

차량 접근 경고 시스템을 위한 에너지 효율적 자가 구성 센서 네트워크 모델

An Energy-Efficient Self-organizing Hierarchical Sensor Network Model for Vehicle Approach Warning Systems (VAWS)

신 흥 혈* 이 혁 준**
(Hong-Hyul Shin) (Hyuk-Joon Lee)

요 약

차량 접근 경고 시스템(VAWS: Vehicle Approach Warning Systems)은 급커브 구간에 진입하는 차량에게 반대편 차선의 차량 진입 정보를 운전자에게 제공하여 사고 위험을 줄이는데 도움을 주기 위한 시스템이다. 본 논문에서는 VAWS를 위한 IEEE 802.15.4 기반 계층구조 센서 네트워크 모델을 제안한다. 제안하는 네트워크 모델에서 토폴로지 제어 프로토콜은 네트워크의 생존시간을 지속시킬 수 있도록 자가 구성(self-organizing) 방식으로 트리 기반 토폴로지를 형성한다. 또한, 간단하면서도 효율적인 라우팅 프로토콜은 이 토폴로지를 기반으로 라우팅 테이블을 구성하고 센서 노드에서 생성된 데이터 패킷을 노변 경고 메시지 디스플레이와 연결되어 있는 베이스 스테이션까지 멀티홉 방식으로 전달한다. 이 프로토콜들은 기존의 IEEE 802.15.4 MAC계층에 포함된 확장 MAC 형태로 설계되며, 급커브 구간을 모델링한 시나리오에서의 시뮬레이션을 통하여 제안하는 네트워크 모델이 에너지 효율 및 네트워크 처리량 면에서 높은 성능을 나타냄을 보인다.

Abstract

This paper describes an IEEE 802.15.4-based hierarchical sensor network model for a VAWS(Vehicle Approach Warning System) which provides the drivers of vehicles approaching a sharp turn with the information about vehicles approaching the same turn from the opposite end. In the proposed network model, a tree-structured topology, that can prolong the lifetime of network, is formed in a self-organizing manner by a topology control protocol. A simple but efficient routing protocol, that creates and maintains routing tables based on the network topology organized by the topology control protocol, transports data packets generated from the sensor nodes to the base station which then forwards it to a display processor. These protocols are designed as a network layer extension to the IEEE 802.15.4 MAC. In the simulation, which models a scenario with a sharp turn, it is shown that the proposed network model achieves a high-level performance in terms of both energy efficiency and throughput simultaneously.

Key words: Sensor network, IEEE 802.15.4, topology control, hierarchical multi-hop wireless network, energy-aware routing

† 본 논문은 한국과학재단 특정기초연구(R01-2008-000-12233-0) 지원과 2007년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

* 주저자 : 광운대학교 컴퓨터공학과 박사과정

** 공저자 : 광운대학교 컴퓨터공학과 교수

† 논문접수일 : 2008년 6월 19일

† 논문심사일 : 2008년 6월 25일

† 게재확정일 : 2008년 8월 11일

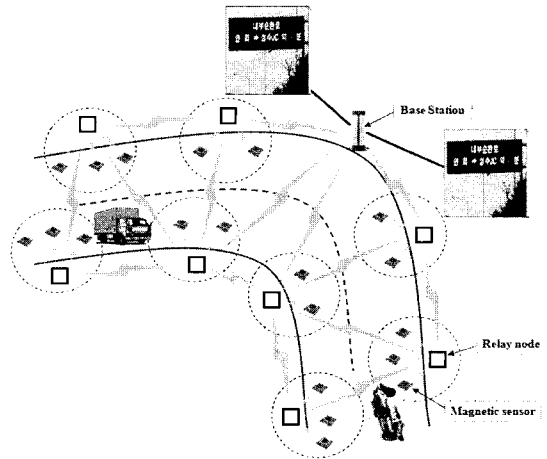
1. 서 론

차량 접근 경고 시스템(VAWS: Vehicle Approach Warning System)은 중앙 분리대가 없는 급커브 구간에서 진입 차량의 시야 확보 미비 및 중앙선 침범으로 인한 사고를 방지하기 위하여 주행 중인 차량에게 반대 차선의 차량 진입 정보 및 교통사고 위험 정보를 제공하는 시스템이다. 차량 접근 경고 시스템의 주요 구성 요소는 차량의 주행 사실과 속도를 감지하는 차량 감지 장치, 경고 메시지 표시 장치, 두 장치간에 데이터를 전달하는 데이터 전송 네트워크 등이 있다. 현재 널리 사용되고 있는 차량 감지 기술로는 비디오, 레이더, 유도(inductive) 전선과 자기(magnetic) 전선 등이 있으나, 매체의 매설 등으로 인하여 설치 및 유지 비용이 높은 것이 단점이다. 최근에는 마그네틱 센서를 이용한 무선 센서 네트워크가 비교적 비용이 저렴한 차량 감지 및 데이터 전달 기술로서 관심을 끌고 있다[1-3].

<그림 1>은 센서 네트워크 기반의 VAWS 구성의 예이다. 본 논문에서 고려한 VAWS는 데이터 생성 및 무선 전송이 가능한 마그네틱 센서 노드, 데이터를 수집하는 베이스 스테이션, 센서 노드와 데이터를 베이스 스테이션간의 무선 멀티홉 전송을 위한 중계 노드, 경고 메시지를 표시할 수 있는 전광판으로 구성되어 있다. IEEE WAVE[4]와 같은 노면 노드와 차량간의 통신이 사용될 경우 경고 메시지는 차량내의 단말장치에 표시될 수도 있다.

일반적으로 센서 노드의 무선 인터페이스는 전송거리(transmission range)가 제한적이다. 따라서 노드 간의 전파 간섭이 적고 에너지 소모량이 적어 생존시간이 긴 장점을 갖는다. 그러나 센서 노드에서 생성된 데이터가 베이스 스테이션까지 직접 전달되지 않을 수 있기 때문에 멀티 홉 전송 방식이 사용된다.

