

무선 센서 네트워크에서 위치 정보의 시간차를 이용한 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜

정회원 김재현*, 심인보*, 김홍**, 이재용*

Geographical Time Back-off Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

Jae-hyun Kim*, In-bo Sim*, Hong Kim**, Jai-yong Lee* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 위치 정보의 시간차를 이용한 라우팅 프로토콜(Geo-Back)을 제안한다. Geo-Back은 기존의 위치 기반 라우팅 알고리즘과 달리 주기적인 이웃 노드들의 위치 정보 혹은 하나의 홉 내에 있는 이웃 노드들 수의 정보를 이용하지 않고, 오직 소스와 목적지 노드의 위치 정보만을 이용하며, 최적의 back-off 시간 메커니즘을 사용하여 패킷 전송을 결정한다. 빈번한 토폴로지 변화 환경 하에서, 제안하는 Geo-Back 프로토콜은 업데이트를 위한 브로드캐스트 알고리즘을 사용하지 않고 빠르게 목적지까지 전송하기 위한 최적의 다음 홉을 찾을 수 있으며, 분석 결과 밀집 환경의 무선 센서 네트워크에서 확장성과 향상된 성능을 확인 하였다.

Key Words : Wireless Sensor Network, Geographical Information, Back-off, Routing Protocol

ABSTRACT

In this paper, we propose Geographical Back-off Routing (Geo-Back Routing) protocol for wireless sensor networks. Geo-Back uses the positions of nodes, a packet's destination and a optimal back-off time to make the packet forwarding decisions using only source and destination's location information without information about neighbor nodes' location or the number of one hop neighbor nodes. Under the frequent topology changes in WSNs, the proposed protocol can find optimal next hop location quickly without broadcast algorithm for update. In our analysis, Geo-Back's scalability and better performance is demonstrated on densely deployed wireless sensor networks.

I. 서론

무선 센서 네트워크는 전통적인 무선 네트워크와는 달리 Infrastructureless 기반의 여러 가지 이벤트를 센싱하여 처리하는 센서 노드와 센서 노드로부터 받은 데이터를 처리하여 기존의 액세스 네트워크 혹은 인터넷 등을 통하여 사용자에게 데이터를

전달하는 싱크노드로 구성된 네트워크 구조를 가진다. (그림 1) 무선 센서 네트워크는 기존의 무선 네트워크나 Ad hoc 네트워크와는 달리, 빈번한 토폴로지 변화에 따른 자기 구성(Self organization), 반영구적인 네트워크 수명에 따른 초저전력(Energy efficiency), 상대적으로 많은 수의 센서 노드에 따른 확장성(Scalability)등의 특징을 가진다.^[1] 이러한

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-C1090-0603-0038)

* 연세대학교 전기전자공학과 유비쿼터스 네트워크 연구실(jaykim@nasla.yonsei.ac.kr, ivysim@yonsei.ac.kr, jyl@yonsei.ac.kr)

** 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부(hong978.kim@samsung.com)

논문번호 : KICS2006-11-484, 접수일자 : 2006년 11월 10일, 최종논문접수일자 : 2007년 4월 23일

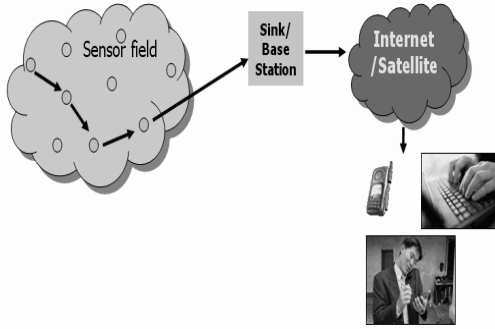


그림 1. 무선 센서 네트워크

무선 센서 네트워크의 특징과 더불어 최근의 위치 기반 응용 서비스 기술에 대한 관심 증가로 인하여 위치 기반 라우팅 기술이 관심을 가지고 연구 개발되어져 오고 있다. 위치기반 라우팅 기술은 노드의 지리적인 위치 정보를 이용하여 라우팅을 하는 기술이다. 기본적으로 전송하는 노드, 전송하는 노드의 하나의 홉 내에 있는 이웃 노드들 그리고 목적지의 위치 정보들을 이용하여 다음 전송해야 할 노드를 결정하여 데이터를 전송하는 방식이다. 위치기반 기술을 이용하면 라우팅이 용이하고, 빈번한 네트워크 토폴로지의 변화에도 쉽게 적응할 수 있으며, 각각의 노드는 자신의 이웃 노드의 정보만 유지하고, 네트워크 전체에 해당하는 flooding 사용이 없어 네트워크의 확장성이 좋으며, 오버헤드를 최소화 할 수 있다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 위치 정보의 시간차를 이용한 라우팅 프로토콜(Geo-Back)을 제안한다. 제안하는 기법은 에너지 효율성을 향상 시키고, flooding 방식을 사용하지 않으며, 이에 따른 오버헤드 문제를 최소화하여 전체 네트워크의 수명을 극대화시킨다. 분석과 시뮬레이션을 통하여 제안하는 라우팅 프로토콜의 성능을 확인한다.

II. 관련 연구

최근에, Ad hoc 네트워크에서의 위치기반 라우팅 프로토콜에 관한 많은 연구가 진행 되어져 왔다. 위치 기반의 라우팅 프로토콜들은 모두 다음과 같은 가정을 가지고 있다.

- 1) 노드는 자신의 위치 정보를 알고 있음
- 2) 노드는 목적지 노드의 위치 정보를 알고 있음
- 3) 노드는 통신 거리를 알 수 있으며 양방향 링크를 사용

위치기반 라우팅 프로토콜의 장점은 오직 자신의 이웃 노드에 대한 정보만을 바탕으로 라우팅을 하기 때문에 네트워크 전체에 대한 토폴로지를 관리할 필요가 없다는 점이다. 기존에 제안된 위치 기반의 라우팅 프로토콜은 크게 flooding 기반의 알고리즘과 Greedy 패킷 포워딩 알고리즘으로 나뉜다.

