논문 2011-48SC-6-5

RF 무선전력전송을 이용한 센서노드 배터리 충전용 전력획득모듈 연구 및 구현

(Research and Implementation of Using RF wireless Power Transmission System for Wireless Sensor Nodes Battery-Charging Power Harvesting Module)

정 원 재*, 박 준 석**

(Won-Jae Jung and Jun-Seok Park)

요 약

USN환경에서 다양한 정보 수집을 위해 배치된 수많은 센서노드들의 배터리를 일일이 교체해 주는 것은 많은 시간과 비용이 소요된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 본 논문에서는 센서노드 배터리 충전용 전력획득모듈을 제안한다. 센서모듈이 환경정보를 센싱하고 정보를 전송하는데 소모하는 전력과 자연 방전되는 배터리 전력을 보충하기 위해, 전력전송모듈에서 전송한 RF 전력을 획득모듈에서 효과적인 획득 및 효율적인 전력관리를 통해 배터리에 충전한다. 획득된 전력은 배터리 전력을 일정한 레벨로 유지시켜 센서노드의 배터리 교체 주기를 반영구적으로 늘림으로써 USN 산업의 신뢰성과 적용가능성을 높이고 USN 산업 활성화에 기여할 수 있다. 본 논문에서는 RF 무선전력전송 시스템을 이용하여 전력전송/획득모듈간 5 m의 거리에서 입사된 10 dBm의 전력을 4.2 V의 1 mA 이상의 전류로 센서노드용 리튬폴리머 배터리에 충전하는 실험을 거쳐 시스템을 검증하였고 센서노드의 배터리 소모전류와 센싱정보 송신주기를 무선으로 충전할 수 있는 전류량과 비교하였다.

Abstract

With the progress of USN technology, fields to which wireless sensor node is applicable are increased under a condition that it holds a lot of problems to solve for betterment. One of the problems which acts as an obstacle to USN industry diffusion is the wireless sensor node battery exchange to their individual life cycle. Exchanging the battery of so many sensor nodes one by one requires a great deal of times and costs. Such problem is against the convenience supply -aim by applying USN technology. In this paper, using RF wireless power transmission system that power transmission / harvesting module from a distance of 5 m and the power of 10 dBm with a current of 1 mA or more for Sensor Nodes in lithium-polymer battery charging system tested and verified.

Keywords: wireless power transmission, sensor node battery, lithium ion battery. power management

Ⅰ. 서 론

USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술은 많은 산업 및 다양한 분야에 큰 이익을 준다. 센서를 설치하는데 있어서 USN 기술은 전선, 에너지 및 재료 절감, 프로세스 개선, 노동 절감과 생산성 향상 등 다양한 장점을 가진다. USN 기술은 광범위하게 사용될 수 있으며 우리에게 많은 정보와 편의를 가져다 줄 수 있다. 그리고 적용되는 장소나 방법에 따라 큰 이익이 될 수 있다. 예컨대 교각이나 건물에 내장된 센서가 균열을 감지하여 빠르고 정확한 정보를 제공한다면 큰 사고를 미리 예견할 수 있고 사전에 대처 할 수 있다. 또한 중요한 장소에서 실시간으로 환경정보 수집함으로써 어떠한 조건과 상황에 미리 대응하거나 더 나은 서비스를 제공 할 수 있는

* 정회원, ** 정회원-교신저자, 국민대학교 전자공학과
(Kookmin University)

접수일자: 2011년6월10일, 수정완료일: 2011년9월24일

밑바탕이 된다. 빌딩 자동화를 위해 다양한 센서노드가 배치될 수 있고 에너지 관리를 위해서 사람 유무를 감지하고 상황에 따라 조명이나 기기의 전원을 조정하는 센서노드도 배치될 수 있다[1~2].

최근 USN 기술 발전에 따라 무선센서노드의 적용분야가 다양하게 확대되고 있다. 하지만 아직까지 개선해야 할 과제가 많다. USN은 센서노드가 설치된 장소의 여러 정보를 모니터링 할 수 있지만 더욱 정확한 정보와 넓은 범위에 대한 정보를 얻기 위해서는 적게는 수개정도에서 많게는 수천 개 이상의 많은 센서노드가 설치되어야 한다. 그런데 센서노드는 배터리 기반으로 동작하는 시스템이기 때문에 배터리 전력이 고갈 되었을 시 사람이 배터리를 교체해 주는 작업에 한계가 있고 유지보수 비용 또한 매우 크게 작용하기 때문에 중요한 문제가 된다. 이는 USN 서비스를 사용하려는 사업자나 USN 기술을 적용시키려는 주체에게는 상당히 중요한 문제이다. 이러한 배터리 유지보수 비용과 시간 등의 단점이 USN 산업 확산에 걸림돌로 작용하여 아직까지 다양한 분야로 확대되는데 한계가 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 센서노드의 저전력 기술과 알고리즘 개선 배터리용량 향상 등의 방법이 제시되고 있지만 근본적인 문제의 해결이 되지 못한다[3~6].

본 논문에서는 이를 해결하기 위한 방안으로 센서노드 배터리 충전용 전력획득모듈을 제안한다. 센서모듈이 환경정보를 센싱하고 정보를 전송하는데 소모하는 전력과 자연 방전되는 배터리 전력을 RF 무선전력전송을 이용하여 소모되는 전력을 보충함으로써 배터리의 전력을 일정한 레벨로 유지시키며 센서노드의 배터리 교체 주기를 반영구적으로 늘릴 수 있다. 이는 USN 산업의 신뢰성과 적용가능성을 높여 USN 산업 활성화에 기여할 수 있다.