기존 센서 네트워크에서 멀티 홉 전송을 위한 네트워크 구조 및 프로토콜 연구는 오래 전부터 진행되어 왔다[5, 6]. 기존의 센서 네트워크는 일반적으로 네트워크의 구조에 따라 편평 구조 방식과 계층 구조 방식으로 구분될 수 있다. 편평 구조 방식은



<그림 1> 차량 접근 경고 시스템의 예
<Fig. 1> An example vehicle approach warning system

인터넷과 같은 외부 망과의 게이트웨이 역할을 하는 베이스 스테이션과 센서 노드들로 구성되며 센서 노드들은 정보 감지 뿐만 아니라 멀티홉 데이터 전송을 위한 라우터의 기능도 수행한다[7, 8] 이러한 편평 구조 방식은 구성이 쉬운 장점이 있으나 네트워크의 크기가 커짐에 따라 전송 성능이 감소하는 단점이 존재한다[9]. 계층 구조 방식은 일반적으로 센서 노드들 중에 상대적으로 높은 전력을 보유한 노드가 클러스터 헤드로 동작하면서 자신의 클러스터에 속한 센서 노드들의 데이터를 베이스 스테이션으로 전달하는 클러스터 구조를 갖고 있다[10]. 이 방식은 편평 구조 방식에 비해 멀티홉 라우팅 시 전력 소모 효율을 높일 수 있는 장점이 있지만, 클러스터 헤드의 선출 및 공표, 교체에 위한 추가적인 통신 부하가 발생한다.

본 논문에서는 VAWS구조를 위한 IEEE 802.15.4 기반 계층적 센서 네트워크 구조와 네트워크 프로토콜을 소개한다. 본 논문에서 제안하는 네트워크 프로토콜은 토폴로지 제어 프로토콜과 라우팅 프로토콜로 구성되며, 토폴로지 제어 프로토콜은 네트워크의 생존시간을 지속시킬 수 있도록 노드의 잔여 에너지량 등의 척도(metric)가 최적이 되는 트리 기반 토폴로지를 자가 구성 방식으로 구성한다. 라우팅 프로토콜은 토폴로지 제어 프로토콜에 의하여 생성된 토폴로지를 기반으로 라우팅 테이블을 구성

하고 센서 노드에서 생성된 데이터 패킷을 노변 경고 메시지 표시장치와 연결되어 있는 베이스 스테이션까지 멀티홉 방식으로 포워딩한다. 참고로 VAWS 전체 구조와 관련된 내용은 본 논문의 범주에 포함되지 않는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.15.4 표준과 에너지 기반 센서 네트워킹에 대해 살펴보고 3장에서는 계층적 무선 센서 네트워크 모델에 관한 설명을 진행하고 4장에서는 실험 설정 및 결과에 대하여 기술한다. 마지막으로, 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 연구 배경

1. IEEE 802.15.4의 개요

IEEE 802.15.4는 에너지량이 제한적이고 전송 속도의 요구가 낮은 노드들 간에 무선 연결성을 제공하기 위한 무선 통신 네트워크 표준으로서 프로토콜 구조가 간단하고 유연하며 간편한 설치, 신뢰성 있는 데이터 전송, 초근거리 통신, 낮은 배터리 소모량 등의 특징을 갖는다[11].

IEEE 802.15.4는 FFD(Full Function Device), RFD(Reduced Function Device) 등 두 가지 종류의 장치를 정의하고 있다. RFD는 FFD와만 통신을 할 수 있으며, FFD는 다른 FFD들이나 RFD들과 통신할 수 있다. FFD와 RFD가 클러스터를 형성할 수 있으며, 이 클러스터들이 클러스터 네트워크를 형성할 수 있다. 그러나 IEEE 802.15.4에서는 클러스터 네트워크를 형성하는 방법에 대해서는 명시적으로 정의하지 않는다.

IEEE 802.15.4는 두 가지 PHY 옵션을 지원한다. 868/915MHz 대역 PHY는 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 모듈레이션 기법을 사용하며 2.4GHz 대역 PHY는 O-QPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying) 모듈레이션 기법을 사용한다. 표준에서는 총 27개의 채널을 정의하며, 채널에서의 최대 전송속도는 250Kbps이다.

IEEE 802.15.4의 다중 접근 방법은 임의의 시간

슬롯 구조의 CSMA/CA 메커니즘을 기반으로 하고 있으며 비콘(beacon), 데이터, ACK 및 제어 프레임 을 사용한다. 비콘 프레임은 코디네이터로 선출된 FFD가 주기적으로 전송하며, 비콘 요청 제어 프레임 을 수신하였을 때 전송할 수도 있다. 데이터 프레임 은 유저데이터를 전송할 때 사용되며, 페이로드 의 크기는 2-127Bytes 이다. ACK 프레임 은 데이터 및 제어 프레임 전송의 신뢰성을 보장하기 위하여 사용되며 제어 프레임 은 네트워크에 가입(association) 하거나 탈퇴(disassociation)하는 것과 같이 네트워크 를 관리하기 위하여 사용된다.

2. 에너지 기반 라우팅 및 토폴로지 제어

센서 노드들은 일반적으로 배터리 에너지로 동작할 뿐만 아니라 특정 응용사례의 경우 센서 노드 들에게 쉽게 접근할 수 없어 배터리를 교체하는 비용이 높을 수 있다. 그러므로 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 효율적 에너지 소모는 주된 설계 이슈이다. 센서 네트워크에서 에너지 소모를 줄이기 위한 방식을 크게 센서 노드의 배터리 소모를 줄이는 방식과 네트워크에서 소모되는 에너지량을 줄이는 방식으로 분류할 수 있다. 센서 노드의 배터리 소모를 줄이는 방식의 주된 연구 이슈는 센서 노드가 데이터 수집 및 전달과 상관없는 프로세서 동작 및 I/O 장치의 동작 등에서 소모되는 에너지량을 줄이도록 설계하는 것이다[12].