2.1 Flooding-Based Routing and Greedy Packet Forwarding Algorithm

가장 간단한 flooding 기반 라우팅 알고리즘은 소스로부터 다른 모든 노드들에게 멀티 홉을 통해 전체 네트워크에 걸쳐 패킷을 전달하는 방식이다.(blind flooding)^{[2][3]} 이 알고리즘은 네트워크의 다른 노드들의 위치 정보를 필요로 하지 않으며 위치 정보의 교환에 따른 에너지 소모나 대역폭 낭비를 줄일 수 있다. 하지만, 전체 네트워크에 걸쳐 모든 노드들에게 불필요한 중복 패킷들이 전달되므로 확장성 및 오버헤드 문제가 심각하다. 비록 blind flooding 방식이 어떠한 위치 정보를 요구하지 않더라도, 네트워크 확장성에 따른 높은 통신 복잡도 문제가 큰 문제점이다.^[4] Greedy 패킷 포워딩 알고리즘에서는 소스와 목적지 노드사이에 오직 하나의 라우팅 경로가 존재한다. 라우팅에 포함되어 있지 않은 어떠한 노드들도 패킷 전달에 참여하지 않는다. 패킷이 라우팅 경로 상에 노드에게 전달될 때, 하나의 홉 반경 내에 있는 이웃 노드들 중 전달될 어질 다음 노드를 선택하여야 한다. 이때, 선택하는 기준은 몇 가지 방법 즉, Most Forward within R (MFR)^[5], Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)^[6], Two-Tier Data Dissemination (TTDD)^[7]등과 같은 방법으로 선택한다. 하지만, 이와 같은 방법에 기반을 둔 Greedy 패킷 포워딩 알고리즘이라도 현재 패킷을 전송하려는 노드가 포워딩 방향이나 목적지로 가는 지역상의 다음 노드를 찾을 수 없는 경우 패킷 전달이 실패하게 된다. 또한 일반적으로 하나의 홉 내에 있는 모든 노드들은 자신의 ID와 위치 정보를 주기적으로 브로드 캐스팅하여 이에 따른 오버헤드가 발생한다.^[8] 한편, ExOR^[9]의 경우, 본 논문에서 제안하는 Geo-Back과 유사하게 패킷을 전달하는 알고리즘을 가지고 있으나, 목적지 노드에 가장 가까운 노드를 선택하는 방법이 최적화 되어 있지 않으며, 다음 패킷 전달 노드를 선택하기 위해 패킷 전달 리스트(batch)를 관리해야 하는 오버헤드 문제가 발생한다.

본 논문에서는 주기적인 'Hello' 메시지나 어떠한 토폴로지 정보의 교환 없이 패킷의 목적지 위치 정

보와 잠재적인 다음 홉들의 위치 정보만을 이용하여 목적지 경로 상의 가장 최적의 다음 홉 노드를 결정하여 패킷을 포워딩하는 새로운 위치 기반 라우팅 알고리즘을 제안한다.

III. Geo-Back Algorithm

Geo-Back은 기존의 Ad hoc에서의 위치기반 라우팅 알고리즘이 주기적으로 위치 정보를 주고받던 오버헤드를 줄이기 위해서 제안된 알고리즘이다. 기본적으로 대부분의 위치 기반 라우팅 알고리즘과 마찬가지로, 데이터를 전달하고자 하는 소스 노드 자신과 목적지 노드(일반적으로, 싱크 노드)의 위치 정보를 알고 있는 가정 아래 Geo-Back에서는 주위의 위치 정보를 받아오지 않고 최적의 가상 노드 위치를 계산한 후, 가상 노드로부터의 거리에 따라서 back-off 시간을 차별화 하는 방법을 사용한다. 만약 이동성을 갖는 목적지 노드의 경우 자신의 변경된 위치 정보를 네트워크 전체에 broadcast하여 알려 주어야 하는데, 일반적인 센서 네트워크 응용에서 모든 노드들이 싱크 노드 혹은 네트워크 관리자 역할을 하는 특정 목적지 노드에게 데이터를 전달하므로 중간 노드의 이동성과는 무관하게 최종 목적지 노드에게 주변의 위치 정보 교환 없이 효율적인 데이터 전달 방법을 사용한다.

3.1 The optimal next hop node location

Geo-Back에서는 패킷에 소스 노드와 목적지 노드의 위치정보를 함께 보내게 된다. 이러한 정보를 바탕으로 패킷을 포워딩하는 노드는 다음번에 패킷을 포워딩 할 노드의 최적위치를 계산할 수 있다. 다음 번 패킷을 포워딩하는 가장 최적화된 노드는 위치적으로 패킷의 목적지 노드에 가장 가까운 노드가 된다.^[10] Geo-Back에서는 이 정보를 이용하기 위하여 소스 노드와 목적지 노드의 위치 정보를 바탕으로 ONI(Optimal Next hop Information)을 계

산하게 된다. ONI의 값은 다음과 같은 식 (1)에 의하여 계산될 수 있다.

소스 노드 위치 : (x_r, y_r)

목적지 노드 위치(싱크 노드) : (x_d, y_d)

전송 범위 : r

소스 노드와 목적지 노드 사이의 거리 : d

r 과 d 의 거리 : D_{rd}

Optimal Next hop Information(ONI) : (x_o, y_o)

$$D_{r,d} = \sqrt{(x_d - x_r)^2 + (y_d - y_r)^2}$$

$$(x_o, y_o) = \left(\frac{r^*x_d + (D_{rd} - r)^*x_r}{D_{rd}}, \frac{r^*y_d + (D_{rd} - r)^*y_r}{D_{rd}} \right) \quad (1)$$

소스 노드는 ONI값을 계산한 후 자신의 이웃 노드에 브로드캐스트를 하게 된다. 이 값을 받은 주위의 노드는 자신의 위치와 ONI위치와의 거리를 계산하고, 거리에 따라서 서로 다른 back-off 시간을 두어 응답하게 된다.

