

소비 전력 모델링에 입각한 휴대용 온습도 측정기의 저전력 설계 및 구현

이철호¹, 홍윤식^{1*}

¹인천대학교 정보기술대학 컴퓨터공학과

A Low-Power Design and Implementation of the Portable Device for Measuring Temperature and Humidity Based On Power Consumption Modeling

Chul-Ho Lee¹ and Youn-Sik Hong^{1*}

¹Dept. of Comp. Science and Eng., Incheon National University

요 약 휴대용 기기에서 가장 중요한 설계 요소는 소비 전력이다. 본 논문에서는 휴대용 온습도 측정기 설계 초기에 전력 소비 모델을 제시하고, 제시된 모델에 입각해 휴대용 온습도 측정기의 소비 전력을 설계한다. 이렇게 설계된 휴대용 온습도 측정기의 소비 전력을 사전 검증함으로써 제품 구현 전에 설계 검증을 완료하기 위한 전력 소비 설계 모델링 방안을 제시하고자 한다. 한편, 대기 모드에서 소비 전류를 효과적으로 감소시키기 위한 전력 소비 설계 개선 방안도 제시한다. 휴대용 온습도 측정기 구현을 통해 전력 소비 모델링에 입각한 설계 방법론의 타당성을 확인할 것이다.

Abstract The most important design factor for portable devices is power consumption. In this paper, in the early design stage of a mobile device which measures temperature and humidity a power consumption model will be proposed and then the overall power consumption will be estimated based on this model. We will verify previously the correctness of such estimated power consumption before implementation of the real device. That is our proposed design methodology based on power consumption model. An improved design method for efficiently reducing the current consumption in the idle mode is also presented. By implementing a real prototype of the mobile device for measuring temperature and humidity, the correctness of our proposed design methodology based on power consumption modeling will be verified.

Key Words : Humidity, Low-power consumption, Portable device, Power consumption modeling, Temperature.

1. 서론

최근 센서 분야의 연구동향은 아날로그 방식 센서에서 USN이나 사물통신환경(Internet of Things)에서 사용가능한 지능형 디지털 센서로 전환되는 추세이다. 즉 센서의 고유 기능인 계측 기능 외에 내부 연산 처리와 무선 전송 기능이 함께 내장된 스마트 센서 노드에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 스마트 센서 노드 설계 과정에

서 이동성 및 소형화는 최우선 고려 사항이다. 특히 휴대용 기기는 배터리를 전원으로 사용하기 때문에, 저전력 소모는 이러한 센서 설계에 있어서 필수적이다.

본 논문에서는 배터리를 전원으로 사용하는 휴대용 기기의 저전력 설계를 위해 소비 전력 모델링에 입각한 설계 방안을 제안하고자 한다. 즉, S/W 시뮬레이션이 아닌 소비 전력 모델링 및 이러한 모델링에 입각한 소비 전력 예측을 통해 저전력 설계를 사전 검증할 것이다. 제안한

본 논문은 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(2013년)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Youn-Sik Hong(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-8495 email: yshong@incheon.ac.kr

Received December 5, 2013

Revised (1st January 13, 2014, 2nd February 4, 2014)

Accepted February 5, 2014

설계 방안의 타당성 평가는 이를 직접 구현한 시제품의 실측을 통해 실제 소비 전력이 설계 범위 이내인지를 확인할 것이다.

이를 위해 본 논문에서는 디지털 출력을 갖는 온습도 센서를 이용하여 보다 적은 소비 전력으로 동작할 수 있는 휴대용 온습도 측정기를 설계해 보고자 한다. 즉, 휴대용 온습도 측정기에 대한 소비 전력 설계 모델을 제시하고, 설계 및 구현을 통해 제시한 소비 전력 모델링을 검증할 것이다.

공급 전원 전압에 따른 비교 분석과 측정(Active) 모드와 대기(Idle) 모드에 따른 설계 방법 및 각 모드에서의 소비 전력 모델링 연구를 진행할 것이다.

한편, 휴대용 온습도 측정기에서는 측정된 데이터를 일정 기간 보관하는 기능이 필수적이다. 측정된 데이터를 보관하기 위한 내장 메모리의 소비 전력도 저전력 설계에서 중요한 비중을 차지하므로, 대표적인 내장 메모리인 SD 카드와 플래시 메모리 각각에 대한 소비 전력 비교 설계도 행해질 것이다. 즉 내장 메모리 장치의 소비 전력에 대한 모델링 및 모델링의 타당성 여부를 검증할 것이다.

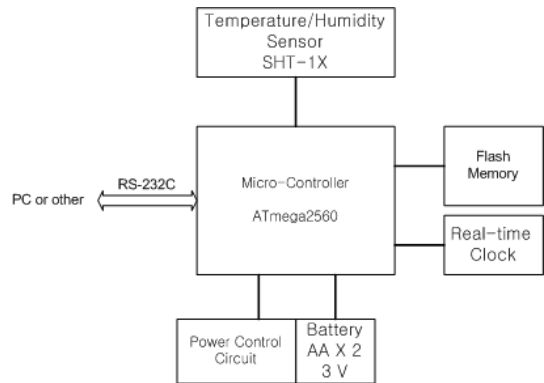
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 휴대용 기기의 소비 전력 설계 모델링을 제시하고, 3장에서는 설계 모델링 방법에 입각해 휴대용 온습도 측정기를 설계한다. 이어서 4장에서는 3장에서 설계한 휴대용 온습도 측정기를 구현하고, 실제 측정된 소비 전력을 토대로 설계 모델링 방안에 대한 평가 결과를 제시한다. 5장에서 결론을 맺고자 한다.

