

멀티 홉 무선 센서 네트워크를 위한 부호화된 FSK 시스템의 성능 해석

Performance Analysis of Coded FSK System for Multi-hop Wireless Sensor Networks

오규태*, 노재성**

Kyu-Tae Oh*, Jae-Sung Roh**

요 약

마이크로 센서 소자와 무선 네트워크 기술의 발전으로 인하여 에너지 효율적이고 저가격의 무선 센서 노드의 개발이 가능하게 되었다. 본 논문에서는 낮은 전력 소모와 우수한 BER(Bit Error Rate) 성능을 위해 FEC 기술을 적용한 FSK 모뎀 기반의 멀티 홉 무선 센서 네트워크를 제안한다. FEC 기술은 부호화 및 복호화를 위한 추가의 전력을 필요로 하며 센서 노드안에 구현하기 위한 복잡한 기능을 필요로 한다. 성능 평가를 위하여 본 논문에서는 채널 파라미터, 홉의 수, 전송 비트의 수, 노드사이의 거리를 함수로 하여 수신된 비트 및 부호어의 확률을 계산하였다.

Abstract

Research advances in the areas of micro-sensor device and wireless network technology, has made it possible to develop energy efficient and low cost wireless sensor nodes. In this paper, the forward error control (FEC) scheme for lower power consumption and excellent BER(Bit Error Rate) performance during transmission propose in multi-hop wireless sensor network based on FSK modem. The FEC technique uses extra processing power related to encoding and decoding, it is need complex functions to be built into the sensor node. The probability of receiving a correct bit and codeword for relaying a frame over h nodes to the sink node is calculated as a function of channel parameter, number of hops, number of bits transmitted and the distance between the different nodes.

Key words : FSK Signal, Multi-hop, Wireless Sensor Network, Forward Error Correction

I. 서 론

국내 IT 산업의 발전을 위하여 정보통신부에서는 IT 839 전략을 발표하였으며 여기에는 언제, 어디서나, 임의의 장치를 사용하여 원하는 서비스를 누구라도 사용할 수 있는 유비쿼터스 무선 센서 네트워크

(Ubiquitous Wireless Sensor Network)를 IPv6(Internet Protocol v6)와 BcN(Broadband Convergence Network)과 더불어 3대 인프라로 정의하고 있다. 유비쿼터스 무선 센서 네트워크는 적은 메모리, 배터리 용량의 제한, 컴퓨팅 성능의 제약 등 제한적인 하드웨어 자원을 가진 수많은 무선 센서 노드들이 무선 통신으로

* 대림대학 전자정보통신계열(Division of Electronics Information and Communication, Daelim College)

** 서울대학교 정보통신과(Dept. of Information and Communication Eng., Seoul College)

· 제1저자 (First Author) : 오규태

· 접수일자 : 2007년 11월 5일

거미줄처럼 연결된 거대한 무선 네트워크라고 볼 수 있다. 최근에는 무선 통신과 전자 분야의 발달로 저가격, 낮은 소모 전력, 저용량의 무선 센서 노드가 개발되고 있다. 무선 센서 노드는 군사 지역이나 보안 지역에서 다양한 환경의 모니터링(온도, 습도, 화재) 및 재난 모니터링 등 다양한 분야에 적용이 가능하다.

센서 네트워크는 무수히 많은 무선 센서 노드들과 무선 센서 노드들로부터 데이터를 받아서 사용자에게 전해주는 무선 싱크 노드로 구성된다. 사람이 직접 원하는 위치에 센서 노드들을 놓기도 하지만, 노드의 수와 관심 지역의 근접성과 같은 문제로 보통은 관심지역에 임의로 대량 뿌려진다. 이렇게 임의로 뿌려진 센서 노드들은 서로 통신을 하며 멀티 홉 무선 네트워크를 구축하고 수집된 정보를 싱크로 전달한다. 무선 센서 네트워크에서는 무선 센서 노드의 에너지 소모에 따른 네트워크의 수명을 늘리는 것이 중요한 연구 과제이다. 무선 센서 노드는 작은 크기 때문에 제한된 전원을 가지고 있고 넓은 지역에 다량으로 분포되기 때문에, 배터리를 교환하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 주어진 배터리 용량을 이용하여 최대의 통신망 동작 시간 및 신뢰성이 보장된 무선 센서 노드의 구성에 대한 연구와 에너지의 소모량과 네트워크의 성능 측면의 문제를 함께 고려하여야 한다 [1]-[3].