3.2 Calculation of back-off time

ONI 값을 받은 노드들은 ONI에 담겨 있는 최적의 다음 노드의 위치 정보를 가져와 그 위치로부터 자신의 노드 위치까지의 거리를 계산하게 된다. 이렇게 하면 소스노드의 한 홉 안에 있는 노드들은 위치에 따라서 $0 \sim 2r$ 의 ONI와의 거리 값을 가지게 된다. ONI로부터의 거리가 0에 가까울수록 최적의 노드 위치와 가까운 노드이기 때문에 다음 노드로 선택이 될 수 있도록 가장 작은 백 오프 시간을 두고, $2r$ 에 가까울수록 적합한 노드가 아니기 때문에 가장 긴 back-off 시간을 주게 된다. 각각의 노드들은 back-off 시간을 가지게 되면 ONI값을 브로드캐스트 한 노드에게 WA(Winner Application) 메시지로 응답을 보내고 WA 메시지를 받은 노드는 이를 다시 한 홉의 주변 노드들에게 알려 패킷을 전송을 할 노드가 선택되었음을 알리고 back-off를 멈추도록 한다. back-off 시간의 계산은 그림 3에서와 같이 한 홉 안에 있는 영역을 균일한 넓이를 가지도록 몇 개의 영역으로 나누어 계산하게 된다. 그림 3에서 x, y 는 노드의 위치 좌표를 의미하며, r 는 전송 범위, 그리고 d 는 확률적으로 동일한 분포를 갖는 0부터 $2r$ 사이의 구간을 discrete하게 나타내기 위해서 일정 구간마다 노드가 있을 확률을 동일하게 갖도록 discrete화 해 준다. 일정 구간에 있을 노드 개수는 면적에 따른 확률모델이므로, k 값에 의한 면적을 계산하여야 한다.^[11] k 값은 그림 2의 왼쪽에서 $k_1, k_2, k_3...$ 를 의미하는 것으로써 오른쪽의

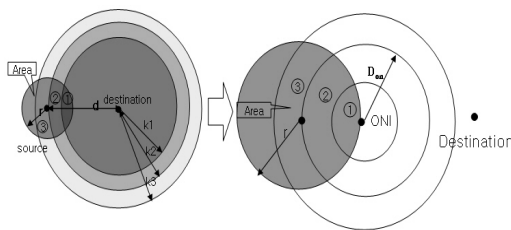


그림 2. ONI 값의 계산

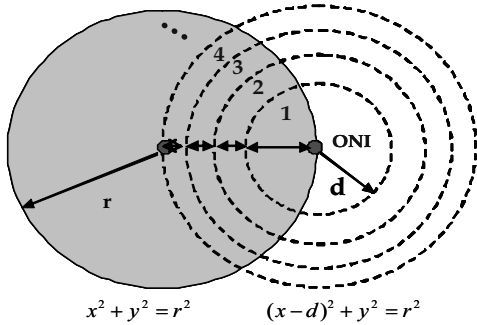


그림 3. 거리에 따른 back-off 시간

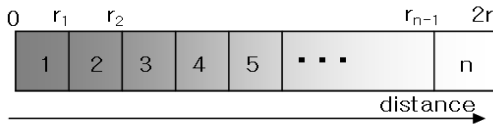


그림 4. 거리와 슬롯 mapping

r값과 같은 의미를 가진다.

$$Area(k) = r^2 \left[\cos^{-1} \left(\frac{r^2 + d^2 - k^2}{2rd} \right) - \frac{1}{2} \sin 2 \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + d^2 - k^2}{2rd} \right) \right\} \right] + k^2 \left[\cos^{-1} \left(\frac{3d^2 - r^2 - k^2}{2kd} \right) - \frac{1}{2} \sin 2 \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{3d^2 - r^2 - k^2}{2kd} \right) \right\} \right]$$

where, $d - r < k < d + r$

$$Area(D_{on}) = 2 \left[\int_{(2r^2 - d^2)/2r}^r \sqrt{d^2 - (x-r)^2} dx + \int_{r-d}^{(2r^2 - d^2)/2r} \sqrt{d^2 - (x-r)^2} ds \right] \quad (2)$$

위 식 (2)에서 각 구간에 해당하는 면적이 같도록 0부터 2r 사이의 구간을 n개로 분할한다. 이때 n 값은 반지름 r인 원 안에 있는 노드의 평균 개수이다. 즉 확률적으로 한 홉 안에 있는 주변 노드들이 각각 하나의 분할된 값을 가질 확률이 가장 클 수 있도록 구간을 나눈다. 구간의 개수가 많을수록 지연(delay)이 증가하여 채널의 효율이 떨어지고, 구간의 개수가 낮을수록 중복될 확률이 있으므로, 다음 노드를 선출할 때 중복될 확률이 커진다는 상관관계(trade-off)가 있다.

총 구간을 n개로 나눌 경우 그림 4와 같이,

$$r_k : Area(D_{on}) = \frac{k}{n} \pi r^2 \quad k=1,2,\dots,n-1 \quad (3)$$

3.3 Mapping to time slot

미리 정해진 식에 의해 계산된 슬롯(slot)에 시간을 대응시킨다. 즉 계산된 슬롯에 시간상수 C값을 곱하여 구한다. 계산된 슬롯은 식(3)에 의하여 구해진 값이다. 즉 그림 5와 같이 $t_k = c_k * r_k$ 이며, c_k 는

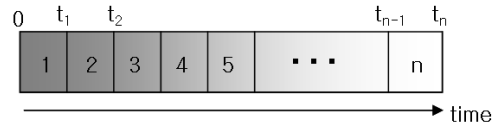


그림 5. 시간과 슬롯 mapping

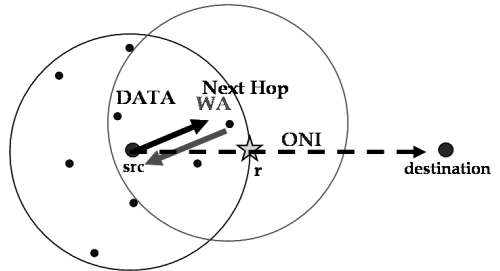


그림 6. Geo-Back 동작

가중치 값(weight value)이다.

