무선 센서 네트워크에서 확률 기반의 클러스터링을 이용한 계층적 데이터 전송 프로토콜

A Probability-based Clustering Protocol for Data Dissemination in Wireless Sensor Networks

김 문 성* 조 상 훈** 임 형 진*** 추 현 승****
Moonseong Kim Sang-Hun Cho Hyung-Jin Lim Hyunseung Choo

요 약

무선 센서 네트워크를 위한 데이터 전송의 설계 중에서 가장 중요한 이슈 중 하나는 에너지 효율적인 측면이다. 이를 위해 최근 여러 연구들이 진행되고 있으며 그중에서 가장 대표적인 프로토콜은 SPMS이다. SPMS의 주요 특징 중 하나는 에너지 소비를 줄이기 위한 수단으로 최단경로를 사용한다는 것이다. 그러나 반복적인 최단 경로의 사용으로 인하여 네트워크 라이프타임의 최대화는 불가능하다. 본 논문에서는 에너지 잔존량과 거리를 메트릭으로 사용하는 확률 함수 기반의 데이터 전송 프로토콜을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안 프로토콜은 에너지 효율적인 데이터 전송을 하며 SPMS보다 네트워크 라이프타임이 약 78%증가하였다.

Abstract

One of the major challenges of designing a dissemination protocol for Wireless Sensor Networks (WSNs) is energy efficiency. Recently, this issue has received much attention from the research community, and SPMS, which outperforms the well-known protocol SPIN, specially is a representative protocol. In addition, one of many characters of SPMS is the use of the shortest path to minimize the energy consumption. However, since it repeatedly uses the same path as the shortest path, the maximizing of the network lifetime is impossible, though it reduces the energy consumption. In this paper, we propose a dissemination protocol using probability-based clustering which guarantees energy-efficient data transmission and maximizes network lifetime. The proposed protocol solves the network lifetime problem by a novel probability function, which is related to the residual energy and the transmission radius between nodes. The simulation results show that it guarantees energy-efficient transmission and moreover increases the network lifetime by approximately 78% than that of SPMS.

☞ keyword : Wireless Sensor Network, Data Dissemination Protocol, Energy Efficiency, Network Lifetime, SPIN, SPMS.

1. 서론 및 관련 연구

WSN(Wireless Sensor Network)에서 데이터의 전송[1]은 광범위하게 분포한 수 만개의 센서노드들이 데이터를 수집하고 전달하기 때문에 중요한 부분이다. 수집한 데이터를 전송하기 위한 대표적인 Proactive 프로토콜로는 Flooding과 SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation [2])이 있다. Flooding은 데이터를 수신한 노드가 모든 이웃 노드들에게 전달하는 방식이며 각 노드의 상태정보 관리 없이 전송만하는 가장 간단한 프로토콜이다. Flooding은 간단히 데이터의 빠른 전송을 보장하지만 중복전송으로 인한 에너지 소비는 피할 수 없다. SPIN은 메타데이터를 사용하여 이웃노

* 정 회 원 : Visiting Research Associate, Michigan State University, USA mkim@msu.edu
** 정 회 원 : 성균관대학교 컴퓨터공학과 박사과정 shcho@ece.skku.ac.kr
*** 정 회 원 : 금융보안연구원 인증관리팀 선임연구원 hjlim@fsa.or.kr
**** 종신회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 부교수 choo@skku.edu
[2008/09/25 투고 - 2008/09/26 심사 - 2008/11/20 심사완료]

드들과의 정보교환을 통해서 중복전송 문제를 해결하였다. 하지만 SPIN에서는 데이터 전송 시 노드간의 거리를 고려하지 않고 모든 데이터를 같은 파워레벨로 전송하기 때문에 효율적인 데이터 전송이 이루어 지지 않는다.

SPMS(Shortest Path Minded SPIN [3])는 SPIN에서 메타데이터의 개념을 빌려왔으며 데이터 전송 시 센서노드간의 거리가 멀수록 지수적으로 증가하는 에너지 소모를 피하기 위해 멀티 홉 모델을 쓴다. 멀티 홉 라우팅을 하기 위해서는 라우팅 테이블을 생성하고 유지하는데, 비용을 감소하기 위해서 SPMS에서는 최대반경으로 정의한 존(zone) 내부에 대해서만 라우팅 테이블을 유지한다[4]. Distributed Bellman-Ford 알고리즘을 통해 각 노드는 최단경로를 가지는 라우팅 테이블을 생성할 수 있다.

SPMS는 최단경로를 통해서 데이터를 전달하지만 노드실패 시 더 이상 최단경로를 이용하지 못한다. 이러한 문제점을 개선한 것이 SPMS-Rec (SPMS-Recursive [5])이며 노드실패가 없을 때는 SPMS와 동일하게 동작한다. 노드가 데이터를 전송받지 못하면 바로 소스노드에게 데이터를 요청하는 SPMS에 비해 SPMS-Rec에는 좀 더 가까운 노드에서 데이터를 전달받을 수 있다.