2. 휴대용 기기의 소비 전력 모델링

2.1 휴대용 기기 구성과 소비 전력 분석

휴대용 온습도 측정기는 Fig. 1에 보인 것 같이 SHT-15 디지털 온습도 측정 센서, 마이크로 컨트롤러(MCU), Real-time Clock(RTC), 측정 데이터를 저장하기 위한 플래시 메모리(Flash Memory) 및 전원 회로와 배터리로 구성되어 있다. 휴대용 온습도 측정기의 전체적인 제어를 위한 MCU로는 ATmega 2560을 사용한다.

MCU는 온습도 센서로부터 측정 데이터를 읽어 와 플래시 메모리에 데이터를 저장한다. 이때, RTC에서 제공하는 시간 정보도 함께 저장한다. 전력 제어(Power Control) 회로는 배터리 전원이 휴대용 기기에서 사용 가능한 전원 전압이 제공될 수 있도록 제어한다.



[Fig. 1] The block diagram of the proposed mobile device for measuring temperature and humidity

기기 전체의 제어를 맡고 있는 MCU는 측정 모드와 대기 모드 등 2가지 모드로 동작하도록 설계한다. 측정 모드에서는 대기 모드에 비해 더 많은 순간 소비 전력으로 실제 회로를 구동시켜 온습도를 측정하고 데이터를 저장하는 등의 동작을 하게 된다. 대기 모드에서는 기기의 전력 소비를 최소화한 상태에서 측정 모드로 작동할 때까지 일정시간 동안 기다리게 된다.

온습도 측정기에서 소비되는 전력 대부분은 MCU, 디지털 온습도 센서(SHT-15), RTC 및 측정 데이터를 저장하는 플래시 메모리에서 발생한다. 따라서 휴대용 기기의 소비 전력 설계에서 고려해야 할 점은 이들 핵심 부품들의 동작 시간에 따른 소비 전력이다.

그러나 각 부품별로 측정 모드와 대기 모드에서의 실제 동작 시간을 알아낸다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 측정 모드와 대기 모드에서는 모든 핵심 부품들의 동작 시간이나 대기 시간이 같은 것으로 가정한다. 이러한 가정 하에서 2.2절에의 소비 전력 설계 모델링을 하였다.

한편, 휴대용 기기와 고정 장치(PC)와의 연결시 데이터 전송 과정에서 발생하는 소비 전력과 전원 제어 회로에서 발생하는 소비 전력은 고려하지 않았다. 고정 장치와의 데이터 전송은 상시 소비 전력과 무관하며, 전원 회로의 소비 전력은 핵심 부품의 소비 전력과 비교할 때 그 비중이 낮기 때문이다.

2.2 소비 전력 설계 모델링

전력 P와 전력량 W는 아래 수식에 나타낸 것처럼 소비 전류 I와 전원 전압 V에 비례한다. 전력량 W는 전력 P에 작동 시간 t를 곱한 것이다.

$$P = V \times I$$

$$W = P \times t = V \times I \times t$$

본 논문에서는 휴대용 기기에 대한 소비 전력을 다루고 있으므로, 휴대용 기기에 주로 사용되는 배터리 전력량 표기를 사용한다. 배터리 전력량 용량은 소비 전류 I의 단위인 mA와 작동 시간 단위인 h(시간)를 기준으로 mAh(또는 mWh)로 표기한다.

MCU, 플래시 메모리, 온습도 센서, RTC 등 핵심 부품을 각각 mcu, flash, sensor, clock으로 표기하기로 한다. V_{xxx}는 부품 xxx의 전압을 가리킨다. 예를 들면 V_{mcu}는 MCU의 전압이다. 또한, I_{active_XXX}와 I_{idle_XXX}는 부품 xxx의 측정(active) 모드에서의 소비 전류 및 대기(idle) 모드에서의 소비 전류이다. 예를 들면, I_{active_clock}과 I_{idle_clock}은 부품 RTC의 측정 모드에서의 소비 전류 및 대기 모드에서의 소비 전류를 가리킨다. 마찬가지로 표기법에 의해, T_{active_XXX}와 T_{idle_XXX}은 부품 xxx의 측정 모드에서의 동작 시간 및 대기 모드에서의 동작 시간이다.