이러한 과정을 거쳐 소스 노드로부터 하나의 홉 거리안의 이웃 노드들은 자기 자신의 시간슬롯을 계산할 수 있다. 그러나 소스 노드나 주변 노드들은 특정 노드의 시간 슬롯을 알 수 없다.^[12] 소스 노드가 알고자 하는 것은 어느 노드가 이웃 노드들 중 목적지 노드와 가장 가까운지 여부이기 때문에 이 중에서 가장 가까운 노드를 자동적으로 선출할 수 있도록 알고리즘을 구현한다. 즉 각 노드는 해당되는 시간슬롯에 ONI 패킷에 대한 응답을 하기로 하고, 자신의 시간슬롯 이전에는 overhearding을 하여 자신보다 더 유리한 조건을 갖는 노드가 있는지를 엿듣는다. 자신의 시간슬롯 동안에 응답한 노드가 없다면, 자신의 최적의 다음 홉 노드가 될 자격이 있는 노드이며, 그 시간 전에 다른 노드가 응답한다면, 자신은 최적의 다음 홉 노드가 아니므로 통신을 포기한다. 최적의 다음 홉 노드의 자격이 있는 노드는 Winner's Application(WA) 신호로 응답한다. 만약 통신에 있어서 목적지와 가장 가까운 노드가 최적이지 않거나, 노드의 현재 남아 있는 에너지나 트래픽 량, 긴급 상태라 할 때, c_k 값은 일정한 상수가 아닌 변수가 될 수 있다. 즉 에너지 등 다른 정보를 포함한 값을 이용하여 시간으로 변환시킬 수 있다.

3.4 Accept Message (AM)

소스 노드가 WA 패킷을 받으면, 정상적으로 패킷을 수신한 경우, AM(Accept Message) 패킷을 주변에 브로드캐스트하여 주변 노드에게 다음 홉 노드가 결정되었음을 알려준다. 이는 이후에 다른 노드들이 WA 패킷을 보내는 과정을 무시하게 해주는

역할을 한다. 이러한 과정에 의해 다음 노드는 1개만 선택이 되며, 따라서 단일 경로 브로드캐스트로 라우팅 경로 발견이 된다. 만약 소스 노드가 WA 패킷을 받지 못한다면, 고립되어 있거나, 주변 노드들 간의 충돌이나 간섭이 있는 경우로 간주될 수 있으므로, 몇 번의 재전송 과정을 거치게 된다. 정상적으로 소스 노드가 WA 패킷을 받아, AM 패킷을 보내는 경우에 최종적으로 소스 노드, 다음 홉 노드, 이웃 노드들로 나뉘지며 3가지의 그룹이 생긴다.

3.5 알고리즘 동작

Geo-Back은 패킷을 보내고자 하는 소스 노드가 자신과 목적지의 위치 정보를 바탕으로 ONI 값을 계산하고 그 값을 주변의 노드들에게 알려 준다. 이 값을 받은 노드들은 ONI로부터의 거리에 따라서 back-off 시간을 계산하고 그 시간동안 기다렸다가 소스 노드에게 WA 메시지를 보내게 된다. WA 메시지를 받은 소스노드는 주변의 노드들에게 다음 노드가 선정되었음을 알리고 데이터를 전송한다. back-off를 하던 노드들은 중간에 WA 메시지나 다음 노드가 선택되었음을 알리는 메시지를 overheard 하게 되

면 back-off를 멈추게 된다. 이러한 과정을 매 홉마다 반복적으로 적용함으로써 목적지 노드까지 데이터를 전달할 수 있게 된다.

3.6 Path caching

만약 정상적인 다음 홉 선택이 이루어졌다면, 선택과정에 따라 그림 8처럼 3가지 그룹으로 나누어진다. 그룹 1은 ONI와 AM을 받은 노드들로, 자기 자신이 다음 홉 보다 소스에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 그룹 1 노드들은 소스 노드를 가상의 다음 홉으로 받아들일 수 있다. 그룹 2는 ONI, WA, AM의 세 가지 신호를 모두 overheard하였기 때문에 자신이 소스 노드와 다음 홉 노드 사이의 노드임을 알 수 있다. 따라서 그룹 2 노드들은 다음 홉 노드를 가상의 다음 홉으로 선정할 수 있다. 그룹 3의 경우 WA 신호만 받았기 때문에, 다음 홉 노드가 생길 때까지 보류한 후 결정한다.^[13]

IV. 성능 분석

4.1 Connectivity

[0, z] 범위를 갖는 네트워크에서 노드의 분포는 uniform 랜덤 분포를 가지므로, 확률적으로 고립되는 노드가 발생한다. z=1인 경우(일반화시킬 경우), n개의 노드가 배열되어 있을 때, 한 노드의 범위 r 안에 k개의 노드가 있을 확률은 식 (4)와 같다.^[14]

$$\binom{n-1}{k} (-1)^k \left(1 - k \frac{r}{z}\right)^n u\left(1 - k \frac{r}{z}\right) \text{ for } r < z \quad (4)$$

$$\Pr(X_i) \leq \left(1 - \frac{1}{4} \pi r^2(n)\right)^{n-1}$$

$$\begin{aligned} \Pr(X) &\leq n \left(1 - \frac{1}{4} \pi r^2(n)\right)^{n-1} \\ &= e^{\ln n + (n-1) \ln \left(1 - \frac{1}{4} \pi r^2(n)\right)} \\ &\leq e^{\ln n + (n-1) \left(\frac{1}{4} \pi r^2(n)\right)} \\ &= e^{\ln n \left(1 - \frac{(n-1)}{\ln n} \left(\frac{1}{4} \pi r^2(n)\right)\right)} \\ &= e^{\ln n \left(1 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{r(n)}{\sqrt{\frac{\ln n}{n-1}}}\right)^2\right)} \end{aligned} \quad (5)$$

- 만약 $r(n)$ (=전송 범위 함수)이 점근선적으로 $\sqrt{(\ln n)/n}$ 보다 천천히 감소하면 네트워크 안의 노드들은 서로 연결되어진다.