네트워크에서 소모되는 에너지량을 줄이는 방식의 주된 연구 이슈는 패킷을 송신지로부터 목적지 까지 전달하는데 소모되는 에너지량을 최소화 하고 네트워크의 생존시간이 길어지도록 라우팅 프로토콜과 토폴로지 제어 프로토콜을 설계하는 것이다. 네트워크에서 소모되는 에너지량을 최소화하는 기본적인 접근 방법은 경로에 포함된 노드들의 에너지 소모량의 합을 최소화 하는 것이다. V. Rodoplu 등은 Bellman-Ford shortest path 알고리즘에 경로에 포함된 노드들에서 소모되는 에너지량을 척도로 적용하여 네트워크에서 소모되는 에너지량을 최소화 하는 방법을 제안 하였다[13]. 그러나 이 방법은 각

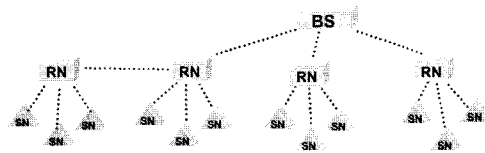
노드들의 잔여 에너지량을 고려하지 않기 때문에 특정 노드에 데이터가 집중 될 경우 해당 노드의 에너지가 빠르게 소모되어 네트워크 분할이 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위한 연구에서는 경로를 선택할 때, 잔여 에너지량이 적은 노드가 포함된 경로는 선택하지 않도록 하고, 상대적으로 많은 에너지를 소모하는 경로를 선택하여 전체 네트워크에서 일정 노드에 에너지 소모가 집중되지 않도록 하였다[14-16]. 그러나 이 방식에서는 데이터 전송에 따른 에너지 소모량을 예측할 때, 통신 부하로 인한 에너지 소모량을 고려하지 않기 때문에 정확한 잔여 에너지량이 반영되지 않는 단점이 있다. 이외에도 에너지 효율적인 브로드캐스트/멀티캐스트 트리를 구성하여 네트워크에서 소모되는 에너지량을 최소화하는 다수의 연구가 존재한다[17-20].

네트워크에서 소모되는 에너지량을 최소화하기 위한 대부분의 토폴로지 제어 프로토콜 관련 연구는 에너지 효율적인 클러스터를 구성하는 방법과 클러스터 헤더를 선출하는 방법에 초점을 두고 있다[21-23]. 클러스터링은 네트워크를 논리적으로 분리함으로써 트래픽의 전송 범위가 제한되어 에너지와 무선 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 본 논문에서 고려한 구조에서는 모든 노드들의 위치가 고정되어 있으며 클러스터 헤더의 역할은 중계 노드가 담당하므로 클러스터 구성 및 헤더 선출을 위한 방법이 필요 없다.

III. 계층적 무선 센서 네트워크 모델

1. 네트워크 구조

<그림 2>는 본 논문에서 고안한 네트워크 구조이다. 3 계층(tier) 계층적 구조를 사용하며 센서 노드(SN), 중계 노드(RN), 베이스 스테이션(BS)로 이루어져 있다. 노드들의 무선 인터페이스는 IEEE 802.15.4가 사용되며, 센서 노드는 IEEE 802.15.4의 RFD, 중계 노드는 IEEE 802.15.4의 FFD를 사용한다. 베이스 스테이션은 두 개의 인터페이스 즉, 중계 노드 및 센서 노드들 간의 통신을 위한 IEEE



<그림 2> 계층적 센서 네트워크 구조
<Fig. 2> The hierarchical sensor network architecture

802.15.4 FFD 인터페이스와 베이스 스테이션 제어 및 모니터 센터 또는 노변 전광판 처리장치와의 연결을 위한 RS-232 또는 이더넷과 같은 유선 인터페이스를 갖는다.

센서 노드들은 차량의 이동을 측정할 수 있는 마그네틱 트래픽 센서를 포함한다. 마그네틱 트래픽 센서는 자기장의 변화를 측정함으로써 차량들의 이동을 감지할 수 있다[24]. 센서 노드들은 도로 포장 하부에 매설되기 때문에 배터리로부터 전원을 공급 받는 것으로 가정하였으며, 따라서 안테나의 사이즈가 제한되고 전송 파워가 낮아 전송 거리가 제한적이다. 또한 센서 노드들은 라우팅 기능이 없으며 중계 노드들과 직접 연결된다. 센서 노드에 의해 감지된 차량 진입 여부 정보는 중계 노드를 거쳐 최종적으로 베이스 스테이션까지 전달된다.

중계 노드는 도로변에 설치되기 때문에 대용량 배터리를 사용할 수 있고, 안테나의 사용이 가능하여 센서 노드보다 전송 거리가 길다. 중계 노드들은 라우팅 기능이 있어 멀티홉 통신으로 주위의 중계 노드들이나 베이스 스테이션에게 패킷을 포워드 할 수 있다. 그러나 중계 노드는 차량들의 이동을 감지하는 센서 모듈이 없어 자체 데이터를 생성하지는 않는다. 또한, 센서 노드들과 중계 노드들은 데이터 트래픽의 최종 목적지가 될 수 없다.

베이스 스테이션은 무제한의 전원을 공급받을 수 있고 네트워크 내에서 가장 큰 시스템 용량을 가지며 IEEE 802.15.4와 유선의 듀얼 인터페이스를 가진다. 베이스 스테이션은 여러 개의 클러스터로 구성되는 전체 네트워크의 코디네이터(first PAN coordinator)로 동작한다. 각 클러스터 내에는 하나의 중계 노드가 클러스터 헤드로서 동작하며, 다수의 센서 노드들이 포함된다. 계층적 센서 네트워크

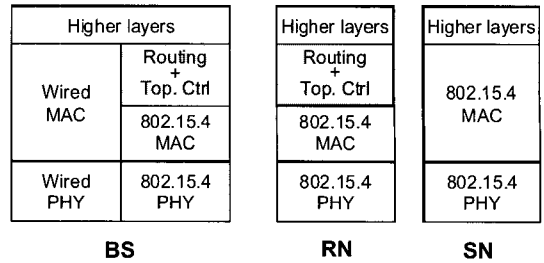
구조는 토폴로지 제어 프로토콜이 네트워크의 생존 시간을 지속시킬 수 있도록 토폴로지를 자가 구성 방식으로 구성한다. 이 토폴로지는 트리 토폴로지로 베이스 스테이션이 루트가 된다. 각 프로토콜의 자세한 설명은 다음절에서 다루도록 한다.