전체 소비 전력 P_{1_total}, 측정 모드에서의 소비 전력 P_{1_active} 및 대기 모드에서의 소비 전력 P_{1_idle}은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P1_total &= P1_active + P1_idle \\
 P1_active &= P1_active_mcu \\
 &\quad + P1_active_sensor \\
 &\quad + P1_active_flash \\
 &\quad + P1_active_clock \\
 P1_idle &= P1_idle_mcu \\
 &\quad + P1_idle_sensor \\
 &\quad + P1_idle_flash \\
 &\quad + P1_idle_clock \\
 P1_active_mcu &= (Iactive_mcu \times Vmcu) \\
 &\quad \times Tactive_mcu \\
 P1_active_sensor &= \\
 &\quad (Iactive_sensor \times Vsensor) \\
 &\quad \times Tactive_sensor \\
 P1_active_flash &= (Iactive_flash \times Vflash) \\
 &\quad \times Tactive_flash \\
 P1_active_clock &= (Iactive_clock \times Vclock) \\
 &\quad \times Tactive_clock \\
 P1_idle_mcu &= (Iidle_mcu \times Vmcu) \\
 &\quad \times Tidle_mcu \\
 P1_idle_sensor &= (Iidle_sensor \times Vsensor) \\
 &\quad \times Tidle_sensor \\
 P1_idle_flash &= (Iidle_flash \times Vflash) \\
 &\quad \times Tidle_flash
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P1_idle_clock &= (Iidle_clock \times Vclock) \\
 &\quad \times Tidle_clock
 \end{aligned}$$

위와 같이 나타낸 소비 전력 모델은 휴대용 기기에 사용되는 각 부품별 동작 시간에 따른 설계 방식이다. 이 방식은 S/W 시뮬레이션을 이용한 설계 모델링 방식으로 접근 가능하지만[5,6], 각 부품별 정확한 동작 시간을 알아야만 하는 단점이 있다. 부품별 동작 시간에 따라 소비 전력이 동적으로 변화하기 때문에 설계시 예측 소비 전력과 실측 소비 전력 간 허용 오차 범위가 커질 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 모든 부품이 동작 모드 별로 동일한 동작 시간을 갖는 소비 전력 모델링을 사용한다. 즉 모든 부품은 측정 모드와 대기 모드에서의 동작 시간 등 2개의 시간 변수만을 갖게 된다.

수정된 소비 전력 모델링을 사용한 전체 소비 전력 P_{2_total}, 측정 모드에서의 소비 전력 P_{2_active} 및 대기 모드에서의 소비 전력 P_{2_idle}은 다음과 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P2_total &= P2_active + P2_idle \\
 P2_active &= ((Iactive_mcu \times Vmcu) \\
 &\quad + (Iactive_sensor \times Vsensor) \\
 &\quad + (Iactive_flash \times Vflash) \\
 &\quad + (Iactive_clock \times Vclock)) \\
 &\quad \times Tactive \\
 P2_idle &= ((Iidle_mcu \times Vmcu) \\
 &\quad + (Iidle_sensor \times Vsensor) \\
 &\quad + (Iidle_flash \times Vflash) \\
 &\quad + (Iidle_clock \times Vclock)) \\
 &\quad \times Tidle
 \end{aligned}$$

이 모델링 방식의 특징은 최대 소비 전력 설계 모델 값, 즉 상한 값(upper bound)이 제시되기 때문에 이를 근거로 소비 전력을 줄일 수 있는 방법을 찾는다는 것이다. 또한, 이러한 모델링 방식을 적용할 경우 설계 시 예측 소비 전력과 실측 소비 전력 간 오차 범위가 크지 않은 장점이 있다. 그러나 이 모델링 방식의 단점은 부품별 동작 시간을 고려한 모델링 방식에 비해 예측 소비 전력의 허용 오차 범위가 크다는 점이다.

한편, 설계 소비 전력(P_{2_total})을 예측할 수 있게 되면 휴대용 기기의 배터리 사용 시간 T_{hour}를 구할 수 있다.

$$T_hour = B_cap / P2_total$$

위 식에서 B_{cap}은 배터리의 용량[mAh]이다.

3. 휴대용 기기의 설계

이 장에서는 2장에서 제시한 소비 전력 모델을 사용하여 휴대용 온습도 측정기에 사용된 핵심 부품에 대한 설계 과정을 설명하고, 이어서 전체 시스템 설계 과정을 설명한다.

3.1 MCU 설계

휴대용 온습도 측정기의 MCU로 사용되는 ATmega 2560[8]은 5V DC 전원에서 8MHz 이하 주파수로 동작할 경우 소비 전류는 10mA(최대 14mA)이다. 또한 전원이 차단된 상태(power down mode)에서 와치독(watch dog) 타이머를 동작시킬 경우 소비 전류는 15uA 이하가 된다. 와치독 타이머 동작마저 정지시킬 경우 소비 전류는 7.5uA가 되어, 소비 전력을 최소화 할 수 있다. 이러한 MCU 특성과 함께 직렬 포트를 통한 데이터 전송 속도 동기화 등을 고려하여 MCU의 동작 주파수를 7.3728MHz로 설계한다.

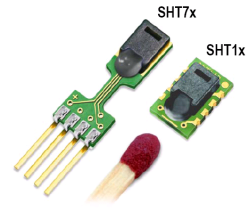
한편 3V 전원을 사용할 경우 동작 주파수는 5V 전원 일 때의 1/2인 3.6864 MHz로 작동시켜 저전력 설계가 가능하도록 한다. 이때 측정 모드 및 대기 모드에서의 소비 전류는 각각 5 mA 및 1.1 mA이다. 전원 차단 모드의 경우 소비 전류는 15 uA이다.