논문의 순서로는 본론에서 RF 무선전력전송 시스템의 링크 버짓과 전력전송/획득모듈 구조의 특징과 구현에 대해서 설명하고 실험에서 구현한 모듈로 센서노드용 배터리를 RF 전력으로 충전하는 실험을 거쳐 RF 무선전력전송 시스템을 검증하였다.

Ⅱ. 본 론

1. RF 전력을 이용한 무선전력전송 시스템

가. 시스템 링크버짓

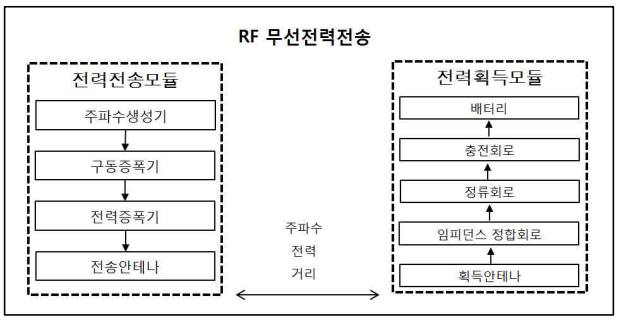

그림 1. RF 무선전력전송 시스템 블록도
Fig. 1. RF wireless power transmission system block diagram.

RF 무선전력전송 시스템은 무선으로 전력을 전송하는 것이 목적이기 때문에 선형성, 잡음 등의 스펙보다는 전송/획득 거리 및 공간손실, 획득부의 전력 소모에 초점을 맞춰 시스템을 설계한다. 시스템은 크게 전력전송모듈 (ED: Energy Donor)과 전력획득모듈 (EA: Energy Acceptor)로 나뉜다. RF 무선전력전송 시스템의 블록도는 그림 1에 나타내었다. 전력전송모듈은 주파수생성기, 구동증폭기, 전력증폭기, 전송안테나로 구성되고, 전력획득모듈은 획득안테나, 임피던스 정합회로, 정류회로, 충전회로, 배터리로 구성된다. 두 모듈간의 무선으로 RF 전력을 전송/획득하는 시스템을 구성하기 위해서 필요한 주요한 요소로써 사용주파수, 전송전력, 전송거리가 있다.

RF 무선전력전송 시스템은 대기 중에 전력을 방사하는 형식이기 때문에 거리에 따른 전력의 공간손실의 크기가 프리스 방정식으로 주어지고 세 가지 주요 요소인 사용주파수, 전송전력, 전송거리에 따라서 그 값이 정해진다. 프리스 방정식은 식 (1)에서 나타내었다[7]. 이 식은 송신기와 수신기 사이에 장애물이 존재하지 않고 가시선 (LOS : Line Of Sight)을 따라서 RF가 전파 될 때의 관계식이다. PRX는 획득모듈에 입사되는 전력, PTX는 전송모듈의 전송안테나에서 출력되는 전력, GTX와 GRX는 전송안테나와 획득안테나의 이득, λ는 사용주파수의 파장, r은 전송/획득모듈간의 거리를 나타낸다.

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 전송/획득 안테나의 이득, GTX와 GRX는 고정되었다고 가정하면 안테나로 입사되는 전력은 전송전력과 전송거리, 사용주파수의 파장 길이의 함수로써 주어진다. 이를 다시 표현하면 거리에 따른 공간손실은

식(2)와 같이 나타낼 수 있다. c는 빛의 속도 3×10^8 m/s이고, f는 사용주파수이다.

$$P_{공간손실}(dB) = 10\log\left(\frac{4\pi rf}{c}\right)^2 \quad (2)$$

우선 사용주파수가 결정되고 전송전력이나 전송/획득거리 중 하나를 결정하게 되면 나머지 하나의 요소가 위 식으로 정해지게 된다. 두 가지의 주요 요소를 결정하고 전력획득모듈의 측면에서 획득전력의 양을 고려하면 나머지 요소도 결정할 수 있다. 본 논문에서는 실험주파수로써 대기상태에서 전자파의 손실이 심한 주파수 대역인 10 MHz~300 MHz와 20 GHz~60 GHz 대역을 피해 비교적 손실이 적은 1 GHz~10 GHz의 저잡음 대역 주파 수 중 현재 무선전력전송으로 많이 연구되고 있는 915 MHz를 사용주파수로 선택하였고 전송전력은 30 W로 고정하여 전력획득모듈에 입사되는 전력을 거리에 따라 측정하였다.[8] 그 결과는 표 1에 나타내었고 실험에 사용할 전송/획득 안테나의 이득은 각각 8dBi와 6dBi로써 안테나 이득을 고려한 계산값도 같이 나타내었다.

시스템의 전송거리는 거리에 따라 입사되는 전력량으로 결정할 수 있다. 입사되는 RF 전력을 배터리에 충전시키기 위한 전력으로 변환시키는 효율과 충전하는 효율을 고려해 4.2 V로 최소 1 mA의 전류로 리튬폴리머 배터리에 충전시키는 조건을 가정한다. RF-DC 변환효율을 45 %, 배터리 충전 효율을 90 %로 가정하여 버짓을 구성하면 입사전력은 최소 10 dBm 이상의 전력이 확보되어야 배터리를 1 mA 이상으로 충전시킬 수 있다.