본 논문에서는 부호화를 적용한 무선 센서 네트워크의 성능을 3가지 상태에 따라서 오울 성능을 분석하고 상호비교를 수행하였다. 무선 센서 네트워크의 3가지 상태는 (1) 근원지 노드에서 목적지 노드까지 직접 전송, (2) 근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거쳐서 h -홉 전송, FEC 복호화는 목적지 노드에서만 수행, (3) 근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거쳐서 h -홉 전송, FEC 복호화는 각각의 노드에서 모두 수행하는 경우를 고려하였다. 무선 센서 노드를 위한 디지털 변조 방식으로는 BFSK(Binary Frequency Shift Keying) 신호를 고려하였으며 정합필터를 사용한 수신방식을 고려하였고 무선 센서 노드 사이의 홉은 선형적인 배치를 가진 경우를 가정하였다. 그림 1은 무선 센서 네트워크상에서 센싱 데이터의 전달 구조를 나타내고 있다.

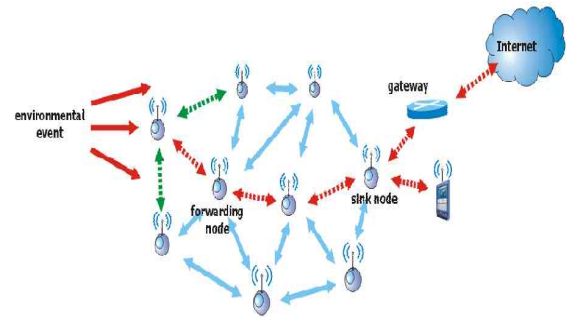


그림 1. 무선 센서 네트워크의 센싱 데이터 전달 구조
Fig. 1. Sensing Data Transmission Structure in Wireless Sensor Network

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 기존의 무선 센서 네트워크의 구조 및 개념에 대하여 살펴보고, 3장에서는 센서 노드에 적용한 디지털 FSK 변복조 방식에 따른 시스템의 성능을 분석한다. 그리고 무선 센서 네트워크에서의 필요한 부호화 기법의 적용과 그에 따른 성능 요구사항에 대하여 살펴보고, 본 논문에서 제안하는 부호화 기법을 적용한 멀티 홉 무선 센서 네트워크의 오울 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 4 장에서는 본 논문의 결론에 대해서 살펴본다.

II. 유비쿼터스 무선 센서 네트워크의 구조 및 기능

무선 센서 네트워크를 통해서 사물이 인간과 같은 다른 사물을 인식하고 주변 환경을 감지함으로써 무선 네트워크를 통해서 언제, 어느 곳에서든 정보를 확인하고 활용할 수 있게 한다. 센서 네트워크는 유비쿼터스 컴퓨팅 구현을 위한 기반 네트워크로 초경량, 저전력의 많은 센서들로 구성된 무선 네트워크이다 [4],[5]. 하나의 네트워크로 연결되어 있는 수많은 센서 노드들이 지리적, 환경적 변화를 감지하여 베이스 스테이션으로 그 정보를 전달한 후 센서 네트워크 서버를 통해 사용자에게 전달되는 방식으로 정보 수집이 이루어진다. 무선 센서 네트워크의 구성은 센서 노드(Sensor Node)와 싱크 노드 (Sink Node)로 구성된다. 무선 센서 네트워크 내부의 센서 노드에서 감지된 데이터는 싱크 노드에 의하여 수집되어 인터넷 등

의 외부 네트워크를 통하여 사용자에게 제공된다. 싱크 노드는 센서 네트워크 내의 무선 센서 노드들을 관리하고 제어하며 무선 센서 노드들이 계측한 데이터를 수집하고 외부 네트워크로의 게이트웨이 역할을 수행한다. 그림 2의 센서 네트워크의 프로토콜 스택은 물리 계층, 데이터 링크 계층, 네트워크 계층, 응용 계층의 4 계층을 기본으로 센서 노드 시스템의 S/W 계층을 구성하고 있다.