[Table 1] The electrical characteristics of the SHT-XX[7]

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Power supply DC		2.4	5	5.5 ⁽²⁾	V
Supply current	measuring		0.55	1	mA
	average	2 ⁽³⁾	28 ⁽⁴⁾		μA
	sleep		0.3	1.5	μA
Low level output voltage	I _{OL} < 4 mA	0		250	mV
High level output voltage	R _P < 25 kΩ	90%		100%	V _{DD}
Low level input voltage	Negative going	0		20%	V _{DD}
High level input voltage	Positive going	80%		100%	V _{DD}
Input current on pads				1	μA
Output current	on			4	mA
	Tristated (off)		10	20	μA

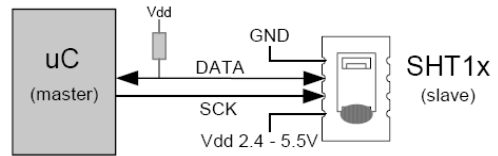
3.2 온습도 센서 설계

온습도 센서는 센서리온(Sensirion)사의 SHT-15를 사용했다[7]. SHT-15 센서는 -40°C에서 +123.8°C 범위의 온도 측정 및 0 ~ 100 % RH 범위의 상대습도 측정이 가능하다[Fig. 2].



[Fig. 2] Humidity and temperature sensor[7]

SHT-15 온습도 센서와 MCU는 Fig. 3에 보인 것처럼 마스터 슬레이브 방식의 양방향 통신을 한다.



[Fig. 3] The interface between the SHT-1x and a MCU [7]

Table 1에 디지털 온습도 센서로 사용하는 SHT-15의 전기적 특성[7]을 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이, 5V 전원을 사용하는 경우 측정 모드에서 평균 0.55mA의 전류를 소모한다. 즉 SHT-15 온습도 센서는 측정 모드에서 최대 1mA 이하의 전류를 소비함을 알 수 있다. 한편 SHT-15 센서는 대기 모드에서 최대 1.5uA의 전류를 소모한다. SHT-15센서를 3V 전원으로 구동할 경우 이보다 더 적은 전류를 소비한다.

3.3 실시간 클록(RTC) 설계

휴대용 온습도 측정기의 실시간 클록(RTC)장치로 DS-1307[9]을 사용한다. DS-1307은 5V 전원을 사용할 경우 측정 모드에서의 소비 전류는 최대 1.5mA 이며, 대기 모드에서의 소비 전류는 최대 0.2 mA이다.

이동용 온습도 측정기의 설계 전압을 5V와 3V에서 각각 설계하고 구현 하는 것은 가능하지만, 소비 전력을 줄이기 위해 전원 전압을 3V로 사용할 경우에는 해당 전압에서 작동 할 수 있는 소자들뿐만 구성하여야 한다.

DS-1307 RTC는 5V 전원에서만 작동하므로 3V 전원 설계 과정에서는 RTC를 DS-1307 대신 PCF 8563을 사용한다. PCF 8563은 3V 전원일 때 측정 모드에서의 소비 전류는 최대 800uA이며, 대기 모드에서의 소비 전류는 최대 1.7uA이다[10].

소비 전류 측면에서 보면 DS-1307 보다는 PCF 8563이 훨씬 유리함을 알 수 있지만 5V와 3V에서 비교하기 위하여 두 개의 소자를 각각 사용하여 설계한다.

3.4 플래시 메모리 설계

최근 MicroSD와 SD 메모리 카드는 휴대용 기기에서 표준 인터페이스처럼 간주되고 있으며, 이들의 작동 전압은 2.0V~3.6V이다.

3.6V 전원을 기준으로 SD 메모리 카드의 대기 모드와 동작 모드에서의 소비 전류는 각각 150uA와 80mA이다 [11].

3.5 전체 시스템 설계

일반적으로 휴대용 온습도 측정기는 1~10분 주기로 온습도를 측정하며, 2개의 AA 건전지를 사용할 경우 최대 1년 동안 사용이 가능하다. 본 논문에서는 최대 측정 주기를 10분으로 하며, 측정 주기인 10 분마다 온습도를 1회 측정하여 데이터 메모리에 저장하는 것을 기준으로 한다. 1회 측정 시에는 시스템이 1초 동안 측정 모드로 작동하도록 단순화하여 설계하였다.

휴대용 온습도 측정기에 사용되는 주요 부품들의 전원 전압과 작동 모드에 따른 소비 전류를 Table 2에 요약하였다. Table 3은 각 전원 전압에 대해 휴대용 온습도 측정기의 주요 부품들의 소비 전류를 합산한 값이다. 즉 전원 전압에 대해 측정 모드와 대기 모드에서의 소비 전류 합을 나타낸 것이다.