2. 토폴로지 제어 프로토콜

토폴로지 제어는 각 노드가 그 이웃의 노드들과 자가 구성 방식으로 논리적 네트워크 토폴로지를 형성하는 것이다. IEEE 802.15.4 표준에서는 센서 노드들이 클러스터 네트워크를 형성하는 것은 허용하지만 네트워크를 형성하는 프로토콜은 정의되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 센서 노드들이 클러스터 네트워크를 형성할 수 있도록 토폴로지를 제어하는 토폴로지 제어 프로토콜을 제안하였다. 토폴로지 제어 프로토콜은 기존의 IEEE 802.15.4 MAC계층에 포함된 확장 MAC 형태로 설계되었으며 <그림 3>과 같이 라우팅 프로토콜과 MAC 프로토콜 사이에 위치한다. 토폴로지 제어 프로토콜은 네트워크의 생존시간을 증가시키고 패킷 라우팅에 소모되는 에너지를 최소화 할 수 있도록 베이스 스테이션을 루트로 하고 중계 노드들은 트리의 중간 노드, 센서 노드들은 트리의 리프(leaf) 노드로 하는 논리적 트리형태를 조직한다. 이 트리 구조는 베이스 스테이션과 모든 센서 노드들간의 경로를 정의하며 센서 노드들에서 생성된 데이터 패킷은 트리의 에지(edge)를 따라 베이스 스테이션까지 포워딩 된다. 토폴로지 제어 프로토콜의 자세한 동작과정 및 척도에 대한 설명은 아래에서 다루도록 한다.

1) 토폴로지 제어 프로토콜 동작

토폴로지 제어 프로토콜에 의한 토폴로지 형성 과정은 두 단계로 진행된다. 첫 번째 단계에서는 IEEE 802.15.4에 정의된 결합 절차에 따라 중계 노드와 다수의 센서 노드들이 클러스터를 구성하여 네트워크에 다수의 클러스터가 존재하도록 한다. 두 번째 단계에서는 베이스 스테이션을 루트로 하고 중계 노드들은 트리의 중간 노드, 센서 노드들은



<그림 3> 베이스 스테이션, 중계 노드, 센서 노드의 프로토콜 스택

<Fig. 3> Protocol stack for BS, RN, and SN

트리의 리프 노드로 하는 논리적 트리형태를 자가 구성 방식으로 구성한다. 이 단계에서 베이스 스테이션과 트리에 가입한 중계 노드들은 미리 결정된 채널로 비콘을 전송하며, 중계 노드들은 수신된 비콘 정보를 이용하여 부모 노드를 결정하고, 노드 간 부모-자식 관계를 설정하는 토폴로지 가입 절차를 진행하여 트리를 구성한다. 이 과정은 주기적으로 반복된다.

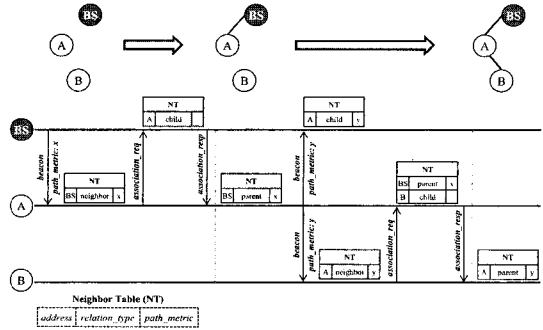
토폴로지 제어 프로토콜은 비콘을 기반으로 동작한다. 비콘은 IEEE 802.15.4 표준에 정의된 비콘과는 다른 토폴로지 제어 프로토콜 메시지로 정의된다. 베이스 스테이션과 중계 노드들은 비콘을 이용하여 1홉 이웃 노드를 식별하며 비콘에 포함된 정보를 기반으로 이웃 테이블(neighbor table)을 작성한다. 이웃 테이블의 각 엔트리는 {*address*, *relation_type*, *path_metric*}의 세 개 필드로 구성되며 *address*는 이웃 노드의 16-bits 주소(address)로 ZigBee 표준에 정의된 *distributed address assignment mechanism*에 의해서 이웃 노드가 할당 받은 주소이다. *relation_type*은 트리 구조에서 비콘을 전송한 노드와 자신과의 결합 관계를 나타내며 *parent*, *child*, *neighbor* 중 하나로 기록된다. 이웃 노드의 *relation_type*이 *neighbor*이면 토폴로지가 변경되었을 때 *parent* 또는 *child*로 변경될 수 있다. *path_metric*은 중계 노드들이 최상의 부모 노드를 결정할 때 사용되며, *path_metric*에는 경로에 포함된 중계 노드 중 잔여 에너지량이 일정 임계값(threshold) 이하인 중계 노드의 수와 모든 조상(ancestor) 노드들의 잔여 에너지의 합(ERep)이 포함되어 있다. ERep에 대

한 자세한 설명은 3.2.2 절에서 다루도록 한다.

중계 노드가 이웃 노드로부터 비콘을 수신하면, 그 중 가장 큰 ERE_p 값을 갖는 노드를 부모 노드로 선정한다. 이때, 비콘을 수신한 중계 노드가 비콘에 포함된 ERE_p 값으로만 부모 노드를 결정하면 다음과 같은 문제가 발생할 수 있다. 비콘을 전송한 이웃 노드가 가장 큰 ERE_p 값을 갖고 있지만, 경로에 포함된 노드 중에 잔여 에너지량이 적은 노드가 있을 수 있으며, 이 노드가 보유한 에너지를 모두 소모하면 네트워크 분리(partition)가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 토폴로지 제어 프로토콜에서는 다음의 세 단계를 진행하여 부모 노드를 결정한다.

1. 경로에 포함된 조상 노드 중 잔여 에너지량이 일정 임계값 이하인 노드의 수가 가장 작은 이웃 노드를 부모 후보(candidate) 노드로 선정한다.
2. 만약 첫 번째 단계에서 하나 이상의 부모 후보 노드가 선정된 경우에는 ERE_p 값을 비교하여 가장 높은 값을 가진 부모 후보 노드를 선정한다.
3. 만약 두 번째 단계에서 하나 이상의 부모 후보 노드가 같은 ERE_p 값을 보유하고 있는 경우에는 베이스 스테이션까지의 홉의 수가 가장 작은 부모 후보 노드를 선정한다.