표 1. 거리에 따른 RF전력의 공간손실
Table 1. RF power space losses due to the distance.

거리(m)	공간손실(dB)	
	915 MHz	915MHz (안테나이득고려)
3	41.2	7.6
4	43.7	10.1
5	45.6	12.0
6	47.2	13.6
7	48.6	14.9
8	49.7	16.1
9	50.8	17.1
10	51.7	18.0
11	52.5	18.9
12	53.3	19.6
13	53.9	20.3
14	54.6	21.0
15	55.2	21.6

표 2. 시스템 링크버짓
Table 2. ED/EA Wireless Power Transmission System link Budget.

ED/EA Wireless Power Transmission System Budget	
Parameter	ED-EA=5m Target
Donor-Acceptor Distance (m)	5.0
Frequency (MHz)	915.0
Donor PA Output Power (dBm)	45.0
Donor TX Ant Gain (dBi)	8.0
Acceptor RX Ant (dBi)	6.0
Free Space Attn (TX to Acceptor) (dB)	-45.65
Donor TX to Acceptor Gain (dB)	-31.65
Margin (dB)	3.0
Power at Acceptor Input (dBm)	**10.35**
Power at Acceptor (mW)	**10.84**
Rectifier Converting Efficiency (%)	45.0
Battery Charging Efficiency (%)	90.0
Battery Charging Power (dBm)	6.43
Battery Charging Power (mWs)	4.39
Battery Charging Voltage (V)	4.2
Battery Charging Current (mA)	1.05

정리된 시스템의 링크버짓에 대한 이론값을 표 2에 나타내었다. 주파수 915 MHz로 45 dBm의 출력을 전송했을 시 획득모듈로 입사되는 전력은 8 dBi와 6 dBi의 전송/획득안테나 이득 고려 후 31 dB이상의 감쇄된 전력이다. 이는 약 10 dBm 이상의 전력이 입사되고 이는 10 mW로써 획득모듈의 효율을 거쳐 약 4 mW의 전력이 배터리로 충전될 수 있음을 링크버짓을 통해 확인할 수 있다. 배터리로 충전되는 전류는 1 mA 이상의 전류로 충전이 가능하다.

나. 전력전송모듈

전력전송모듈의 구조는 그림 2와 같이 주파수생성기와 구동증폭기, 전력증폭기, 전송안테나로 구성된다. 45

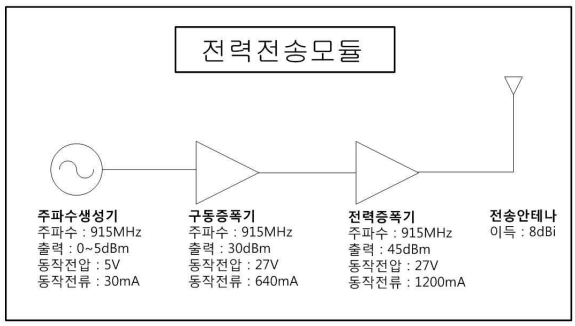

그림 2. 전력전송모듈 블록도
Fig. 2. Power transmission module block diagram.

dBm의 출력을 내기 위해서 주파수생성기의 출력은 약 0 dBm의 915 MHz의 주파수를 생성한다. 그리고 주파수생성기의 출력이 구동증폭기의 입력으로 들어가고 구동증폭기는 전력증폭기의 높은 출력을 위해 큰 이득으로 0 dBm을 30 dBm까지 증폭시킨다. 전력증폭기는 15 dB의 이득으로 최종 45 dBm의 출력을 전송안테나를 통해 전송하게 된다. 큰 전력의 출력을 안정적으로 내기 위해 3~5 dB 낮은 지점에서 동작하도록 하고 고출력용의 LDMOSFET를 사용한다. 전송안테나는 8 dBi의 이득을 갖는 20cm×20cm 크기의 안테나를 사용하여 100° 이상의 전송각을 가지고 전송획득모듈에 전력을 공급하게 된다.

다. 전력획득모듈

획득안테나로 입사된 RF 전력을 DC 전력으로 변환하는 전력획득모듈 구조와 회로도를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 입사되는 RF 전력을 최대한으로 획득하기 위해선 지향성이 높은 안테나를 선택해야 한다. 하지만 센서노드에 이 모듈을 적용시켜야 하는 점을 고려하면 작은 사이즈에 적절한 안테나 이득이 트레이드오프 된다. 본 논문에서는 5 cm×18 cm 크기의 6 dBi 지향성 안테나를 사용하였다. 입력정합은 입사된 전력을 최대로 다음 단에 넘겨주기 위해서 넓은 대역의 정합보다는 한 주파수에서의 S11을 가능한 낮추는 방법으로 고려한다. 사용주파수 대역이 고주파임에 따라 RF 전력을 효과적으로 DC 전력으로 정류하기 위해 사용하는 다이오드는 스위칭이 빠른 쇼트키다이오드를 채택하여야 하고 뒷단에는 평활회로를 구성하기 위한 저손실 저장 커패시터를 구성한다. 그리고 변환된 DC 전력을 배터리에 안정적으로 충전시키기 위한 차져칩으로 충전회로를 구성한다. 차져칩은 리튬폴리머 배터리를 보호하기 위해서 과충전/과방전 방지 기능을 동시에 수행한다.