[Table 2] The current consumption of the components with respect to operation mode

component	mode	current consumption	
ATmega2560 Micro controller unit (MCU)	5V	active	14 mA
		idle	4 mA
	3V	active	5 mA
		idle	1.1 mA
SHT-15 temperature and humidity sensor	active	1 mA	
	idle	1.5 uA	
DS-1307 RTC	5V	active	1.5 mA
		idle	200 uA
PCF 8563 RTC	3V	active	800 uA
		idle	1.7 uA
Flash memory (SD Card)	active	30 mA	
	idle	6 mA	

매 10분 주기로 1회 1초 동안 측정하는 것으로 설계하였기 때문에, 매 시간 총 6회의 측정이 가능하다. 1시간을 기준 단위로 했을 때 측정 모드에서의 전체 시간 T_active와 대기 모드에서의 전체 시간 T_idle은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{active}} [\text{hour}] &= t_{\text{active_sec}} \times n_{\text{active}} / 3600 \\
 &= 0.0016 \text{ h} \\
 T_{\text{idle}} [\text{hour}] &= (3600 - t_{\text{idle_sec}}) / 3600 \\
 &= 1 - T_{\text{active}} = 0.9984 \text{ h}
 \end{aligned}$$

위 식에서 t_active_sec은 측정 모드에서의 동작 시간이며, t_idle_sec은 대기 모드에서의 동작 시간이다. 이들 값의 시간 단위는 모두 초(second)이다. 또, n_active는 1시간 동안 측정 모드에서 동작한 횟수이다.

한 시간(hour)을 시간 단위로 사용하는 것은 일반적으로 배터리 전력량 용량 단위를 시간당 소비 전류 용량인 mAh로 표시하고 있기 때문이다.

[Table 3] The total current consumption with respect to the power source

DC voltage	mode	current consumption [mA]
5V	active	46.5
	idle	10.2
3V	active	36.8
	idle	7.1

앞서 언급한 바와 같이 본 논문에서는 모든 부품의 동작 시간을 동작 모드별로 동일한 동작 시간을 갖는 소비 전력 모델을 사용하고 있다. 이후 설명에서는 P2 모델에 입각해 소비 전력을 설계한다. 소비 전력 계산은 표 3에 제시된 전원 전압에 따른 각 모드에서의 소비 전류 값을 사용하였다.

■ 5V 전원 일 때 소비 전력

$$\begin{aligned}
 P2_{\text{active_5V}} &= 46.5[\text{mA}] \times 0.0016[\text{h}] \\
 &= 0.074[\text{mAh}] \\
 P2_{\text{idle_5V}} &= 10.2[\text{mA}] \times 0.9984[\text{h}] \\
 &= 10.184[\text{mAh}] \\
 P2_{\text{total_5V}} &= P2_{\text{active_5V}} + P2_{\text{idle_5V}} \\
 &= 10.258[\text{mAh}]
 \end{aligned}$$

■ 3V 전원 일 때 소비 전력

$$\begin{aligned}
 P2_{\text{active_3V}} &= 36.8[\text{mA}] \times 0.0016[\text{h}] \\
 &= 0.058[\text{mAh}] \\
 P2_{\text{idle_3V}} &= 7.1[\text{mA}] \times 0.9984[\text{h}] \\
 &= 7.089[\text{mAh}] \\
 P2_{\text{total_3V}} &= P2_{\text{active_3V}} + P2_{\text{idle_3V}} \\
 &= 10.242[\text{mAh}]
 \end{aligned}$$

5V 전원에서의 소비 전력은 10.258 mAh이고, 3V 전원에서는 소비 전력은 10.242 mAh이다. 2,500 mAh 배터리를 기준으로, 상대적으로 많은 전력을 소모하는 5V 전원에 대해 P2 방식으로 모델링한 휴대용 온습도 측정기는 10일간 사용 가능하다.

$$T_hour_5V = 2500mAh / 10.258mAh \\ = 243.7[시간] = 10.15[일]$$

위 설계에서 3V 전원에서 측정 모드와 대기 모드에서의 소비 전력은 각각 0.058 mAh 및 7.089 mAh이다. 측정 모드에 비해 대기 모드에서 무려 122 배나 높은 전력을 소모함을 알 수 있다. 5V 전원에서도 측정 모드에 비해 대기 모드에서 138배나 더 많은 전력을 소모함을 알 수 있다.

이러한 결과가 나타난 주된 원인은 대기 모드에 머물러 있는 시간이 측정 모드에 비해 훨씬 길기 때문이다. 그러므로 대기 모드의 소비 전력을 줄이는 방향으로 기본 설계를 변경할 필요가 있다.

Table 2에서 플래시 메모리가 대기 모드에서 다른 부품들에 비해 대략 6~4,000 배나 많은 소비 전류를 소모함을 알 수 있다. 또한 ATmega 2560 MCU 역시 다른 부품들에 비해 수백 배 이상의 전력을 소비함을 알 수 있다. 대기 모드의 소비 전류를 줄이기 위해서는 소비 전력이 다른 부품과 비교하여 상대적으로 많은 ATmega 2560 MCU와 플래시 메모리 설계 변경이 필요함을 알 수 있다.

NAND 플래시 메모리[11]가 MicroSD나 SD 카드 메모리에 비해 대기 모드에서의 소비 전류가 현저히 작기 때문에, 이를 고려하여 상세 2차 설계에서는 NAND 플래시 메모리를 사용하였다. NAND 플래시 메모리를 측정 모드에서만 활성(측정) 상태로 만들어 데이터를 저장할 수 있도록 하였다. 반면, 대기 모드에서는 NAND 플래시 메모리의 작동을 멈추게 함으로써 대기 모드에서의 소비 전류가 25uA 이하가 되도록 하였다.