본 논문에서는 네트워크 라이프타임*을 획기적으로 증가시키면서 에너지 효율 전송을 보장하는 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 SPMS의 단점인 고정된 최단경로 사용에 기인한 짧은 네트워크 라이프타임을 데이터 전송 시 노드 에너지잔량을 고려한 경로의 설정을 통해 크게 증가시켰다. 또한 두 가지 속성을 고려해 가중치에 따라 경로선택을 좀 더 유연하게 하였다.

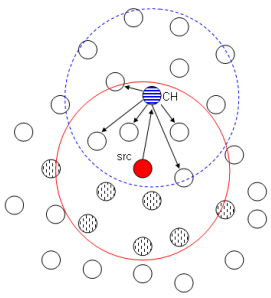
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 제안 프로토콜의 목적과 구성요소 및 동작 과정, 3장에서는 시뮬레이션 결과를 보이고 제안 프로토콜의 몇 가지 특성을 고찰 한 후, 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

* 본 논문에서는 전체노드 중 어느 한 개의 센서노드가 수명이 끝나는 시점까지로 정의함

2. 제안하는 방식

2.1 구성요소

에너지 효율은 네트워크의 노드들에게 데이터를 전송 할 때 그 경로를 짧게 함으로써 달성할 수 있다. 그리고 네트워크 라이프타임은 노드의 잔여 에너지를 고려한 알고리즘을 통해 에너지 소모를 고루 분산시킴으로써 달성 가능하다. 본 논문에서 제안하는 데이터 전송 프로토콜은 확률함수에 의한 클러스터링 기법을 구현한다.



(그림 1) 클러스터링 기법

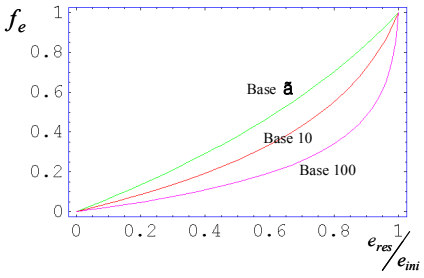
그림 1에서 소스 노드(src)가 이벤트를 감지해 광고 메시지(ADVold)를 전파하면 전송 반경 안의 노드들은 CH(Cluster Head node)가 될지를 스스로 판단한다. 이 때 그 결과로 그림의 CH 노드들이 선정되었다고 가정하면 이벤트를 감지한 노드는 오직 CH에게만 데이터를 전송한다. 그런 후 CH들은 다시 자신의 이웃 노드들에게 광고 메시지(ADVnew)를 전파하고 나머지 노드들 중 ADVnew를 받은 노드들은 이들 CH에게서 데이터를 수신한다. 즉, 조건이 뛰어난 CH들이 그렇지 않은 다수의 노드를 담당함으로써 좀 더 많은 에너지를 사용하지만 훨씬 많은 수의 노드들이 에너지를 보존 한다. 이와 같은 방법이 제안프로토콜의 기본 클러스터링 기법이다.

두 번째는 확률 함수에 대한 설명이다. 앞서 설명한 클러스터링 기법에서 가장 중요한 것은 CH

를 선택하는 방법이다. 어떻게 CH를 선정할 것인가는 곧 얼마나 좋은 성능을 보장하는가를 결정짓는 핵심적인 요인이다. 본 논문에서는 두 가지 메트릭으로 구성한 확률 함수를 통해 CH 노드를 선정하도록 하였다. 이 두 가지 메트릭은 각각 노드의 에너지 잔존량과 이벤트를 감지한 노드로부터 자신까지의 거리를 이용한다. 각각의 메트릭에 대한 수식은 아래와 같다.

$$f_e = -\log_b(m - \frac{e_{res}}{e_{ini}}) + n \qquad (1)$$

$$m = \frac{b}{b-1},\ n = 1 - \log_b(b-1) \qquad (2)$$

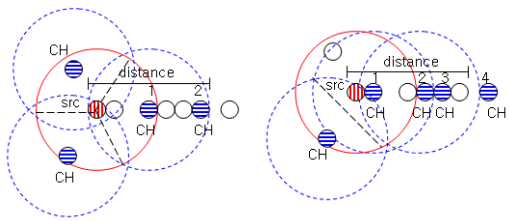


(그림 2) 에너지 메트릭 함수

식(1)은 에너지 메트릭에 대한 함수이다. 이 함수는 에너지의 잔존량에 따라 변화하는 함수로 잔존량이 클수록 1에 가깝게 잔존량이 작을수록 0에 가까운 값을 가져야한다. 즉, 에너지의 잔존량이 많을수록 클러스터 헤드가 될 가능성을 크게 한다. 이 때 에너지의 변화량에 보다 민감하게 반응하기 위해 log함수를 사용하였다. 식(2)는 (1)식의 함수가 (0, 0)과 (1, 1)이라는 조건을 만족하도록 방정식을 풀었을 때의 m과 n의 값이다. 이 함수에서 e_{res}와 e_{ini}는 각각 에너지의 잔존량과 초기값을 나타낸다. 에너지 메트릭 식(1)의 그래프는 그림 2와 같다.