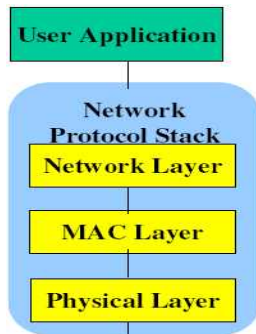


그림 2. 센서 노드 시스템의 S/W 계층
Fig. 2. S/W Layer of Sensor Node System

무선 센서 네트워크의 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 무선 센서 노드는 저가의 초소형 저전력 장치로 소비전력, 컴퓨팅 능력, 메모리가 제한
- 구성되는 센서의 수가 많고 필드에 센서들이 랜덤하게 배치되기 때문에 센서 간에 토폴로지를 예상하기 어렵고 센서 네트워크의 토폴로지가 쉽게 변함
- 감지된 정보를 디지털 신호로 변환하기 위한 ADC(Analog to Digital Convertor), 데이터 가공 처리를 위한 프로세서와 메모리, 전원 공급을 위한 배터리, 그리고 데이터 송수신을 위한 무선 트랜시버로 구성되며 무선 센서 노드의 구조는 마이크로프로세서, 데이터 저장장치, 센서, 액추에이터, 데이터 전송장치 및 에너지 공급 장치로 구성됨
무선 센서 노드의 중요 구성 요소인 연산 장치와 무선 통신 모듈의 기능은 다음과 같다.
- 연산 장치: 센서 노드는 데이터 습득, 수집된 데이터의 가공 및 신호처리와 데이터 통신 등의

기능을 수행하며 범용 마이크로프로세서와 마이크로 컨트롤러들이 센서 하드웨어에 이용되고 있다.

- 무선 통신 모듈: 센서 노드의 무선 통신을 위한 기술로 RF는 가장 널리 쓰이는 통신 기술로 많은 에너지를 소모한다는 단점이 있다. 따라서 저전력으로 작동 가능한 통신 칩을 제작하기 위해 파워 소모 분석, 저전력 변복조 기법, 최적의 데이터 전송률 및 전송 파워에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 각 센서 노드들의 동작 모드의 동적인 변환을 통해 에너지 소모를 최소화하는 저전력 RF 통신 칩에 대한 기술 등이 연구되고 있다.

III. 부호화된 무선 센서 네트워크의 성능

본 논문에서는 FEC를 적용한 무선 센서 노드의 성능을 멀티 홉의 구조 및 채널 특성에 따라서 BER 성능을 비교 분석한다.

3-1 부호화 기법

센서 노드 사이의 무선 전송 도중에 데이터 비트들 중 하나 이상에서 에러가 생기면 수신측에서는 에러를 알아낼 길이 없으므로 잘못된 정보를 받아들리게 된다. 따라서 오류가 생긴 비트를 수신측에서 검출 내지는 정정할 수 있도록 하기 위해 송신측에서는 데이터를 채널 부호화 과정을 거친다. 이 경우 채널 부호화한 데이터를 부호어라고 부르며 무선 채널상에서 발생하는 오류를 제어할 수 있도록 하기 위해서는 정보 비트에 리던던시 비트를 의도적으로 부가하여 부호어의 길이를 늘려주며 리던던시 비트들에 의해 무선 채널에서 발생하는 오류가 제어된다. 오류 제어 부호화는 비트 오류를 검출한 수신기가 송신측에 데이터 재전송을 요구하지 않고 오류를 일으킨 비트를 정정할 수 있으며 이를 순방향 오류 정정(Forward Error Correction: FEC)이라고 한다 [6],[7].