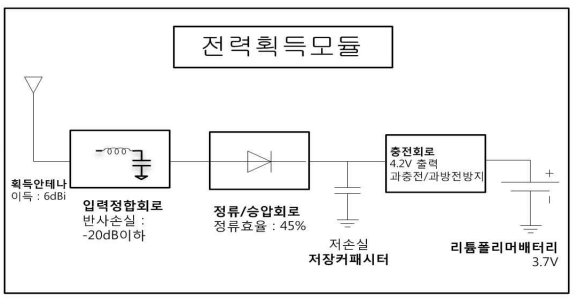

그림 3. 전력획득모듈 블록도
Fig. 3. Power harvesting module block diagram.

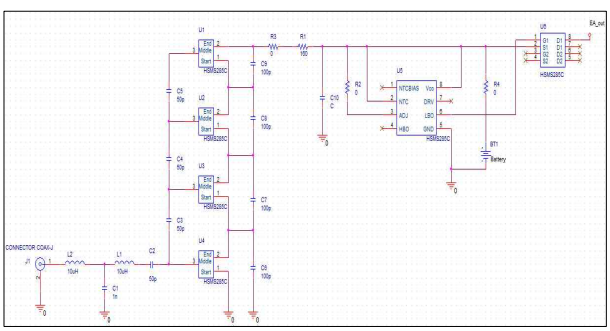

그림 4. 전력획득모듈 블록도
Fig. 4. Power harvesting module block diagram.

2. RF 전력 전송/획득 시스템 구현

가. 전력전송모듈 구현

제작된 전력전송모듈을 그림 4에 나타내었다. 발진기와 구동증폭기, 전력증폭기의 사양을 표 3에 나타내었다. 발진기는 SANGSHIN사의 900MHz 대역 PLL모듈을 사용하였고 구동증폭기와 전력증폭기는 FreeScale사의 고출력 고이득용 LDMOSFET를 사용하여 구성하였다. 입출력정합은 최대전력전달을 위한 정합으로 구성하였다. 전력증폭기의 S22는 최대전력전달을 위해 높게 설정되었으므로 출력반사에 의한 FET의 손상을 막기 위해 써큘레이터를 출력단에 적용시켜 출력반사를 최소화하였다.

전력증폭기의 출력은 45dBm 이상이고 전력전송모듈의 증폭기가 클래스 AB로 설계되었기 때문에 효율은 약 60 % 미만으로 주어진다. 추후 효율을 향상시키기 위해서 클래스 E나 클래스 F 증폭기로 설계하는 것을 고려해야한다.

표 3. 전력전송모듈의 사양
Table 3. Power transmission module Spec.

종류	발진기	구동증폭기	전력증폭기
동작주파수	915 MHz	915 MHz	915 MHz
입력 AC 전력	-	0dBm	30dBm
출력 전력	0dBm	30dBm	45dBm
전류 소모	30mA	500mA	2A
DC supply	5V	27V	27V

나. 전력획득모듈 구현

제작된 전력획득모듈은 그림 5에 나타내었다. 획득안테나로부터 입사된 전력은 정합회로를 거쳐 정류회로와 저장 커패시터, 충전회로를 이용하여 배터리에 충전한다.

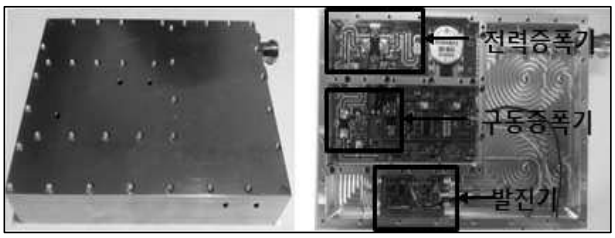

그림 5. 제작된 전력전송모듈
Fig. 5. The fabricated power transmission module.

센서노드에 적용할 배터리로는 안정성이 높고 효율이 좋은 리튬폴리머를 사용하였다. 리튬폴리머 배터리는 평균전압이 3.7 V이고 니켈 카드뮴 전지 등에서 나타나는 메모리 현상이 없기 때문에 충방전으로 인한 용량감소가 생기지 않는다. 1000회 이상의 충방전 횟수가 가능하며 상온에서 자가방전률이 3~5 % 미만으로 매우 적다. 환경적으로도 유해물질을 사용하지 않아 친환경적이다. 리튬폴리머 배터리는 4.2 V로 충전전압만 유지시켜 주면 수십 μA 로도 충전이 가능하다. 단 배터리에 충전되는 양이 적고 충전시간이 그만큼 길어지게 된다. 배터리 용량별로 충전시키는 전류와 시간의 관계를 식 (4)에 나타내었다.

$$\text{배터리용량}(mAh) = \text{배터리충전전류}(mA) \times \text{충전시간}(h) \quad (4)$$

리튬폴리머 배터리에 획득전력을 충전시키기 위한 충전회로는 저전력이고 단속적인 소스원에도 낮은 소모전력으로 동작하고 배터리를 안정적으로 충전시킬 수 있는 Linear Technology사의 LTC4071 차져칩으로 구성하였다. LTC4071은 병렬 충전구조로써 Current-fed 방식의 2단자 디바이스로 목표 전압에 도달할 때까지 전류를 배터리에 최대한 충전시키고 배터리 전압이 정해진 전압에 도달하면 추가되는 전류를 배터리로부터 분리하여 과충전을 방지한다. 또한 배터리의 전압이 정해진 하한 전압이하로 떨어지게 되면 배터리가 부하로

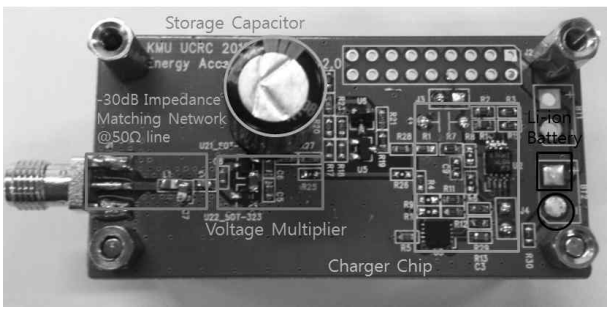

그림 6. 제작된 전력획득모듈
Fig. 6. The fabricated power harvesting module.