부모 후보 노드를 결정한 중계 노드는 다음과 같은 토폴로지 가입 절차를 진행하며, 토폴로지 가입은 결합 요청 메시지(*assoc_req*), 결합 응답 메시지(*assoc_resp*)를 통해 진행된다. 중계 노드는 부모 후보 노드에게 *assoc_req* 메시지를 전송한다. *assoc_req* 메시지를 수신한 부모 후보 노드는 자식 노드에게 16-bits 주소를 할당하고 이웃 테이블에 자식 노드에 대한 엔트리가 없는 경우에는 새로운 엔트리를 추가하고 *address* 및 *relation_type*을 저장한다. 만약 자식 노드에 대한 엔트리가 있는 경우 *relation_type*을 변경한다. *path_metric*은 추후 자식 노드가 전송하는 비콘에 포함된 *path_metric* 값을 저장한다. 이웃 테이블을 업데이트한 부모 노드는 *assoc_resp* 메시지를 자식 노드에게 전송한다. 자식 노드가 *assoc_resp* 메시지를 수신한 경우에 부모 후보 노드를 부모 노드로 결정한다. 만약, 부모 후보 노드에



〈그림 4〉 토폴로지 제어 동작의 예
 <Fig. 4> An example of topology control operation

게 *assoc_req* 메시지를 3번 재전송할 때까지 *assoc_resp* 메시지를 수신하지 못하면 이웃 테이블에서 새로운 부모 후보 노드를 선정하고 *assoc_req* 메시지를 전송하는 과정을 반복한다. 또한 노드가 네트워크에서 분리되는 것을 막기 위하여 네트워크에 가입한 중계 노드는 부모 노드로부터 비콘 수신이 3번 실패하면 결합 과정을 재진행한다. <그림 4>는 토폴로지 제어 동작의 예이다.

2) 토폴로지 제어 척도

토폴로지 제어 프로토콜의 목적은 센서 노드로부터 베이스 스테이션까지의 트리 에지로 패킷을 전송할 때 높은 처리량을 보이면서도 가능한 적은 에너지를 소모하도록 논리적 토폴로지를 구성하는 것이다. 논리적 토폴로지를 구성하기 위한 기준인 척도는 토폴로지 제어 프로토콜의 중요한 요소이다. 일반적으로 평면구조 에드혹 네트워크에서 사용되는 라우팅 프로토콜인 DSR, AODV는 척도로 홉 카운트가 사용된다[25, 26]. 그러나 다수의 연구 결과를 보면 최소의 홉 카운트를 가지는 경로가 최대의 처리량을 제공하지 못한다. 최소의 홉 카운트를 기반으로 경로를 선택하는 라우팅 프로토콜은 홉 간 거리가 증가되어 고정된 전파 전송세기로 전송하였을 때 수신측에서의 전파 세기가 낮게 되고, 전파 손실률이 증가 된다. 결국, 낮은 처리량을 보이게 된다. D.S.J.De Couto 등은 이를 보완할 수 있는 새로운 척도를 제안하였다. 이 척도는 ETX (Expected number of Transmission)[27]로 비콘 수신

을 바탕으로 특정 링크에서 데이터 전송 시 재전송을 포함하여 데이터 전송 성공에 필요한 전송 시도 횟수를 나타내는 척도이다. ETX는 일정 주기 동안 수신한 비콘의 수를 이용하여 계산하며, 본 논문에서는 아래와 같은 식을 이용하여 링크에서 패킷을 전송할 때 기대되는 전송횟수를 결정하였다.

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r},$$

d_f 와 d_r 은 링크에서 양방향의 비콘 수신율을 나타내며, 이는 링크에서 실제 데이터를 전송할 때 데이터 프레임과 ACK 프레임의 전송 시도 횟수를 나타낸다. 위의 값을 경로에 포함된 모든 링크에 대하여 계산하고 이를 합산한다. 결국 패킷을 전송할 때 전체 경로에서의 예상되는 전송횟수를 얻을 수 있다. 또한, 패킷을 전송할 때 소모되는 에너지의 양은 링크에서 패킷의 전송 및 수신되는 횟수에 비례한다. 그러므로 ETX와 프레임을 전송할 때 소모되는 에너지량을 곱하면 링크에서 소모되는 예상 에너지 소모량을 계산할 수 있다. 위의 값을 경로에 포함된 모든 링크에서 계산하고 이를 합산하면 경로에서 소모되는 예상 에너지 소모량(EECP)을 계산할 수 있다.

$$EEC_p = E_f \sum_{\text{all links in the path}} ETX,$$

E_f 는 하나의 데이터 프레임을 링크에 전송할 때 소모되는 에너지량이다.

그러므로 우리는 식(1)을 이용하여 하나의 데이터 프레임을 전송한 후, 경로에 포함된 노드들의 잔여 에너지량의 합을 계산할 수 있다.

$$ERE_p = \sum_{\text{all nodes in the path}} E_n - EEC_p = \sum_{\text{all nodes in the path}} E_n - E_f \sum_{\text{all links in the path}} ETX. \quad (1)$$

ERE_p는 홉카운트가 작은 경로보다 홉카운트가 큰 경로에서 더 높은 값을 나타낼 수 있으므로 ERE_p를 일반화하여 사용한다. 즉, 계산된 ERE_p 값을 경로에 포함된 중계 노드의 수로 나누어 계산된 값을 척도로 사용한다. 본 논문에서 사용하는 척도를 계산할 때 유후(idle) 상태에서 소모되는 에너지

소모량은 제외하였는데, 유후 상태는 데이터를 전송하는 양과 관계 없이 소모되기 때문에 계산에서 제외하였다.

3. 라우팅 프로토콜

토폴로지 제어 프로토콜은 3.2절에서 설명한 것과 같이 네트워크의 생존시간을 지속시킬 수 있도록 자가 구성 방식으로 트리 기반 토폴로지를 구성한다. 이 트리 구조는 베이스 스테이션과 모든 센서 노드들 간의 경로를 정의하고 있다. 라우팅 프로토콜은 토폴로지 제어 프로토콜에 의하여 생성된 트리 구조를 기반으로 센서 노드들에서 생성된 데이터 패킷을 베이스 스테이션과 센서 노드들 간의 트리 에지를 따라 전달한다. 결과적으로, 라우팅 프로토콜은 매우 간단하고 오버헤드가 매우 낮다.