일반적으로 길이 k 의 정보어에 $n-k$ 개의 리던던시 비트를 더하여 길이 n 의 부호어로 만든 구조를 (n, k) 블록 부호라 하며 부호의 효율을 나타내기 위해 부호

율(code rate) R_c 를 정의하며 부호율이 작을수록 비효율적인 전송이 되지만 오류 제어의 기능은 증가한다.

$$R_c = \frac{k}{n} \quad (1)$$

FEC 시스템에서 전송하고자 하는 입력 정보 비트는 비트율(Bit Rate)이 DR_b 이고 부호기는 정보 비트를 부호율(Code Rate)이 R_c 인 (n, k) 블록 부호로 변환시키면 채널상에서의 비트율 DR_c 는 다음과 같다.

$$DR_c = \binom{n}{k} DR_b = \frac{DR_b}{R_c} \quad (2)$$

3-2 성능 해석

2진 FSK 방식에서는 반송파의 순서 주파수가 정보부호에 대응하며 2진 FSK 파형은 그림3과 같이 반송 주파수가 서로 다른 두 개의 OOK(On-Off Keying) 파형으로 분해할 수 있다. 따라서 2진 부호를 전송하기 위해서는 0과 1에 대해 각기 다른 주파수를 할당한다.

$$\phi_{\text{FSK}}(t) = \begin{cases} \phi_0(t) = A \cos \omega_0 t, & 0 \leq t \leq T_b \text{ (0에 대해)} \\ \phi_1(t) = A \cos \omega_1 t, & 0 \leq t \leq T_b \text{ (1에 대해)} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, ω_0, ω_1 는 반송파의 주파수, T_b 는 전송하는 비트의 주기를 나타낸다.

2진 FSK 파형은 스위치 회로로써 간단히 구현할 수 있으며 2진 FSK의 전력 스펙트럼은 그림 3과 같으며 전송대역폭 B_T 는 근사적으로 다음과 같다.

$$W_T \cong \omega_1 - \omega_0 + \frac{4\pi}{T_b} \text{ (rad/sec)}, \quad B_T \cong f_1 - f_0 + \frac{2}{T_b} \text{ (Hz)} \quad (4)$$

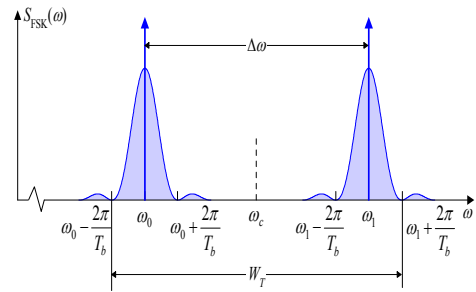


그림 3. 2진 FSK 신호의 전력 스펙트럼
Fig. 3. Power Spectrum of Binary-FSK Signal

2진 FSK 신호의 복조에는 주파수 변별기, 직교 검파기, 영교차 검파기, PLL을 이용한 검파기 등이 모두 사용될 수 있으나 성능을 위해서 정합 필터를 사용한다. 2진 FSK 정합필터 검파기를 통한 비트의 평균 에너지 E_b 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_b &= \frac{1}{2} \int_0^{T_b} [\phi_0^2(t) + \phi_1^2(t)] dt \quad (5) \\ &= \frac{A^2}{2} \int_0^{T_b} [\cos^2 \omega_0(t) + \cos^2 \omega_1(t)] dt \\ &= \frac{A^2 T_b}{2} \end{aligned}$$

여기서 A 는 2진 FSK 신호의 진폭이다.

그리고 2진 FSK 신호 사이의 상관 계수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\int_0^{T_b} \phi_0(t) \phi_1(t) dt}{E} = \frac{A^2 \int_0^{T_b} \cos \omega_0 t \cos \omega_1 t dt}{A^2 T_b / 2} \\ &= \frac{\sin(\omega_1 + \omega_0) T_b}{(\omega_1 + \omega_0) T_b} + \frac{\sin(\omega_1 - \omega_0) T_b}{(\omega_1 - \omega_0) T_b}. \quad (6) \end{aligned}$$

센서 노드의 수신기가 가능한 최대의 성능을 발휘하기 위해서는 2진 FSK 신호 사이의 상관 계수가 0에 가깝도록 하는 것이 유리하다. 따라서 2진 FSK 신호 사이의 비트 신호 대 잡음 전력비 γ , 상관 계수 ρ , 통신 거리 d 및 전파계수 η 에 따른 2진 FSK 신호의 비트 오류 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_b &= Q\left(\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2N_o}d^{-\eta}}\right) \\
 &= Q\left(\sqrt{\frac{\gamma(1-\rho)d^{-\eta}}{2}}\right) \\
 &= P_b(\gamma,\rho,d,\eta)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

t-비트 에러를 정정할 수 있는 부호화에서 FEC 디코딩을 거친 후의 부호어 에러 확률은 다음과 같다.