표 4. 입사전력에 따른 전압체배기의 효율
Table 4. According to the incident power efficiency of the voltage doubler.

입사 전력 (dBm)	출력 전류 (mA)	출력평균 전압 (V)	출력전력 (mW)	효율(%)
0	0.03	3.94	0.114	11.39
1	0.08	3.94	0.323	25.66
2	0.15	3.94	0.579	36.54
3	0.22	3.94	0.883	44.23
4	0.31	3.94	1.229	48.94
5	0.42	3.94	1.635	51.71
6	0.53	3.94	2.084	52.35
7	0.66	3.94	2.604	51.96
8	0.81	3.94	3.180	50.39
9	0.97	3.94	3.826	48.16
10	1.16	3.94	4.563	45.63
11	1.36	3.94	5.374	42.69
12	1.59	3.94	6.280	39.63
13	1.86	3.94	7.317	36.67

부터 과방전 되는 것을 방지하기 위해 배터리와 부하의 연결을 분리시킨다. 또한 입력저항 하나로 간단한 회로 구성을 할 수 있다.

작은 레벨의 전압과 적은 양의 전류를 리튬폴리머 배터리에 충전하기 위해서 Villard 구조의 전압체배기로 충전 가능한 전압이상으로 승압시키고, 저장커패시터로 평활회로를 구성한다. 평활회로 구성을 위해서 큰 용량의 커패시터를 사용하여 전압의 흔들리는 정도를 안정시킨다. 본 논문에서는 3uA 이하의 소모전류를 가진 1000uF 전해커패시터를 사용하였다. 전압체배기는 AVAGO사의 Schottky 다이오드 HSMS285C를 사용하여 4 단구조로 구성하였다. 입사전력에 따른 전압체배기의 효율은 표 4에서 나타내었다.

전압체배기의 효율은 본 시스템에서 목표로 한 입사전력 10 dBm에서 45.63 %로 측정되었고 4 dBm부터 11 dBm 까지 입력전력에서 40 %이상의 효율을 나타내었다.

입력정합회로는 최대전력전달을 위해 -23 dB 이상의 S11을 50 Ω으로 정합하였고 저장커패시터로 일반 알루미늄커패시터보다 전류손실이 7.5 배 이하로 적은 저손실 커패시터를 사용하여 손실을 최소화하였다.

획득안테나는 6dBi의 지향성을 가진 패치안테나를 사용하여 최대한 획득가능 전력을 높였다.

Ⅲ. 실 험

가. RF 전력을 이용한 배터리 충/방전 실험

RF 전력을 이용한 센서노드용 배터리의 충전과 방전에 대한 경향을 표 2의 링크버짓과 비교하기 위한 실험을 하였다.

RF 전력을 일정시간동안 전력획득모듈에 공급하여 방전되어 있는 배터리가 완충될 때까지의 시간을 측정하였다. 충전조건은 시스템 링크버짓의 거리 5 m에서 입사되는 전력으로 10 dBm을 가정하여 배터리를 방전상태에서 완충시키는데 걸리는 시간을 측정하였다. 그 결과로 식 (3)과 같이 충전 시간은 배터리의 용량에 비례함을 확인 할 수 있다. 본 실험은 입사전력에 따른 배터리 충전 경향을 보기 위한 실험이기 때문에 전력전송 모듈을 장시간 동작시키는 방법 대신 Signal Generator로 일정한 전력을 공급하는 방법으로 진행하였다. 그리고 충전전류가 적으므로 배터리 용량이 100 mAh 이상 된다면 충전시간이 오래 걸릴 수 있기 때문에 시중에서 구할 수 있는 리튬폴리머의 용량 중 적은 용량인 60 mAh의 배터리를 적용하여 실험을 진행하였다.

리튬계열 배터리의 특성으로 2 V이하로 전압이 떨어지게 되면 리튬 cell 자체가 파손되어 사용할 수 없게 되므로 배터리에 PCM(Protection Circuit Module) 회로를 달게 된다. 따라서 배터리의 방전전압은 PCM이 동작한 전압부터 시작된다. 리튬 배터리의 방전 특성상 방전전압은 3 V이하부터 급격하게 떨어지게 되므로 PCM이 동작한 전압을 방전전압으로 보아도 무방하다. 리튬계열 배터리의 완충전압은 4.2 V로 차져칩에서 완충전압이 되면 배터리를 충전전류와 차단시켜 과충전이 되는 것을 방지한다.

방전전압부터 완충전압까지 전압의 변화를 그림 6의 그래프와 같이 관찰하며 배터리의 충전상태를 측정하였다. 측정결과로 배터리의 전압은 평균 3.8 V 이상을 유지하였으며 배터리의 충전완료는 배터리의 충전전압이 차져칩에서 제어하는 완충전압인 4.188 V가 되었을 때 배터리의 전압이 일정하게 유지되는 것으로 확인 할 수 있다. 60 mAh의 배터리를 완충시키는데 까지 약 55 시간이 걸렸다. 이는 약 1.1 mA로 배터리에 일정하게 공급해 준 시간과 같으므로 시스템 링크버짓에 비교하여 전력획득모듈이 배터리를 충전하는 결과가 일치함을 나타낸다.