라우팅 테이블의 엔트리는 상향 트래픽(upstream traffic)을 위한 라우팅 엔트리와 하향 트래픽(downstream traffic)을 위한 라우팅 엔트리로 구분되며 {destination_address, next_hop_address}의 2개 필드로 구성된다. 라우팅 테이블 엔트리를 작성하는 방법은 다음과 같다. 상향 트래픽을 위한 라우팅 테이블 엔트리는 토폴로지 제어 프로토콜에 의하여 작성된 이웃 테이블을 이용하여 작성한다. 이웃 테이블에는 각 노드에서 베이스 스테이션까지 도달할 수 있는 다음 홉(next hop) 노드 즉, 부모 노드에 대한 정보를 가지고 있다. 부모 노드는 베이스 스테이션까지 경로의 다음 홉이 되므로 라우팅 테이블이 생성되면 초기에 상향 트래픽을 위한 라우팅 엔트리가 추가되며 주기적으로 업데이트 된다.

하향 트래픽을 위한 라우팅 테이블 엔트리는 라우트 업데이트(route_update) 메시지를 이용하여 작성한다. route_update 메시지는 각 중계 노드가 모든 자손(descendant) 노드들의 라우팅 테이블 엔트리를 집합하여 부모 노드에게 전송하며, 모든 조상 노드를 통하여 베이스 스테이션까지 전달된다. 즉, 각 중계 노드 또는 베이스 스테이션은 자신이 루트가 되는 서브 트리내의 모든 노드에 대한 라우트 엔트리를 유지한다. route_update 메시지는 {message_type,

source_address, *length*, *list_of_descendent*)의 4개 필드로 구성된다. *message_type*의 값은 *route_update*를 나타내고, *source_address*는 메시지를 전송한 노드의 주소로 자손 노드들의 *next_hop_address*로 저장된다. *length*는 자손 노드의 수를 나타내며, *list_of_descendent_addresses*는 모든 자손노드의 주소가 포함된다. *route_update* 메시지는 트리 토폴로지가 변경되었을 때 발생되며, 발생된 메시지는 베이스 스테이션까지 전달된다. *route_update* 메시지를 수신한 중계 노드는 라우팅 테이블 엔트리들을 업데이트하고 수신한 *route_update* 메시지의 *source_address* 필드를 자신의 주소로 변경하여 부모 노드에게 포워드 한다. *route_update* 메시지를 수신한 베이스 스테이션은 라우팅 테이블 엔트리들을 업데이트한다.

라우팅 테이블을 관리하는 방법이 서브 트리의 높이(*height*)가 증가 될수록 라우팅 테이블의 크기가 최악의 경우 지수적으로 증가될 수 있다. 그러나 베이스 스테이션이 초기화할 때 중계 노드들의 수가 제한적인 것이라고 기대하기 때문에 라우팅 테이블의 크기가 지수적으로 증가되는 경우는 일반적으로 발생하지 않는다.

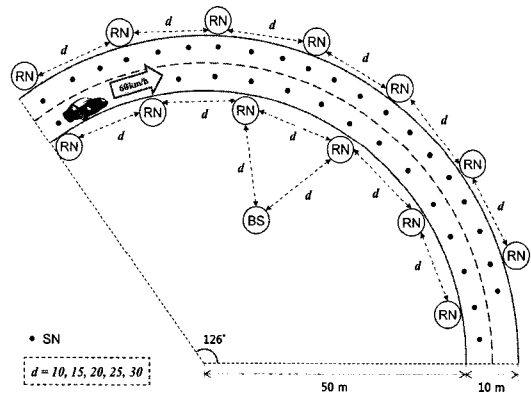
IV. 실험 결과

본 논문에서 실험은 급커브 구간이 있는 2차선 고속도로에서 차량의 진입을 감지하였을 때 노변의 전광판을 통하여 경고 메시지를 표시하는 VAWS을 모델링한 <그림 5>와 같은 실험 시나리오를 이용하여 진행하였다. 우리의 모델에서 내부 도로는 중심으로부터 50m 거리가 떨어지도록 하였으며 도로의 폭은 10m로 하였다. 마그네틱 센서가 연결된 센서 노드들은 각 차선에 노드들 간 거리가 같도록 배치 하였으며 중계 노드가 클러스터 헤드인 클러스터에 3개의 센서 노드들이 포함되도록 하였다. 베이스 스테이션은 급커브 구간의 내부에 위치하고 베이스 스테이션과 가장 가까운 2개의 중계 노드와의 거리는 중계 노드들 간의 거리와 같도록 하였다. 즉, 베이스 스테이션이 루트가 되는 2개의 서브 트리가 생성된다. 차량은 60km/h의 속도로 급커브 구간을

이동하며 차량 간 거리는 10m로 하였다. 베이스 스테이션, 중계 노드, 센서 노드의 무선 에너지 소모 모델은 Chipcon 사의 무선 센서 모듈인 CC2420[28]을 기반으로 하였으며 전송, 수신 및 유후 상태에서의 에너지 소모량은 0.000001129 mW/byte, 0.000001002 mW/byte, 0.000712 mW/s 이다.

토폴로지 제어 프로토콜과 라우팅 프로토콜은 워싱턴 대학[29]에서 ns-2 시뮬레이터의 IEEE 802.15.4를 확장 개발한 것을 기반으로 IEEE 802.15.4 MAC/PHY 상위에 구현하였다. <표 1>은 실험에서 사용하는 시스템 파라미터들을 나타낸다.