$$P_w(P_b(\gamma,d)) = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} P_b^i(\gamma,d) (1-P_b(\gamma,d))^{n-i}
 \tag{8}$$

근원지 노드에서 목적지 노드까지의 성능 분석을 위하여 3가지 경우를 고려한다. 그림 4는 근원지 노드에서 목적지 노드까지의 멀티 홉/직접 전송 방식을 나타내고 있다.

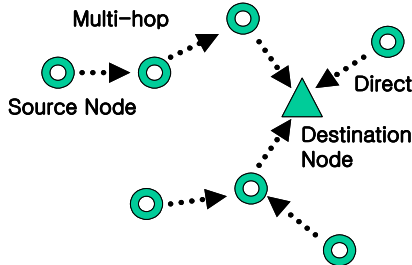


그림 4. 근원지 노드에서 목적지 노드까지의 멀티 홉/직접 전송
 Fig. 4. Multi-hop/Direct Transmission between Source and Destination Node

근원지 노드, 중간 노드, 목적지 노드로 구성된 무선 채널 환경에서 위 3가지 경우의 오율 성능은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_e^{(1)}(\gamma) &= P_w(P_b(\gamma,1)) \\
 P_e^{(2)}(\gamma) &= P_w(1 - (1 - P_b(\gamma/h, 1/h))^h) \\
 P_e^{(3)}(\gamma) &= 1 - (1 - P_w(P_b(\gamma/h, 1/h)))^h
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

그림 5는 신호전력 대 잡음전력비에 따른 부호화된 멀티-홉 무선 센서 네트워크에서의 오율 성능을 나타낸다. 경우 1은 근원지 노드에서 목적지 노드까지 직접 전송하는 경우로 $h=1$ 인 상황이다. 경우 2는

근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거쳐서 $h=2$ 인 홉 전송을 나타낸다. 또한, FEC 복호화는 목적지 노드에서만 수행하는 경우이다. 이 경우에는 중간 보드에서 FEC 복호화를 수행하지 않고 마지막 노드에서만 FEC 복호화를 수행한다. 경우 3은 근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거쳐서 $h=2$ 인 홉 전송을 수행하는 경우이다. FEC 복호화는 각각의 노드에서 모두 수행하므로 경우 1 및 경우 2에 비하여 우수한 BER 성능을 나타내고 있다.

그림 6과 그림 7은 홉의 수 h 에 따른 부호화된 멀티-홉 무선 센서 네트워크에서의 오율 성능을 나타내고 있다. 그림 6은 경우 2에 해당하므로 FEC 복호화는 마지막 노드에서 수행되며 그림 7은 경우 3에 해당하므로 각각의 노드마다 FEC 복호화가 수행된다. 그림 6과 그림 7의 결과를 통하여 홉 마다 FEC 복호화를 수행함으로써 BER 성능은 개선되고 있음을 알 수 있다. 또한 홉의 수 h 가 증가함에 따라서 경우 2 보다는 경우 3에서 우수한 BER 결과를 보임을 알 수 있다.

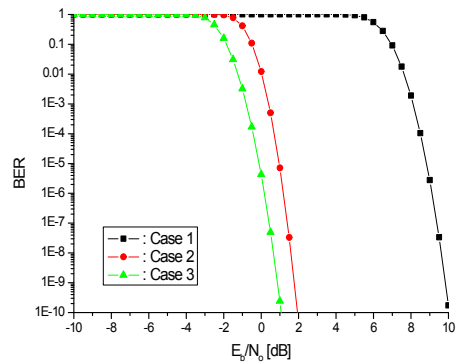


그림 5. 신호대 잡음 전력비 E_b/N_o [dB]에 따른 부호화된 멀티-홉 무선 센서 네트워크에서의 오율 성능

Fig. 5. BER Performance of Coded Multi-hop Wireless Sensor Network according to E_b/N_o [dB]