완충된 배터리를 20 mA로 소모시켜 방전까지 걸리는 시간을 측정하여 센서노드가 소모할 전력에 대한 배터리가 방전되는 시간을 측정 하였다. 이 때 소모전류는 TI사의 CC2420 트랜시버의 소모전류를 기준으로 하였다. 측정한 결과는 그림 7의 그래프와 같다. 배터리의 전압은 평균 3.8 V 정도를 유지하다가 3.1 V 근처에서 급격하게 전압이 떨어지면서 PCM의 차단기능이 동작하였다. 완충된 배터리를 20 mA의 일정한 전류로 소모시켜 PCM이 동작하는 방전전압까지 도달하는데 걸린 시간은 약 3 시간이 걸렸다. 이는 60 mAh 용량의 배터리를 20 mA의 전류로 소모시킨 이론적인 시간과 같다. 이론값과 실험값의 비교로 배터리로 충전하고 이를 소모하여 방전하는 배터리 충방전 효율은 100 %에 가까운 것을 확인 할 수 있다.

나. 단위시간 충전에 따른 사용가능시간 측정

RF 무선전력전송 시스템을 이용해 배터리에 충전된 전력이 일정한 전력을 소비하는 센서노드가 어느 정도의 듀티사이클로 동작을 할 수 있는지 알아보기 위한 실험으로 단위시간 충전에 따른 배터리 전력의 사용가능한 시간을 측정하였다. 배터리가 방전상태에서 완충까지의 충전이 아닌 방전상태에서 일정시간 동안만 충전하여 20 mA의 일정한 전류로 어느 정도의 시간동안

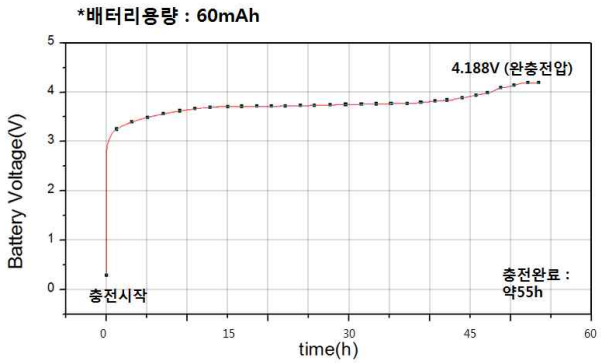

그림 7. RF 전력을 이용한 배터리 충전 곡선
Fig. 7. Using RF-power battery charging curve.

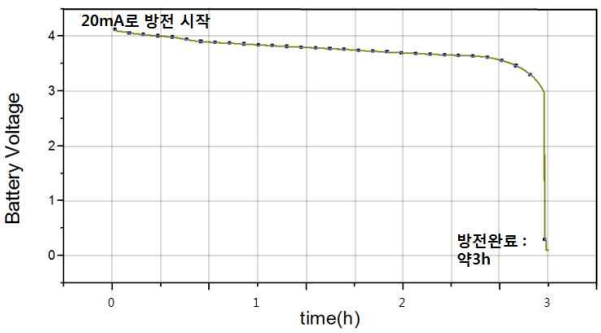

그림 8. RF 전력을 이용한 배터리 방전 곡선
Fig. 8. Using RF-power battery dis-charging curve.

표 5. 단위시간 별 충전된 전력의 20 mA 소모전류로 사용가능한 시간

Table 5. Available time to 20 mA current consumption per hour electricity charged.

충전조건 (거리/시간)	20mA 방전시간
5m/5분	24.5sec
7m/5분	16.9sec
10m/5분	16sec

충전조건 (거리/시간)	20mA 방전시간
5m/10분	38.5sec
7m/10분	30.3sec
10m/10분	25.4sec

사용할 수 있는지에 대한 실험이다. 실험은 5 m, 7 m, 10 m의 거리에서 5 분, 10 분 동안 전력전송모듈과 전력획득모듈간의 충전을 통해 충전된 배터리를 20 mA로 방전시켜 배터리 전력이 유지되는 시간을 측정하였다. 측정 결과는 표 5에 나타내었다.

측정은 세 번의 측정된 결과를 평균하여 나타내었다. 5 m에서 5 분 동안 충전한 결과를 보면 이론값과 거의 같게 나왔고 10 분 충전한 결과는 약 10 초가 모자라게 나왔다. 실내에서 실험하였기 때문에 일정한 값이 아닌 약간 변동되는 값의 결과가 나왔다.

측정값은 충전시간에 따라 충전된 전력과 소비할 수 있는 시간이 비례하지 않음을 보였다. 5 분 충전한 전력과 10 분 측정한 전력이 같다면 사용가능한 시간도 2배의 차이를 보여야 하는데 5 m에서는 11.5 s, 7 m에서는 3.7 s, 10 m에서는 6.6 s의 시간이 덜 사용됐음을 보인다. 계산된 충전전류의 오차도 실제 측정값과 오차가 있다. 긴 시간동안 배터리를 충전한 전류 값은 일정한 값을 보인데 비해 방전되었던 배터리를 짧은 시간동안 충전한 전류 값은 오차를 보인다. 이는 배터리의 초기 충전 구간에 따른 변동 폭이 큰 전압 때문에 충전되는 전력이 오차를 내는 것으로 유추할 수 있다. 이 오차값을 줄이기 위해 작은 용량의 배터리를 사용하여 충전되는 전력과 시간을 전압이 안정된 구간에서 측정하는 방법이 있다.