본 논문에서 제안한 네트워크 모델을 평가하기 위하여 중계 노드간 거리(10, 15, 20, 25, 30m)의 변화에 따른 네트워크 생존시간의 변화, 전송율의



<그림 5> 실험 시나리오

<Fig. 5> Simulation scenario

<표 1> 실험 파라미터

<Table. 1> Simulation parameters

파라미터	값
Frequency (GHz)	2.4
SymbolTime (ms)	0.016
Traffic pattern	CBR
maxMaxCSMABackoffs	5
Payload size (bytes)	40
Propagation model	2-way ground
Ricean K Factor	12
Transmission range (m)	30
Carrier sensing zone (m)	60

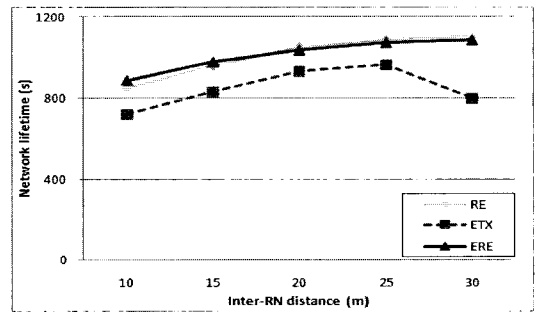
변화, 평균 에너지 사용량의 변화, 평균 지연 시간의 변화를 측정하였다. 각 실험은 300 초간 진행하였고, 매 0.6초마다 차량이 센서 노드를 지나가도록 하였다. 중계 노드들의 초기 에너지는 1.0 mW로 하였으며 베이스 스테이션의 초기 에너지는 무한에 가까운 큰 값을 가지도록 하였다.

실험에서는 본 논문에서 제안한 ERE(Expected Residual Energy)의 성능을 분석하였다. 또한 ERE와 같은 네트워크와 프로토콜을 사용하지만 척도가 상이한 ETX와 RE를 구현하여 ERE와 성능을 비교하였다. [14]에서 분석한 결과에 따라 ETX와 RE(Residual Energy)를 비교 척도로 결정하였으며 ETX는 하나의 패킷을 전송할 때 기대되는 전송횟수가 가장 낮은 경로를 선택하고 RE는 경로에 포함된 중계 노드의 잔여 에너지량이 가장 많은 경로를 선택한다.

<그림 6>은 실험 시작부터 첫 번째로 보유한 에너지를 모두 소모한 노드가 발생한 시간을 나타낸다. ERE 및 RE가 ETX보다 높은 성능을 나타낸다. 중계 노드간 거리가 10m일 때 ERE, RE, ETX의 네트워크 생존시간은 885.1, 848.2, 718.2초이다. 이는 ERE의 경우 에너지가 임계치 이하인 노드가 포함된 경로는 우선적으로 선택하지 않고 경로에 포함된 노드들의 잔여 에너지량이 높으면서 홉카운트가 낮은 경로를 선택하지만 RE는 노드들의 잔여 에너지량이 높은 경로를 선택하기 때문이다. 중계 노드간 거리가 30m일 때 RE가 ERE보다 네트워크 생존시간이 길게 측정되었다. 이는 IEEE 802.15.4 MAC의 재전송 방법에 기인한다. IEEE 802.15.4 MAC의 재전송 방법은 같은 프레임은 3번까지 재전송하고 ACK 프레임을 수신하지 못하면 프레임 전송을 포기한다. 중계 노드에서 2홉 통신으로 베이스 스테이션에 데이터를 전송한다고 가정 하였을때, 전송 실패한 경우의 에너지 소모량은 $3ETx$ 이고, 전송 성공한 경우의 에너지 소모량은 $2ETx+2ERx$ (Ack 전송 + 중계 데이터 전송 + 중계 데이터 수신 + Ack 수신)이다. 결과적으로, 전송 성공한 경우의 에너지 소모량이 실패한 경우보다 높게 된다.

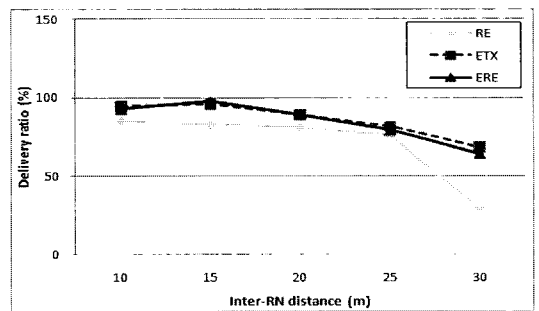
<그림 7>은 패킷의 전송률을 나타낸다. ETX 및

ERE가 RE보다 높은 성능을 나타낸다. 이는 RE에서 전송 실패가 자주 발생하기 때문이며, 이로 인하여 RE의 네트워크 생존시간이 높게 나타난다. <그림 8>은 평균 에너지 소모량을 나타낸다. 평균 에너지 소모량은 모든 노드들에서 소모한 총 에너지량에서 베이스 스테이션까지 전달 성공한 모든 패킷의 수를 나누어 구한다. <그림 8, 9>에서 중계 노드간의 거리가 30m 일때의 결과를 보면 높은 평균 에너지 소모량과 낮은 데이터 전송률 사이의 상호관계를 알 수 있다. <그림 9>는 평균 단대단(end-to-end) 지연값을 나타내는 그래프이다. RE가 가장 낮은 단대단 지연을 나타내며, 이는 손실된 패킷의 지연을 0으로 계산하였기 때문이다. 또한 ETX가 ERE보다 낮은 단대단 지연을 나타내는데, 이는 ETX는 항상 처리량을 최대화 할 수 있는 경로를 선택하기 때문이다.