$$f_d = \frac{distance(node_1, node_2)}{radius} \qquad (3)$$

식(3)은 거리 메트릭에 대한 함수이다. 이 메트릭은 메시지의 송수신 시 두 노드 사이의 거리가 데이터 전송 반경에 가까울수록 1에 근접한 값을 갖는다. 그림 3에서는 존의 경계에서 CH가 선택될 경우와 존의 중심에 가깝게 CH가 선택된 경우를 비교하고 있다. 그림 3(a)의 경우 한 번의 릴레이를 통해 전송 가능한 거리를 그림 3(b)에서는 세 번 이상이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이것은 곧 중간 과정에서 불필요한 에너지 손실이 발생하는 것을 의미하며 전체적으로 에너지 효율이 낮아지게 된다.

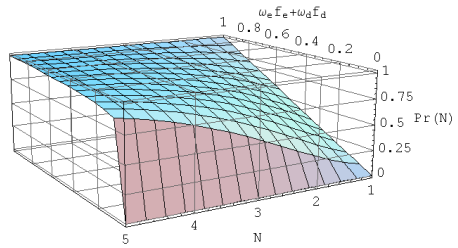


(a) (b)

(그림 3) CH 선정 거리에 따른 비교

$$\Pr(N) = (\omega_e f_e + \omega_d f_d)^{2^{-(N-1)}} \qquad (4)$$

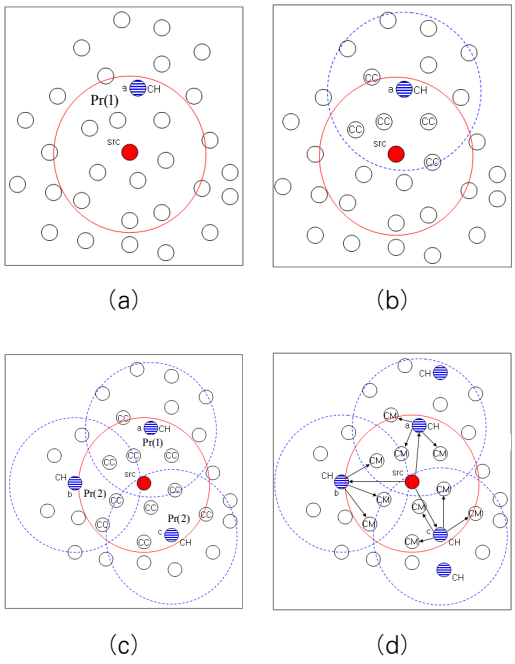
여기서 $\omega_e,\ \omega_d \geq 0$ 그리고 $\omega_e + \omega_d = 1$이다.



(그림 4) 확률함수 $\Pr(N)$

식(4)는 에너지와 거리 메트릭을 사용한 확률 함수 모델이다. 여기서 ω_e, ω_d는 각각의 메트릭에 대한 가중치이며 두 가중치의 합은 1이기에 확률 함수의 값 역시 0과 1사이의 값을 갖는다. 위 확률 함수는 N에 대한 함수로 표현되어 있는데, 이 값은 첫 시행 시에 1의 값을 갖는다. 이 때 광고 메시지를 받은 노드들은 확률 값 $\Pr(1)$을 통해 CH가 될 것인지를 스스로 판단한다. CH로 선정된 노드들은 다시 자신의 이웃노드에게 ADVnew를 전파하고 ADVnew를 수신안한 노드들은 N의 값을 1 증가 시키며 다음 반복으로 넘어간다. 여기서 N 은 확률 함수의 값을 점차 증가시키는 기능을 하며 결과적으로 CH가 될 확률을 높이는 역할을 한다. 그림 4는 N 의 증가에 따른 함수 $\Pr$의 변화 모습을 보여주고 있다. N 은 ADVold를 받았던 모든 노드가 데이터를 수신할 때까지 증가한다.