다. 배터리 충전량에 따른 센서노드 송신주기

센서노드가 정보를 전송하는데 쓰이는 소모전류를 통해서 센 서노드의 송신주기를 전력전송모듈의 전력공급과의 전력전송주기와 비교하여 산출 할 수 있다.

“Experimental Analysis of Wireless Sensor Nodes Current Consumption” [8]에서 예시로 든 배터리의 전류파형으로 센서노드가 소모하는 전력을 예상하고 송신주기를 결정하기 위해 그림 8에 데이터 전송시 사용되

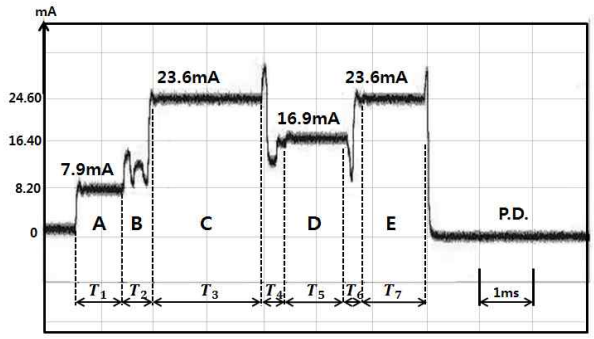

그림 9. 배터리 전류파형 @ 출력전력 = -25dBm, 시간 길이 : T1= 0.84 ms, T2= 0.58ms, T3=2.00ms, T4= 0.49ms, T5=1.1ms, T6=0.36ms, T7=1.07ms. 총 송신시간 : TA=T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7= 6.44 ms

Fig. 9. Battery current waveform at -25dBm output power. Time values are: T1= 0.84 ms, T2= 0.58ms, T3=2.00ms, T4= 0.49ms, T5=1.1ms, T6=0.36ms, T7=1.07ms. The sum is the activity-time TA=T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7= 6.44 ms [9].

는 소모되는 배터리의 전류파형을 예시로 나타내었다. 이는 CC2420의 전류소모를 기준으로 하였다.

구간 A는 마이크로컨트롤러가 웨이크업 하여 정보전송을 시작하는 구간이다. 구간 B는 트랜시버가 웨이크업 하는 구간이고 구간 C는 통신을 하는 구간으로 SPI 통신을 수행한다. 구간 D는 출력을 내보내는 구간이고 구간 E는 트랜시버가 파워모드로 들어가기 전 다음 송신을 준비하는 구간이다. 그러고 나서 슬립모드로 들어가게 된다. 이렇게 한 번의 송신 주기가 이루어지며 그 시간은 총 6.44 ms 이다. 이 구간동안 사용하는 전류를 대략 22 mA로 설정하고 송신주기를 결정하겠다. 슬립모드에서는 거의 전류를 소모하지 않으므로 송신주기 결정에서는 고려하지 않는다.

식 (4)와 같은 방법으로 전류와 시간의 곱으로 사용하는 배터리에서 사용하는 전류량을 결정할 수 있고 여기에 시간당 동작 빈도수를 고려하여 시간당 소비전류량을 계산할 수 있다. 그 계산값은 표 6과 같다.

여기에 추가되는 센서의 소비전류와 배터리 잔량정보를 제공하는 기능이 있을 수 있다. 추가로 소모되는 전류는 웨이크업 되었을 때 같이 웨이크업 되어 전류를 소비한다고 가정하고 표 6에 송신에 따른 소모전류와 같이 고려하였다. 센서는 종류에 따라 소모전류가 수십 μA부터 수십 mA까지 다양하다. 여기에서는 온도, 습도 센서로 사용되는 HUMIREL사의 HTM1735

표 6. 동작 빈도수에 따른 송신, 센서, 배터리정보 소비전류량
Table 6. Amount of current consumption on the frequency of transmission of action.

송신 소모전류 (mA)	센서 소비전류 (mA)	배터리 정보소모 (μA)	시간 (ms)	빈도수 (회)	총 소비전류량(mAh)	송신 단위시간
22	4	80	6.44	1	0.000047	1시간
22	4	80	6.44	6	0.000280	10분
22	4	80	6.44	60	0.002799	1분
22	4	80	6.44	360	0.016796	10초
22	4	80	6.44	720	0.033591	5초
22	4	80	6.44	1800	0.083978	2초
22	4	80	6.44	3600	0.167955	1초

표 7. 사용시간에 따른 소비전류량
Table 7. Amount of current consumption at the time of use.

송신단 위시간	소비전류량 (mAh)	사용시간에 따른 소비전류량		
		1 DAY(mAh)	1 MONTH(mAh)	1 YEAR(mAh)
1시간	0.000039	0.00094	0.028	0.337
10분	0.000236	0.00566	0.170	2.039
1분	0.002361	0.057	1.7	20.4
10초	0.014168	0.34	10.2	122.4
5초	0.028336	0.68	20.4	244.8
2초	0.070840	1.70	51	612
1초	0.141680	3.40	102	1224

표 8. 전력획득모듈의 충전시간당 충전전류량
Table 8. Charge per hour of electricity charging power harvesting module.