- $r(n) = O\left\{\sqrt{\frac{(\ln n + c(n))/n}{n}}\right\}$ ^[15]

식 (4)을 바탕으로 1x1 크기를 갖는 네트워크

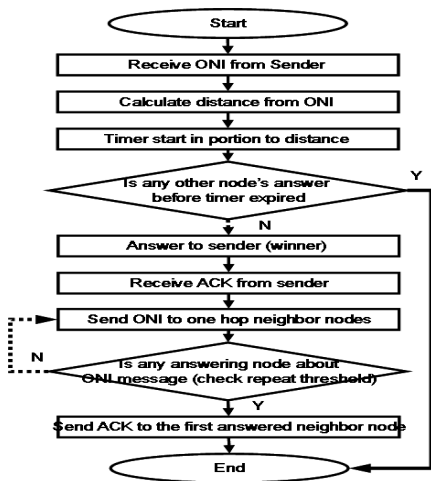


그림 7. Geo-Back 알고리즘 순서도

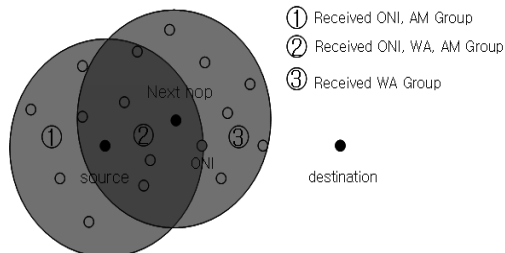


그림 8. next 홉 결정 프로세스

에서 노드 i 가 고립된 확률을 X_i 라 할 때, 이벤트 X 는 네트워크에서 최소한 하나의 고립된 노드가 있는 경우이다. 식 (5)에 따라 확률적으로 표현된다. 그림 9에서 이러한 확률 분포를 나타내었다.

이와 같이 10 홉 이상의 멀티 홉 네트워크에서 유한 connectivity를 갖도록 구성하기 위해서는 하나의 홉 이웃 노드 밀도가 10 이상의 값을 가져야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 조건을 바탕으로, 앞으로의 시뮬레이션은 이웃 노드 밀도가 10 정도인 경우를 기준으로 성능 분석 및 시뮬레이션을 수행한다.

4.2 neighbor node location

부분적인 지역에서 송신자로부터 하나의 홉 반경 안의 이웃 노드의 경우 가장 최적의 다음 홉(virtual optimal next hop)으로부터의 거리를 가지며 모든 이웃 노드들은 0부터 $2r$ 사이의 값을 가지게 된다.^[16] 모든 노드의 전송 범위가 r 로 동일하다고 가정하였다. 식 (1)에 의해서 구해진 동일한 면적(=노

드의 분포가 동일한 확률을 가지는) 시간 슬롯 10개의 분배는 그림 10과 같다.

4.3 real next hop location

Geo-Back 알고리즘대로, n 개의 노드가 있을 때, 여기에 n 개의 시간 슬롯을 할당하는 경우(즉 하나의 홉 이웃 노드 수 = 시간 슬롯 수), 시간 슬롯 확률은 식 (6)~식 (9)과 같다. 바꿔 말하면, n 개의 노드에 n 개의 슬롯을 할당했을 때, m 번째 슬롯에 k 개의 노드가 존재할 확률을 의미한다. 우선, 시간 슬롯 1에 해당하는 지연 시간을 가지고, 시간 슬롯 1에 해당하는 노드가 k 개 있을 확률,^[17]

$${}_nC_k \left(\frac{1}{n}\right)^k \left(\frac{n-1}{n}\right)^{n-k} \tag{6}$$

시간 슬롯 1에는 노드가 없고, 시간 슬롯 2에 해당하는 노드가 k 개 있을 확률,

$${}_nC_k \left(\frac{1}{n}\right)^k \left(\frac{n-2}{n}\right)^{n-k} \tag{7}$$

시간 슬롯 1, 2에는 노드가 없고, 시간 슬롯 3에 해당하는 노드가 k 개 있을 확률,

$${}_nC_k \left(\frac{1}{n}\right)^k \left(\frac{n-3}{n}\right)^{n-k} \tag{8}$$

시간 슬롯 1, ..., (m-1)에는 노드가 없고, 시간 슬롯 m 에 해당하는 노드가 k 개 있을 확률,

$${}_nC_k \left(\frac{1}{n}\right)^k \left(\frac{n-m}{n}\right)^{n-k} \quad m-1 \leq n \tag{9}$$

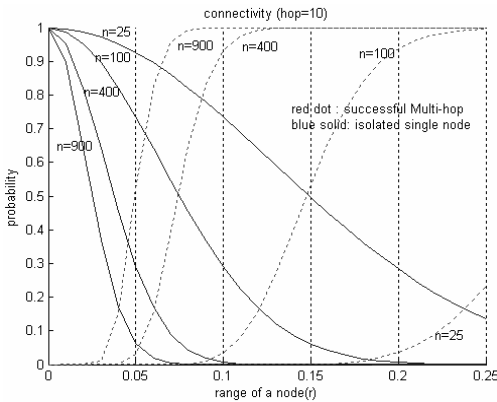


그림 9. Connectivity

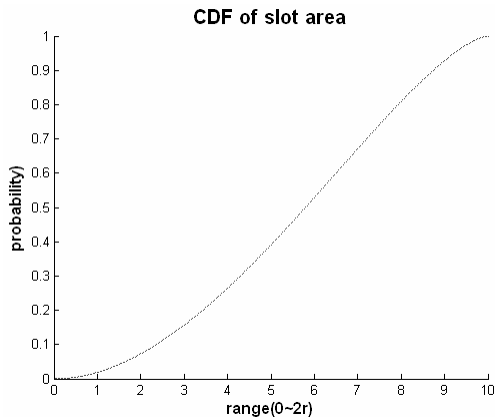


그림 10. CDF of slot area

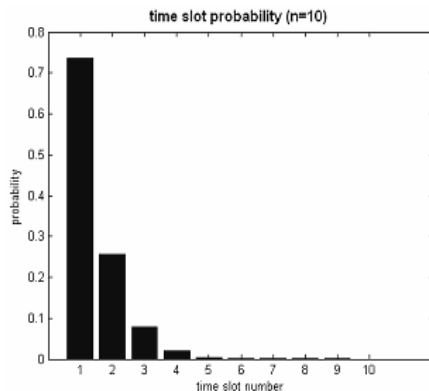


그림 11. 시간 슬롯 확률

표 1. 시간 슬롯, ONI로부터의 거리와의 확률 관계

Time slot 수 (n)	ONI로부터의 거리 (r)	Time slot 확률
1	0.00~0.472	0.7361
2	0.472~0.684	0.2565
3	0.684~0.858	0.0787
4	0.858~1.014	0.0204
5	1.014~1.160	0.0042
6	1.160~1.300	0.0006
7	1.300~1.440	0.0001
8	1.440~1.586	0.0000
9	1.586~1.748	0.0000
10	1.748~2.000	0.0000

