력변수 Z 의 크기곡선
Fig. 9(a) Gain Curve of Measurable Output Z

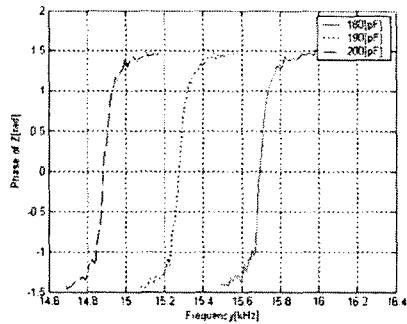


그림 9. (b) 측정 가능한 출력변수 Z 의 위상곡선
Fig. 9 (b) Phase Curve of Measurable Output Z

2.4.2 시변 파라메타 C_2 추정

지금까지 추정 목표치는 시불변 요소로서 추정 과정동안 일정한 값으로 유지되었으나, 실제 환경에서는 그림 10(a)와 같이 추정 중에도 지속적으로 그 값이 변화하므로 이를 고려한 추정기법이 요구된다.

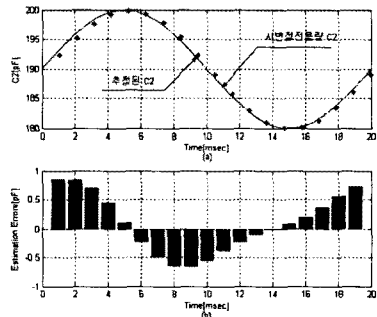


그림 10. (a) 50[Hz]의 주파수를 가지는 시변파라메타 C_2 와 추정 (b) 시변파라메타 C_2 의 추정오차
Fig. 10 (a) Estimation for Time Varying Parameter C_2 with 50[Hz] (b) Estimation Errors of Time Varying Parameter C_2

시변 파라메타 추정을 위해서는 시간 흐름 순서에 따라 가중치를 달리 부여하여 최근의 데이터에 높은 비중을 두어 추정하는 방식을 사용한다. 이때 시계열 데이터에 부여

되는 가중치를 망각율(forgetting factor)이라고 부른다[10]. *RLS* 알고리즘을 표현한 식 (12) ~ 식 (14)는 이러한 망각율을 고려한 수식으로서 그림 10과 같이 *Sensor*부의 정전용량 C_2 가 시간에 따라 정현파의 형태로 변할 경우 망각율을 적이하게 설정하여 회귀계수 X 를 추정하게 된다. 이때 오차는 평균 $\pm 0.7[\mu]$ 이내에서 수렴하며, 망각율은 0.6이다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존의 *IC* 칩 내장 형태의 원격 *RF* 센서 시스템이 가지는 구조의 복잡성 및 전력소모를 해결하기 위해 유도결합원리를 이용한 새로운 시스템 모델을 제안하였다. *Sensor*부를 구성하는 소자가 오직 *R,L* 그리고 *C*이므로 구조의 단순성 및 저 전력소모를 실현할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 페이지법을 이용하여 수학 모델을 유도하였으며, 모델기반의 *RLS* 알고리즘을 적용하여 미지의 파라메타 C_2 를 *SNR*이 27[dB]인 출력 변수 Z 를 포함하는 입출력 데이터 쌍 53개중 30번째에서 오차범위 $\pm 0.5[\%]$ 이내 ($-2.9[\%RH] \leq$ 습도오차 $\leq 2.9[\%RH]$)의 퍼센트 오차로 추정하였다. C_2 가 50[Hz]의 주파수로 시변할 경우 망각율을 0.6으로 설정하여 평균 $\pm 0.7[\%]$ 이내($-2.0[\%RH] \leq$ 습도오차 $\leq 2.0[\%RH]$)의 오차를 가지고 추정하였다. 이러한 결과는 본 연구에서 제안한 원격 *RF* 센서 시스템이 습도추정을 위해 잡음환경에서 충분히 정밀하며, 저비용, 고효율을 이룰 수 있음을 확인해 준다. 추후 비선형 *RF* 시스템에 적절하며 잡음환경에 보다 강인한 추정 알고리즘을 개발해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2006학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 천재영, 조평동, "실리콘기반 압력센서기술동향", ITFIND 주간기술동향, 1225권호, 2005
- [2] 조재신, "RFID 지식재산권 동향과 대응방안", 특허청, 2005
- [3] O.Akar, T.Akin, K.Najafi, "A Wireless batch sealed absolute Capacitive Pressure Sensor", *Sensor and Actuators, A* 95 (2001) 29~38
- [4] T.J.Hapster, B.Stark, K.Najafi, "A Passive Wireless Integrated Humidity Sensor", *The 14th IEEE International Conference on MEMS*, pp.553~557,2001
- [5] T.Varpula, and O.Jaakkola, "Low Cost Wireless RF Sensors", *Automation Technology Review*, pp.12~17, 2001
- [6] www.microstrain.com
- [7] American National Standards Institute, Safety Level of Electromagnetic Radiation with respect to Personnel, ANSI C95.1-1974, IEEE, NewYork, NY, 1974
- [8] T.Suzuki, "Performance of Polyimide-Based Humidity Sensor", *Microelectronic Engineering Research Conference*, 2001
- [9] HUMIREL, HS1100/HS1101 Technical Data, HPC001 Rev.7 June 2002
- [10] J.R.Jang, C.Sun, E.Mizuani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc. pp.95-117, 1997