충전전류(mA)	충전시간(분)	충전전류량(mAh)
1.0	1	0.0167
1.0	5	0.083
1.0	10	0.167
1.0	1	1

센서를 기준으로 하였다. 그리고 배터리정보를 제공하는 칩으로 TI사의 bq26231 칩의 소모전류를 기준으로 하였다. 모든 소모전류를 고려한 소모전류량을 표 6에 나타내었다.

표 6에서 1 시간당 1 회의 빈도수로 송신 할 때의 소비전류량부터 1 초에 1 번 총 3600 회의 빈도수로 송신할 때의 소비전류량을 확인 할 수 있다. 이 소비전류량으로부터 사용시간에 따른 소비전류량을 표 7처럼 계산할 수 있다. 표 7에는 소비전류량에 따라서 1 일, 30 일, 1 년 동안 예상되는 소비전류량을 나타낸다. 이를 표 8에 나타낸 전력획득모듈이 충전할 수 있는 충전전력과 비교하여 송신주기에 따라 소비되는 전력을 RF 무선전력전송 시스템을 적용하는 시간을 산출 할 수 있으며 이를 이용해 배터리 전력을 유지시킬 수 있다.

위와 같이 동작 빈도수에 따른 송신, 센서, 배터리정보 소모, 소비전류량을 알아보았고 이를 통해 사용시간에 따른 소비 전류량과 전력획득모듈로 1 mA의 전류를 충전한다고 했을 시에 충전시간에 따른 충전 전류량과 비교해 보았다. 이를 통해서 센서노드에 적용시킬 수 있는 충전 시간과 전류량을 예상할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 RF 전력을 이용한 무선전력전송 시스템으로 센서노드의 배터리 전력을 유지시키기 위한 전력획득모듈을 설계 및 구현하고 실제 실험을 통해 시스템을 검증하였다.

센서모듈이 환경정보를 센싱하고 정보를 전송하는데 소모하는 전력과 자연 방전되는 배터리 전력을 RF 무선전력전송을 이용하여 일정한 레벨로 유지시키며 센서노드의 배터리 교체 주기를 반영구적으로 늘림으로써 USN 산업의 신뢰성과 적용가능성을 높여 USN 산업 활성화에 기여할 수 있는 방안을 제시하였다. 이는 배터리 교환이 필요 없음을 의미 하며 센서노드간 배터리 방전에 의한 시스템 비 가동 시간을 제거함으로써 USN 시스템을 최적화 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 RF 무선전력전송 시스템은 30 W 출력의 전력전송모듈과 거리 5 m에서 입사된 10 dBm의 전력을 4.2 V의 1 mA 이상의 전류로 배터리에 충전시킬 수 있다. 또한 센서노드의 정보 송신주기에 따른 소모전류량을 무선으로 배터리에 충전시킬 수 있는 충전전류량과 비교하여 센서노드의 적용가능성을 확인하였다.

추가적으로 보완할 사항으로 배터리의 잔량정보를 센서노드에 제공하여 보다 효율적인 배터리 관리가 가능하도록 구성할 수 있는 부분과 다양한 종류의 센서노드 간의 소모 전력과 충전 필요한 전력량에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 센서노드에 적용성을 높이기 위해서 안테나를 칩 안테나를 적용하여 획득 모듈의 전체적인 크기를 줄이는 것도 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업 일환

으로 수행 되었습니다 (과제번호 10033845) 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] R.-G. Lee, K.-C. Chen, C.-C. Lai, S.-S. Chiang, H.-S. Liu, and M.-S. Wei, " backup routing with wireless sensor network for bridge monitoring system," Measurement, vol. 40, pp. 55-63, 2007.
[2] 박강호, 최낙진, 양우석, 이홍열, 이상균, 최창억, 김종대, "스마트 빌딩용 센서 기술 현황 및 전망", ETRI, 전자통신동향분석 Vol.24. No6, 2009.12
[3] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, "무선 전력 전송 기술", ETRI, 전자통신동향분석 Vol.23, No.3, 2008.12, pp.59-69
[4] 이진호, 최훈, 백윤주, "무선 센서 네트워크 환경에서의 에너지 효율성을 고려한 태스크 스케줄링 기법", 한국통신학회논문지 06-9 Vol.31 No.9A
[5] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), New York, NY, USA, June 2002.
[6] S. R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, and S. Venkatesan, "Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations," in Proceedings of IEEE Globecom 2003, vol. 1, San Francisco, CA, December 1 - 2003, pp. 377 - 81
[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Friis_transmission_equation
[8] 900MHz 대역 WPAN주파수 활용현황. IT Standard & Certification, pp71-76, Jan. 2009
[9] L. Barboni, M. Valle, "Experimental Analysis of Wireless Sensor Nodes Current Consumption", The 2nd International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2008, pp 401-406, Aug. 2008.

저 자 소 개

정 원 재(정회원)
2010년 국민대학교 전자공학과 학사졸업
2010년~현재 국민대학교 전자공학과 석사과정
<주관심분야: RFIC, 무선전력 시스템, 시스템>

박 준 석(정회원)-교신저자
1991년 국민대학교 전자공학과 졸업
1993년 국민대학교 전자공과 석사졸업
1996년 국민대학교 전자공학과 박사졸업
2003년~현재 국민대학교 전자공학과 교수
<주관심분야: RFID USN 통합 네트워크를 위한 센서노드 개발, 모바일 RFID 산업화, 무선전력전송 시스템, U-city, 지능형 가변안내표지판 개발, 전기자동차 교통안전 융합체계 기술 개발>