V. 실험 및 결과 분석

시뮬레이션은 장방형 토폴로지 환경에서 이 안에 이미 정해진 밀도에 부합하도록 노드가 uniform 분포를 가지고 위치하게 된다. 밀도의 정의는 노드 하나의 전송 범위에 따른 원 면적을 기준단위로 한다. 이렇게 네트워크의 토폴로지가 결정되면 소스 노드와 목적지 노드가 결정되고 이를 연결해주는 라우팅 알고리즘을 적용하여 경로 발견이 이루어지는 과정을 flooding 방식과 GPSR 방식, 그리고 Geo-Back 방식을 이용하여 결과를 도출하고 이 세 가지 방식을 비교하였다. 각각의 알고리즘을 이용하였을 경우 나타나는 데이터 전달 성공률(success ratio), 지연(delay), 에너지 소모(energy consumption)등을 서로 비교하였다.

5.1 Simulation Environment

시뮬레이션은 각 환경이 바뀔 때마다 1000회를 기준으로 하였으며, 시뮬레이션 환경은 다음과 같다.

5.2 Simulation Results

그림 12 (위)는 100x100의 토폴로지에 밀도가 11일 때 Geo-Back 알고리즘대로 패킷 전달이 성공한 경우의 라우팅 모습이다. 소스와 목적지, ONI, 전송범위(점선) 그리고 라우팅 경로(가운데 직선)를

표 2. 시뮬레이션 환경 (MATLAB 7.0^[18])

Item	Value
Protocol	Geo-Back, GPSR, Flooding
Topology size	50×50, 75×75, 100×100 (unit*unit)
Transmission range	5 (unit)
Energy consumption	Transmitting : 0.66W ^[19] Receiving : 0.395W ^[19]
Density (the number of nodes in one hop range)	6~20 (nodes/π*5unit*5unit)

나타낸 동작 결과이다. 그림 12 (아래)는 100x100의 토폴로지에 밀도가 11인 동일 환경에서 Dead Zone이 발생한 경우에 데이터 전달이 성공한 경우의 결과 모습이다. 네트워크에서 에너지가 소진되어 부분적으로 노드들이 죽은 경우, 일정 시간에 Dead Zone이 부분적으로 나타날 수 있으므로 그와 같은 경우에 중간에 정상적인 경로를 찾지 못하더라도, 수신하였던 모든 노드들이 한 번씩까지는 전송할 수 있도록 하여 우회경로를 찾을 수 있는 방법을 사용하였다. 그림과 같이 비록 지연되어 진행되지만 진행했던 방향과 반대되는 방향으로도 경로를 찾아보게 된다.

5.3 Routing success rate

시도한 횟수 (1000회, flooding은 100회)에 대한 성공 횟수를 비율로 나타낸다. 이후의 표에 나타나는 데이터는 라우팅이 성공한 경우에만 데이터를 산정하였다. 그림 13에서 나타난 것과 같이, Geo-Back

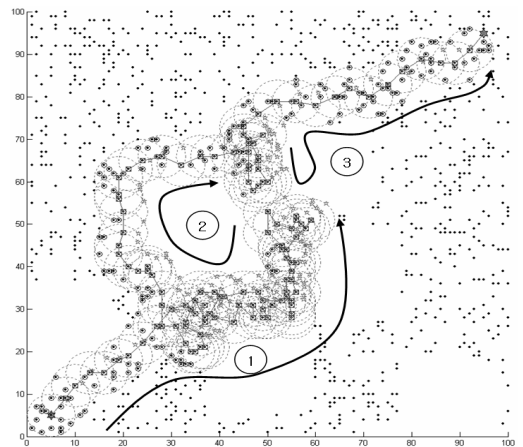
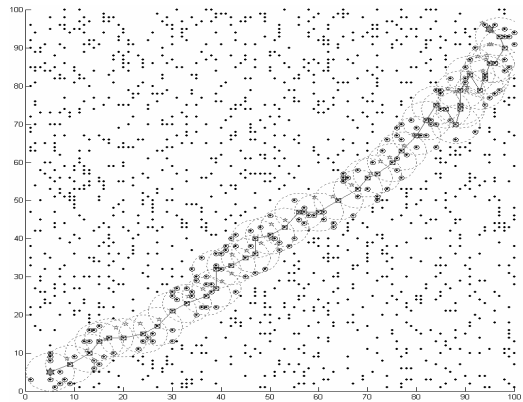


그림 12. Geo-Back 동작 시뮬레이션 결과 (위)와 Geo-Back의 우회 경로 동작 결과 (아래)

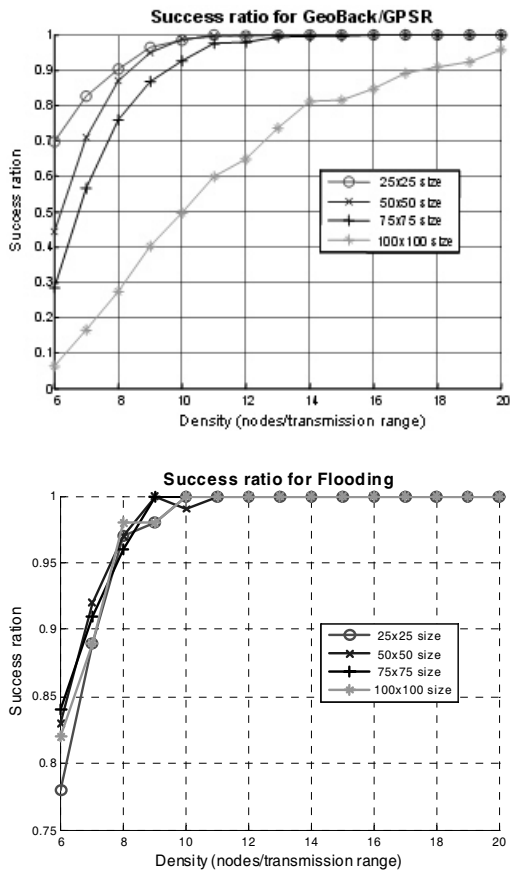


그림 13. Success ratio for GeoBack/GPSR (위)와 Flooding (아래)