대기 모드에서의 소비 전류를 줄이기 위한 또 다른 방안으로, 대기 모드에서는 ATmega 2560이 전원 차단 모드로 동작하도록 설계를 개선하는 것이다. 이를 통해 이전 대기 모드에서의 소비 전류에 비해 소비 전력량을 현저히 감소시킬 수 있었다.

2차 설계 보안을 통해 변경된 주요 부품별 동작 모드에 따른 소비 전류는 Table 4와 같다. Table 2와 비교했을 때, 플래시 메모리를 제외하면 다른 핵심 부품들의 측정 모드에서의 소비 전류는 달라지지 않았으며, 대기 모드에서의 소비 전류만 개선되었음을 알 수 있다. 한편 Table

5에 3V 전원에서의 동작 모드별 합산 소비전류를 나타냈다.

[Table 4] The current consumption of the components with the 3V DC power source

component	mode	current consumption
ATmega 2560 MCU	active	5 mA
	power down	15 uA
SHT-15 temperature and humidity sensor	active	1 mA
	idle	1.5 uA
PCF 8563 real time clock	active	800 uA
	idle	1.7 uA
Flash memory AT49 Series[10]	active	25 mA
	idle	25 uA

소비 전력 P2 모델링을 사용하여 3V DC에서의 측정 모드와 대기 모드에서 각각의 소비 전력을 계산하면 다음과 같다.

$$P2_active_3V = 31.8[mA] \times 0.0016[h] \\ = 0.0509[mAh] \\ P2_idle_3V = 0.043[mA] \times 0.9984[h] \\ = 0.043[mAh] \\ P2_total_3V = P2_active_3V + P2_idle_3V \\ = 0.0939[mAh]$$

[Table 5] The accumulated current consumption at each measurement in the interval of 10 minutes

current consumption	active	31.8 mA
	idle	43 uA

1차 설계에서 3V 전원 전압에서 대기 모드와 측정 모드에서의 소비 전력비가 122 배이던 것을 2차 개선 설계에서는 2.18배로 크게 줄였다. 대기 모드의 소비 전력이 대폭 감소한 것이 주요 요인임을 알 수 있다.

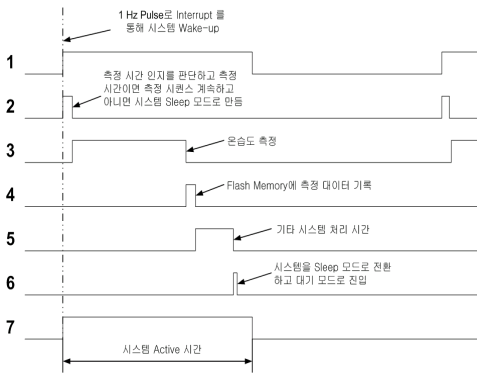
위와 같이 설계를 확정하고 3V 전원 전압에서 배터리 사용 시간을 계산하면 다음과 같다.

$$T_hour_3V = 2500mAh / 0.0939mAh \\ = 26624[시간] = 1109[일] = 3[년]$$

즉 일반 배터리를 사용하여 10분에 1회 1초 측정 주기로 휴대용 온습도 측정기를 설계할 경우 3년 이상 사용 가능함을 알 수 있다.

이러한 소비 전력 모델링 설계를 바탕으로 상세 구현 설계를 하였으며, 이러한 상세 설계 결과를 실제로 구현하여 실측 결과와 비교함으로써 모델링 결과의 타당성을 확인하고자 한다.

Fig. 4에 상세 구현 설계된 휴대용 온습도 측정기의 시간대별 부품들의 동작 시간과 순서를 나타냈다. Table 6에 보인 것처럼, 온습도 측정기가 측정 모드에서 실제 작동하는 시간은 500 ms 이내로 설계하여 최대 1초 작동 시간 범위 내에서 측정이 완료될 수 있도록 했고, 이후에는 대기 전력 모드에서 소비 전력을 줄이는데 초점을 맞추려고 설계에 반영했다. 또한, 1초의 측정 간격으로 작동하는 최악의 경우가 발생하더라도, 400 ms의 여유 작동 시간을 확보함으로써 측정 시스템의 안정성을 확보했다.



[Fig. 4] The timing sequence of the proposed mobile device

[Table 6] The timing sequence when operating

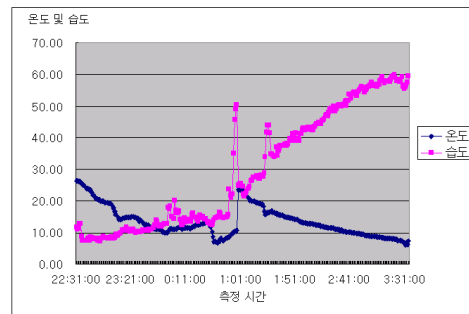
No	operations to be performed	time (ms)	remarks
1	Wake up the MCU (ATmega 2560) through the 1Hz pulse of the RTC(PCF 8563)	20	Begin the processing of data
2	Check to see if it is the time to start measurement or not by reading the current time from the RTC.	50	
3	If it is, read the data of measurement from the SHT-15 temperature and humidity sensor.	300	Access the data of temperature and humidity
4	Write the data measured into the flash memory	20	
5	Do perform the miscellaneous tasks, if necessary	100	
6	Record the next time to restart measurement in the device Enter the MCU into the sleep mode.	10	Stop the processing of data
7	Enter the all of the components into the sleep mode until the device receives the wake-up pulse from the RTU.	-	The device stays in the sleep mode.