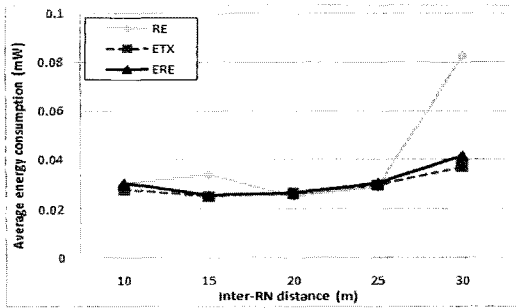
<그림 6> 중계 노드 간 거리 변화에 따른 네트워크 생존시간 변화

<Fig. 6> Network lifetime vs. inter-RN distance



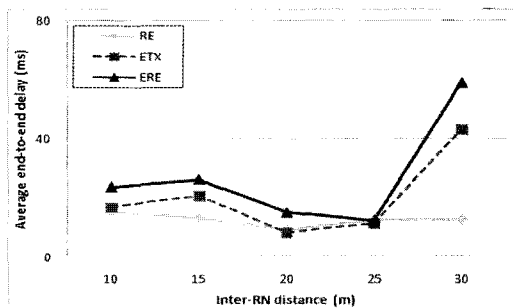
<그림 7> 중계 노드 간 거리 변화에 따른 전송률의 변화

<Fig. 7> Average packet delivery ratio vs. inter-RN distance



<그림 8> 중계 노드 간 거리 변화에 따른 평균 에너지 사용량의 변화

<Fig. 8> Average energy consumption vs. inter-RN distance



<그림 9> 중계 노드 간 거리 변화에 따른 평균 지연 시간의 변화

<Fig. 9> Average end-to-end delay vs. inter-RN distance

V. 실험 결과

본 논문에서 우리는 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 VAWS가 가능한 새로운 계층적 센서 네트워크 모델을 설계하였다. 또한 우리는 네트워크의 생존시간을 지속시킬 수 있도록 자가 구성 방식으로 트리 기반 토폴로지를 형성하는 토폴로지 제어 프로토콜을 제안하였고, 센서 노드들이 생성한 데이터 패킷을 전광판 처리장치와 연결되어 있는 베이스 스테이션까지 전송하는 라우팅 프로토콜을 설계하였다. 실험 결과는 네트워크 모델에서 제안하는 토폴로지 컨트롤과 라우팅 척도가 결합된 프로토콜이 에너지 효율 및 처리량 면에서 높은 성능을 나타냄을 보인다.

참고문헌

- [1] A. N. Knaian, *A wireless sensor network for smart roadbeds and intelligent transportation systems*, Master Thesis, MIT, Boston, MA, 2000.
- [2] Mobility Technology, *Traffic pulse technology*, <http://www.mobilitytechnologies.com/ntdc/>, 2003.
- [3] Wireless Sensor Networks for Roads - Road SensiNet, <http://www.ideal-ist.net/Countries/TR/PS-TR-831>, ICT project PS-TR-831, 2007.
- [4] IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Draft standard, Jan. 2005.
- [5] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [6] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Comm.*, vol. 11, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [7] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 351-367, Oct. 2004.
- [8] A. Cerpa and D. Estrin, "ASCENT: Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 3, no. 3, pp. 272-285, Sept. 2004.
- [9] P. Gupta and P. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, March 2000.
- [10] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, "MAC protocols for wireless sensor networks: a survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 4, pp. 115-121, April 2006.

- [11] IEEE Standard for Information Technology Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Std 802.15.4-2006.
- [12] Q. Dong, "Maximizing system lifetime in wireless sensor networks," *Proc. IPSN*, pp. 13-19, 2005.
- [13] V. Rodoplu and T. H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks," *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, vol. 17, no. 8, pp. 1333-1344, Aug. 1999.
- [14] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," *Proc. MOBICOM*, pp. 181-190, Oct. 1998.
- [15] J. Chang and L. Tassiulas., "Energy conserving routing in wireless ad hoc networks," *Proc. INFOCOM*, pp. 22-31, Mar. 2000.
- [16] J. Chang and L. Tassiulas, "Maximum lifetime routing in wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 12, no. 4, pp. 609-619, Aug. 2004.
- [17] J. E. Wieselthier, G. D. Nguyen, and A. Ephremides, "On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks," *Proc. IEEE Infocom*, pp. 585-594, Mar. 2000.
- [18] M. X. Cheng, J. Sun, M. Min, and D. Z. Du, "Energy-efficient broadcast and multicast routing in Ad Hoc wireless networks," *Proc. IEEE Int. Performance, Computing, and Comm. Conf.*, pp. 87-94, Apr. 2003.
- [19] W. F. Liang, "Minimizing energy and maximizing network lifetime multicasting in wireless ad hoc networks," *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications*, vol. 5, pp. 3375-3379, May 2005.
- [20] P. J. Wan, G. Calinescu, X. Y. Li, and O. Frieder, "Minimum-energy broadcast routing in static Ad Hoc wireless networks", *Proc. IEEE Infocom*, pp. 1162-1171, Apr. 2001.
- [21] Z. Quan and A. Subramanian. "REACA: An efficient protocol architecture for large scale sensor networks (Corrected)", *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 6, no. 10, pp. 3846-3855, Oct. 2007.
- [22] A. A. K. Jeng and R. H. Jan, "An adaptive topology control scheme for energy-efficient routing in mobile Ad Hoc networks," *Proc. IEEE Communications Society WCNC*, pp. 4401-4404, Apr. 2007.
- [23] A. A. K. Jeng and R. H. Jan, "The r-neighborhood graph: An adjustable structure for topology control in wireless Ad Hoc networks," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 536-549, Apr. 2007.
- [24] M. Caruso and L. Withanawasam, "Vehicle detection and compass applications using AMR magnetic sensors," <http://www.magneticsensors.com/datasheets/amr.pdf>
- [25] D. Johnson and D. Maltz, "The dynamic source routing protocol for mobile Ad Hoc networks (DSR)," draft-ietf-manet-dsr-09.txt, IETF Internet draft, 15, Apr. 2003.
- [26] C. Perkins, E. B. Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," IETF RFC 3561, July 2003.
- [27] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Proc. Ninth Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking*, pp. 134-146, Oct. 2003.
- [28] 2.4 GHz IEEE 802.15.4/Zigbee-ready RF transceiver. http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_sheet_1_2.pdf, 2004.
- [29] I. Ramachandran., "Changes made to the IEEE 802.15.4 NS-2 implementation," http://www.ee.washington.edu/research/funlab/802_15_4/changed_files/

저자소개

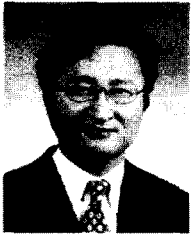


신 홍 혈 (Shin, Hong-Hyul)

2006년 2월 : 광운대학교 컴퓨터공학과(학사)

2008년 2월 : 광운대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)

2008년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정



이 혁 준 (Lee, Hyuk-Joon)

1987년 : University of Michigan, Computer Science(학사)

1989년 : Syracuse University, Computer Science(석사)

1993년 : Syracuse University, Computer Science(박사)

1994년 ~ 1996년 : 삼성전자(주) 멀티미디어 연구소 선임연구원

1996년 ~ 현 재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 교수