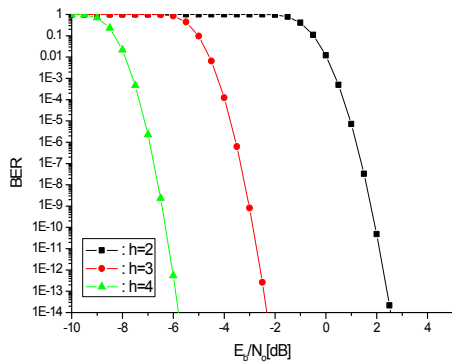


그림 6. 홉의 수 h 에 따른 부호화된 멀티-홉 무선 센서 네트워크에서의 오율 성능(경우2)

Fig. 6. BER Performance of Coded Multi-hop Wireless Sensor Network according to h (Case 2)

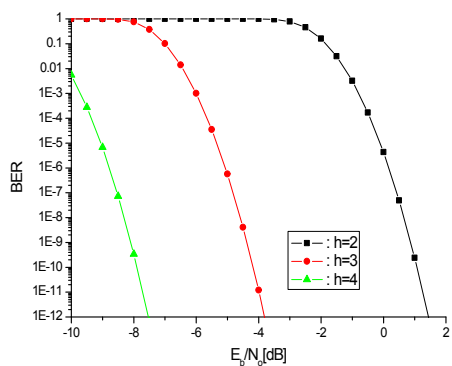


그림 7. 홉의 수 h 에 따른 부호화된 멀티-홉 무선 센서 네트워크에서의 오율 성능(경우3)

Fig. 7. BER Performance of Coded Multi-hop Wireless Sensor Network according to h (Case 3)

V. 결 론

본 논문에서는 부호화를 적용한 무선 센서 네트워크의 성능을 3가지 상태에 따라서 오율 성능을 분석하고 성능을 비교하였다. 무선 센서 네트워크의 3가지 상태는 (1) 근원지 노드에서 목적지 노드까지 직접 전송, (2) 근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거쳐서 h -홉 전송(FEC 복호화는 목적지 노드에서만 수행), (3) 근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거쳐서 h -홉 전송(FEC 복호화는 각각의 노드에서 모두 수행)하는 경우를 고려하였다.

무선 센서 노드를 위한 디지털 변조 방식으로는 BFSK 신호를 정합필터를 사용한 수신방식을 고려하였다. 성능 분석 결과, 근원지 노드에서 목적지 노드까지 중간 노드를 거치면서 h -홉 전송하고 FEC 복호화는 각각의 노드에서 모두 수행하는 경우가 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 서울시 산학연 협력사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] I.F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102--114, Aug 2002.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks," *In 21st Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, volume 3, pages 1567-1576, June 2002
- [3] Y. Sankarasubramaniam, I. F. Akyildiz, and S. W. McLaughlin, "Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks," *Proceedings of 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications SNPA'03*, 2003.
- [4] R. Min and A. Chandrakasan, "Energy-centric enabling technologies for wireless sensor networks," *IEEE Wireless Comm.*, vol. 9, no. 4. pp. 28-39, Aug. 2002.
- [5] M. Zorzi, R.R. Raa, "Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance," *in IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 2, Oct.-Dec. 2003.
- [6] S. Lin and D. J. C. Jr., *Error control coding: fundamentals and applications*, Prentice-Hall, 1983.
- [7] John G. Proakis, *Digital Communication*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2001.

오 규 태(吳圭泰)



1997.2 : 서울산업대학교 전자공학과
학사
 2000.8 : 한국항공대학교 정보통신공
학과 석사
 2004.8 : 한국항공대학교 전자공학과
박사
 2006.2~현재 대림대학 전자정보통
신계열 전임강사

관심분야 : 홈 네트워크, USN/RFID 설계

노 재 성(盧在成)



1990년 : 한국항공대학교 정보통신
공학과 (학사)
 1992년 : 한국항공대학교 정보통신
공학과 (석사)
 2000년 : 한국항공대학교 정보통신
공학과 (공학박사)
 2000~현재 : 서일대학 정보통신과
부교수

관심분야 : 모바일 임베디드 SW, 휴대인터넷, 멀티미디어 콘텐츠, USN/RFID 통신시스템