과 GPSR의 경우 데이터 전송 성공률은 거의 동일하다. 그 이유는 다음 홉을 찾는 기준이 목적지와 가까운 정도를 척도로 사용하는 메커니즘이 동일하기 때문이다. 이것을 flooding과 비교하여 성공 확률에 대해 알아 볼 수 있다. 밀도에 따라 성공 확률이 변화하는데, 밀도가 낮은 경우 하나의 홉 내에 노드 수가 적기 때문에 전송될 확률이 낮아지며, 토폴로지 크기가 커질수록 소스에서 목적지까지의 홉 수가 증가하게 되어 각각의 홉에서 성공하여야 하므로 지수적으로 성공할 확률이 감소한다. 이에 반하여 그림 13과 같이 flooding 방식의 경우 완벽하지는 않지만 훨씬 더 확률적으로 성공 확률이 높으며, 밀도가 낮거나 네트워크의 사이즈가 커져도 Geo-Back 등에 비해 높은 성공 확률이 보장됨을 알 수 있다.

5.4 Delay

각각의 지연은 그림 14와 같이 나타난다. Geo-Back에서는 GPSR과 유사하지만, 이웃 노드의 위치 정보를 필요로 하지 않으므로 그 정보를 받는 시간이 없지만, 송신자가 패킷을 전송하기 전에 back-off 시간이 존재하므로 이 값들을 전송 시 더해주어 지연이 증가하게 된다. GPSR에서는 송신자의 경우 이웃 노드의 위치정보를 받아야 하므로 이러한 정보를 받는데 걸리는 시간을 측정하여 반영하였다. flooding 방식의 경우 모든 노드가 송신자가 되기

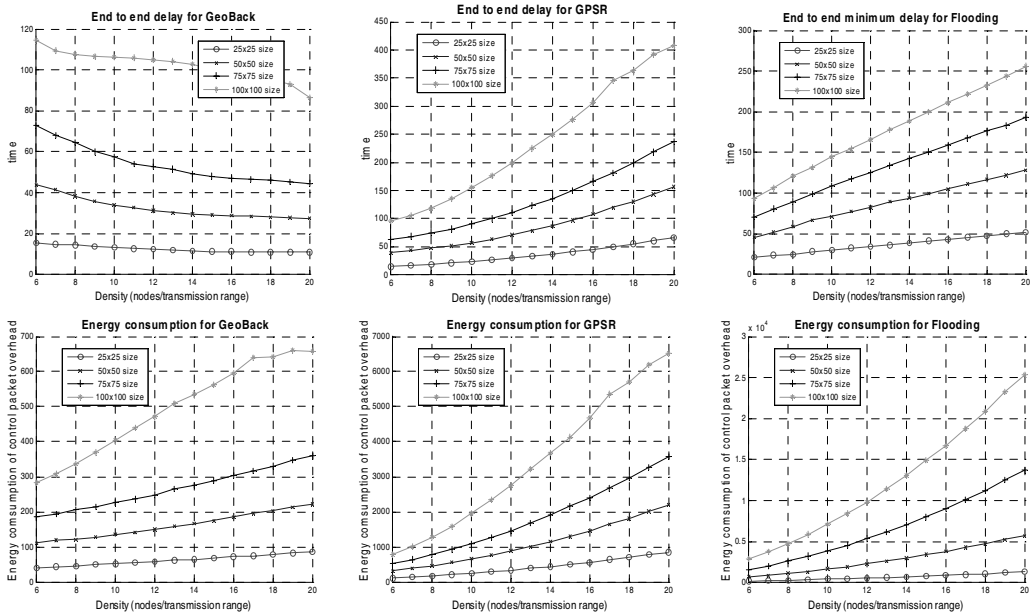


그림 14. End-to-end delay (위) / 그림 15. Energy consumption (아래)

때문에 주변 노드의 전송에 따라 기다려야 하는 시간이 지연에 더해지고, 홉 수를 지남에 따라 지연이 증가한다. 여러 경로로 도착한 메시지 중에서 최초로 목적지에 도달하는 시간을 기준으로 지연을 결정하였다. 가장 특징적인 것은 Geo-Back만이 유일하게 밀도가 증가할수록 지연이 작아진다는 것이다. 밀도가 증가한다는 것은 노드의 수가 많아진다는 점이 있는데, 이것이 GPSR에서는 이웃 노드의 위치 정보 수신 횟수가 많아지고, flooding에서는 송신자의 수가 증가하게 되므로 지연이 증가하는 원인이 되었지만, Geo-Back에서는 이러한 정보를 주고받지 않고, 대신 슬롯 시간에 의한 지연이 평균적으로 감소하기 때문에 더 작은 값을 나타낸다.