4. 실험 결과

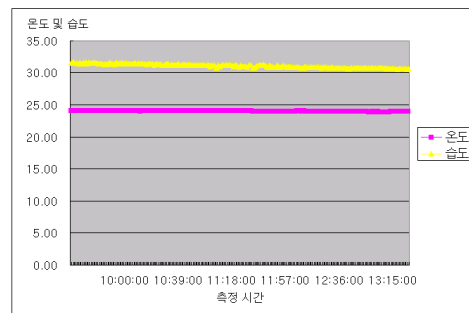
본 논문에서 제안하는 소비 전력 모델링과 설계 방법을 검증하기 위하여, 제안한 설계 조건에 맞게 휴대용 온습도 측정기를 구현하여 온습도 측정 및 소비 전력 측정 실험을 수행하였다.

4.1 온습도 측정 시험

측정 환경은 플라스틱 상자에 휴대용 온습도 측정기를 넣은 상태에서 실험하였으며, 온습도 변화 반응 시험과 온습도 유지 시험을 실시하였다. 온습도 변화 반응 측정 시간은 24시간이며, 측정 데이터는 기기에 내장된 플래시 메모리에 저장된 데이터를 고정 장치로 다운로드 받아 이를 분석했다. Fig. 5와 Fig. 6은 일부 측정 시간대에서의 온습도 측정 결과를 나타내고 있다.



[Fig. 5] The partial result with respect to varying temperature and humidity

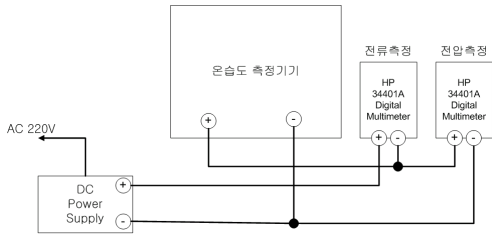


[Fig. 6] The measurement of temperature and humidity without variation

4.2 소비 전류 측정

휴대용 온습도 측정기의 소비 전류 측정을 위해 Fig. 7에 보인 것과 같은 측정 회로를 구성했다. 전원 전압은 DC 5V 및 3V로 인가하여, 각각의 소비 전류를 측정했다.

본 논문에서 제안한 방식으로 구현한 휴대용 온습도 측정기는 별도의 단일 기관 온습도 회로로 제작되지 않았다. 대신 분리 구현된 모듈 단위로 해당 전압을 인가하여 소비 전류를 측정하고, 그 측정 결과를 합산하는 방식으로 실험을 진행하였으며, Table 7에 측정 결과를 나타냈다. Table 8에 설계 소비 전류와 측정 소비 전류를 비교한 결과를 나타냈다.



[Fig. 7] The circuit of measuring current consumption of the device implemented

[Table 7] The measured current consumption with respect to the power source

Vcc	components	mode	voltage measured [V]	current measured
5V	ATmega 2560 + SHT-15	active	4.98	19.25 mA
		idle	4.99	6.14μA
	SD Flash Memory + PCF8563 RTC	active	4.97	40.52 mA
		idle	5.14	7.05μA
3V	ATmega 2560 + SHT-15	active	3.02	7.24 mA
		idle	3.05	2.31μA
	SD Flash Memory + PCF8563 RTC	active	3.01	30.35 mA
		idle	3.03	6.27μA

[Table 8] The comparison of the estimated current consumption with the measured current consumption

Vcc	mode	estimated current consumption ①	measured current consumption ②	error [%] ③
5V	active	46.5 mA	59.77 mA	28.5
	idle	15.07μA	13.19μA	-12.5
3V	active	31.8 mA	37.59 mA	18.2
	idle	43μA	8.58μA	-80.0

* : Error③ = (② - ①) / ① x 100 [%]

5V 전원일 때 측정 모드에서 설계 소비 전류와 측정 소비 전류 간 상대 오차가 큰 것은 설계 과정에서 고려하지 못했던 상태 표시용 LED에 기인한 것으로 나중에 밝혀졌다.

상태 표시 LED로 인한 소비 전류를 줄이기 위해서 정적(static) 점등 방식을 동적(dynamic) 점등 방식으로 변경했다. 즉 기존 LED 점등 방식은 측정 시간 동안 연속적으로 켜지는 방식이었지만, 개선한 LED 점등 방식은 30Hz duty 사이클에서 40:60 비율로 LED를 점멸하는 방식으로 바꾸어 설계했다.