5.5 Energy consumption

각 노드의 에너지 소모는 크게 전송과 수신으로 나뉘며 두 종류의 에너지는 0.66과 0.395의 비율^[19]로 계산되었다. Idle listening에 의한 에너지 소모는 적용 MAC (Medium Access Control)에 따라 가변적이므로 고려하지 않았다. Geo-Back은 에너지를 최우선 목적으로 설계된 알고리즘이다. 에너지를 줄일 수 있는 가장 큰 부분이 제어 패킷(control packet) 오버헤드일 것이다. 이것은 시간과 상관관계에 있으므로 최대한 제어 패킷의 사용을 줄이게 된다. 에너지 소모 원인을 보게 되면, Geo-Back에서는 네트워크 크기가 증가하더라도 그 크기에 단순 비례해서 증가하며, 이는 스스로부터 목적지까지의 홉 수에 비례하게 된다. 다만 밀도가 증가함에 따라서 각 홉의 수신 노드수가 증가하므로 에너지 소모가 증가하게 된다. 이에 반해 GPSR은 네트워크 사이즈가 증가함에 따라 전송해야 하는 이웃 노드의 위치 정보 양이 많아지고, 그 위치정보를 받는 노드 수도 증가하여 밀도가 증가할수록, 네트워크 크기가 커질수록 에너지 소모가 증가한다. flooding은 모든 노드가 송신자가 되고 수신하는 횟수도 많으므로, 네트워크 크기가 커지고, 밀도가 증가할수록 에너지 소모가 급격하게 증가한다.

VI. 결론

본 논문에서 무선 센서 네트워크를 위한 Geographical Back-off Routing (Geo-Back) 알고리즘을 제안하였다. Geo-Back은 위치 정보를 이용하는 응용에서 각 노드의 위치 정보를 이용하여 경로를 결정하고, 이를 위한 라우팅 오버헤드를 줄일 수 있는 방법으로, 기존의 GPSR 등과 같이 이웃 노드들의 위치 정보

를 주고받는 것이 아닌, 주변 노드들의 위치 정보를 통해 back-off 시간을 결정하여 최적의 다음 홉 노드를 결정짓고 전송하게 되는 방법을 통해, 네트워크 전체적으로 오버헤드가 줄어들고 이를 통해 에너지 소모를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. 특히, 네트워크에서 노드의 밀도가 늘어날수록 다른 위치기반 라우팅 프로토콜에 비해 에너지 소모가 적기 때문에 높은 밀도를 가지고 구성되는 네트워크에 적합하다. 또한, Geo-Back의 시간 슬롯 사용은 단순히 지연을 증가시키고, 에너지를 절감하는 것 이외에 MAC의 관점에서 볼 때 미리 시간 슬롯에 해당하는 그룹으로 나누어짐으로 인한 경쟁하는 노드 수가 줄어들기 때문에 충돌 확률이 줄어든다. 특히, 이동 환경에서 전송 전에 미리 이웃 노드의 위치 정보를 주고받아 알게 되는 경우, 위치 정보의 정확성이 시간이 지남에 따라 떨어지게 될 것이지만, 시간 슬롯을 사용하게 되면 전송 시에 위치 정보를 파악하기 때문에 이웃 노드의 위치 정보가 항상 실제 시간으로 확인되는 효과를 가질 수 있다. 이러한 이동 환경에서의 보다 자세한 성능 비교 및 분석을 추후에 진행 할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 김재현, 김석규, 이재용, “무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 MAC/라우팅 프로토콜,” 전자공학회지, 제32권 7호, July, pp. 825-841, 2005.
- [2] Perkins, C., “Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing,” IETF RFC 3561, July 2003.
- [3] Perkins, C., and Bhagwat, P., “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR),” Internet-Draft, draft-ietf-manet-drs-10.txt July 2003.
- [4] H. Kar, A. Willing, A. Wolisz, “Wireless Sensor Networks: First European Workshop,” EWSN 2004, Berlin, Germany, Proceedings, pp. 122-187, January 2004.
- [5] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals,” IEEE Trans. Communications, Vol.32, no.3, pp. 246-257, March 1984.
- [6] B. Karp and H. Kung, “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” ACM

International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'00), 2000.

[7] Haiyun L., Fan Y., Jerry C., Songwu Lu, Lixia Zhang, "TTDD: A Two-tier Data Dissemination Model for Large-scale Wireless Sensor Networks," Multimedia Operating Systems and Networking Group(MONET03), 2003.

[8] J. Hightower and G. Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing," *IEEE Computer Magazine*, 2001.

[9] S. Biswas and R. Morris, "ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks," SIGCOMM'05, August 2005.

[10] J. Albowitz, A. Chen, and L. Zhang, "Recursive Position Estimation in Sensor Networks," ICNP'01, 2001.

[11] ABRAMSON, N., "The ALOHA system - another alternative for computer communications," AFIPS 37, pp. 281-295, 1970.

[12] James F.Kurose, Keith W.Ross, "Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet," pp. 294-406, 2005.

[13] A.B.McDonald, "A Mobility-based Framework for Adaptive Clustering in Wireless Ad-Hoc Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8), 1999.

[14] A. Papoulis, S. U. Pillai, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes," pp. 169-242, 2002.

[15] A. Kimar, D. Manujunath, J. Kuri, "Communication Networking: an analytical approach," pp. 436-531, 2004.

[16] Gabriel, K., and Sokal, R. "A New statistical approach to geographic variation analysis," *Systematic Zoology* 18, pp. 259-278, 1969.

[17] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Std. 802.11-1997, 1997.

[18] <http://www.mathworks.com>

[19] C. Intanagonwiwat et al., "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.11, No.1, February 2003.

김 재 현 (Jaehyun Kim)

정회원



1997년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업
 2003년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 석사
 2003년 9월~2004년 4월 : SK 텔레텍 연구원
 2004년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야> Ad-Hoc/Ubiquitous Sensor Network, Wireless Multi-hop Routing/MAC Protocol Design, Mobile/Reliable Multicast

심 인 보 (In-bo Sim)

정회원

1995년 3월 : 공군사관학교 전자공학과 졸업
 2000년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 공학석사
 2006년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <주관심분야> 유비쿼터스 센서 네트워크

김 홍 (Hong Kim)

정회원

2004년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업
 2006년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 공학석사
 2006년 3월~현재 : 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부 연구원

<주관심분야> 센서 네트워크, 3G/4G 이동통신 시스템, GSM/WCDMA 이동통신 시스템

이 재 용 (Jai-yong Lee)

정회원



1977년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업
 1884년 5월 : IOWA State University 공학석사
 1987년 5월 : IOWA State University 공학박사
 1987년 6월~1994년 8월 : 포항공과대학 교수

1994년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
 <주관심분야> Protocol Design for Wired/Wireless QoS Management, Ubiquitous Sensor Network, Wireless Multimedia Support Protocol