이렇게 변경 설계를 3V 전원일 때 적용하여 소비 전류를 측정했다. 동적 LED 점등 방식 설계가 적용되지 않은 5V 전원에서는 설계 소비 전력과 측정 소비 전력의 차가 13.73 mA이었지만, 정적 LED 점등 방식이 적용된 3V 전원에서는 5.39 mA로 크게 감소했음을 알 수 있다.

$$P2_active_3V = 37.59[mA] \times 0.0016[h] = 0.060[mAh]$$

$$P2_idle_3V = 0.00858[mA] \times 0.9984[h] = 0.00856[mAh]$$

$$P2_total_3V = P2_active_3V + P2_idle_3V = 0.06856[mAh]$$

실제 측정된 소비 전류를 기준으로 휴대용 온습도 측정기 소비 전력은 Table 9에 나타낸 것처럼 0.06856 mAh이다.

$$T_hour_3V = 2500mAh / 0.06856mAh = 36464[시간] = 1519[일] = 4[년]$$

T_hour_3V 값은 AA형 건전지 2개(3V DC 전원)의 배터리로 사용하고, 측정 주기를 10분으로 했을 때 4년을 사용할 수 있다는 것이다.

따라서 본 논문에서 제시한 전력 소비 모델링과 이러한 설계 결과를 토대로 구현한 휴대용 온습도 측정기는 설계 소비 전력 0.0939 mAh를 충족하는 설계임을 알 수 있다.

[Table 9] The comparison of the measured power consumption with the design goal

parameter	current consumption			remarks
	design goal	current consumption measured		
		active	idle	
power consumption (mAh)	0.0939	0.060	0.00856	interval: 10 min. battery : 3V DC (2×AA)

5. 결론

본 논문에서는 저전력 소비가 요구되는 휴대용 측정기를 효과적으로 설계하기 위한 소비 전력 설계 모델링을 제안하였다. 즉 모든 부품이 동작 모드 별로 동일한 동작 시간을 갖는 소비 전력 모델링을 사용한다. 모든 부품은 측정 모드와 대기 모드에서의 동작 시간 등 2개의 시간 변수만을 갖게 된다. 이 모델링 방식의 특징은 최대 소비 전력 설계 모델 값, 즉 상한 값이 제시되기 때문에 이를 근거로 소비 전력을 줄일 수 있는 방법을 찾게 된다.

또, 소비 전력 모델링을 사용해 휴대용 온습도 측정기를 설계하고 이를 직접 구현하여 실측값과의 비교를 통해 소비 전력 모델링의 타당성을 검증했다. 한편, 다양한 종류의 배터리 사용에 대비해 3V 및 5V 등 2 종류의 DC 전원에 대해 설계 및 구현하였다.

휴대용 측정기는 거의 대부분 시간을 대기(idle) 모드에 머물러 있다가 짧은 시간 측정(active) 모드로 작동한다. 따라서 측정 모드에서의 소비 전류에 비해 대기 모드에서의 소비 전류를 효과적으로 감소시키는 것이 중요한 설계 목표가 됨을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제시한 소비 전력 설계 모델링과 구현 설계를 통한 휴대용 온습도 측정기의 소비 전력의 설계 목표는 0.0939 mAh 이하이다. 실제 구현 결과 측정된 소비 전력은 0.06856 mAh이며, 이는 설계 목표를 충분히 부족했다.

References

- [1] Yurish S.Y., "Digital Humidity Sensors and Data Logger Design Based on Modern Frequency-to-Digital Converter", Sensors & Transducers Magazine, Vol. 59, Sept., 2005.
- [2] C.Y. Lee, W.J. Hsieh, G.W. Wu, "Embedded flexible micro-sensors in MEA for measuring temperature and humidity in a micro-fuel cell", J. of Power Sources, pp. 237 - 243 Vol. 181, July 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.020>
- [3] Novalynx Corporation, "Model 225-HMP50YA Temperature and Relative Humidity Sensor Instruction Manual, 2005.
- [4] L Gerold, K Baumgartner, "Temperature and humidity sensor", U. S. Patent D686,925, Aug., 2013.
- [5] S. H. Cho, Analysis of FTL power consumption for low power FTL Modeling, M. S. Thesis, Hanyang Univ.
- [6] C. M. Lee, A Method of Development of the Simulator

for Estimating SSD performance and Power Consumption, M.S. thesis, Hanyang Univ.

- [7] Available From: <http://www.sensirion.com/>
- [8] Available From: <http://www.atmel.com/>
- [9] Available From: <http://www.dalsemi.com/DS1370>
- [10] Available From: <http://www.nxp.com/PCF8563>
- [11] Available From: <http://downloads.amilda.org/>
- [12] Available From: <http://www.testo.co.kr/>
- [13] Available From: <http://www.bskm.co.kr/>

이 철 호(Chol-Ho Lee)

[정회원]



- 2008년 8월 : 인천대학교 정보통신대학원 컴퓨터공학과(컴퓨터공학석사)
- 2011년 8월 : 인천대학교 인천대학원 컴퓨터공학과 수료
- 2010년 6월 ~ 2012년 11월 : 신호시스템(주) 연구소장
- 2012년 12월 ~ 현재 : (주)하이트롤 상무/연구소장

<관심분야>
계측제어, 정보통신

홍 윤 식(Youn-Sik Hong)

[정회원]



- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학박사)
- 1989년 3월 ~ 1991년 8월 : LG 전자(주) 선임연구원
- 1991년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야>
모바일 컴퓨팅, 유비쿼터스 센서 네트워크(USN)