2.2 동작과정



(그림 5) 제안프로토콜의 동작과정 예제

본 제안프로토콜의 동작 과정에서 노드들은 총 네 가지의 상태가 될 수 있다. 네 가지는 각각 UN(Unclustered Node), CH(Cluster Head), CC(Cluster Candidate), 그리고 CM(Cluster Member)이다. UN은 어떤 광고메시지나 데이터도 받지 않은 상태이고 CH는 클러스터 헤드로 선정된 상태이다. 그리고 CC는 광고메시지를 받았지만 데이터를 수신 할 CH를 결정하지 않은 상태이다. 마지막으로 CM은 데이터를 받을 CH를 최종적으로 결정한 상태이다.

그림 5는 제안프로토콜의 동작과정을 예를 들어 설명한다. 소스 노드(src)가 이벤트를 감지하면 자신의 존(전송반경) 내부의 노드들에게 ADVold를 전송한다. 그림 5(a)에서처럼, 첫 번째 반복에서 a 노드가 CH로 선정되었다고 가정하면 그 노드는 CH 선정 직후 자신의 이웃 노드들에게 광고 메시지를 전송한다. 그림 5(b)처럼 CH의 존 내부의 노드들은 ADVnew를 수신하고 실선 원과 파선 원의 교집합에 속한 노드들은 CC 상태가 된다. 만약 다음 반복에 그림 5(c)처럼 b와 c노드가 CH 노드로 선정되었다고 가정하면 b와 c노드는 자신의 이웃 노드들에게 ADVnew를 전송한다. 그리고 이 메시지를 받은 노드는 역시 CC 상태가 된다. 이렇게 ADVold를 받았던 모든 노드의 상태가 CH나 CC가 되면 CC 상태의 노드들은 자신이 받았던 ADVnew의 세기를 비교한다. 그리고 그 중 가장 신호의 세기가 센 패킷을 송신한 노드를 자신이 데이터를 수신 할 CH로 선정한다. 이 과정이 끝나면 모든 CC는 CM상태가 되게 되고 클러스터 헤드 노드의 선정과정이 종료된다. CH 선정 과정이 종료된 이후에는 그림 5(d)처럼 CH는 ADVold를 전송한 노드에게 데이터를 요청하고 CM은 CH에게 데이터를 요청한다. 동작과정에 대한 의사코드는 다음과 같다.

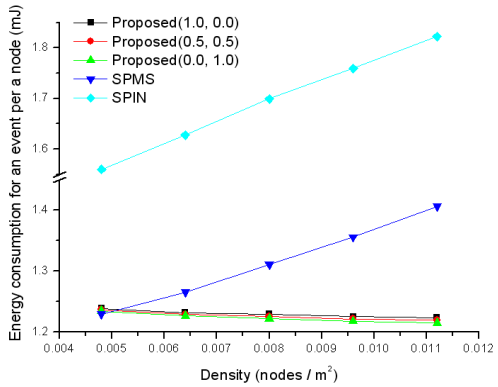
ProposedScheme(ω_e, ω_d)

01. 이벤트 발생
02. 이웃노드들에게 ADV_{old} 전송
03. $N=1$
04. ADV_{old} 수신 노드는 $\Pr(N)$을 사용해 CH 여부를 판단, 즉 $random(0,1) \le \Pr(N)$이면 CH로 선정
05. If(CH로 선정)
06. 이웃 노드들에게 ADV_{new} 전송
07. ADV_{new} 수신 노드는 상태를 CC로 변경
08. Else UN 상태로 돌아감
09. While(1)
10. $++N$
11. UN 상태의 노드들은 일정 시간 후 $\Pr(N)$을 사용해 CH 여부를 판단
12. If(CH로 선정)
13. 이웃노드들에게 ADV_{new} 전송
14. ADV_{new} 수신 노드는 상태를 CC로 변경
15. Else UN 상태로 돌아감
16. If(모든 노드상태가 CH, CC) Break
17. CC는 수신한 ADV_{new}의 신호세기를 비교해 가장 센 CH를 선택후 CM 상태로 변경
18. CH는 ADV_{old} 전송 노드에게 데이터 요청
19. CM은 자신이 선택한 CH에게 데이터 요청

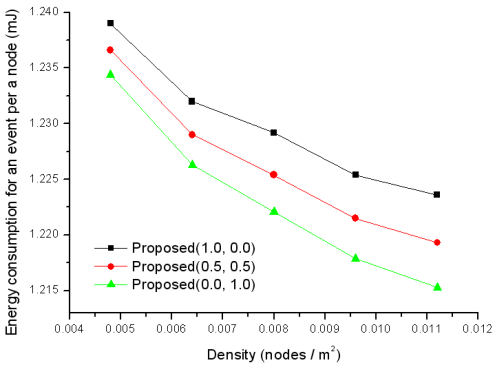
3. 성능평가

제안하는 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 JAVA로 제작한 시뮬레이터를 사용하였다. 네트워크의 노드들은 $250m \times 250m$ 범위에 임의로 분포하였고 데이터의 전송 반경은 $35m$로 설정하였다. 노드의 초기 에너지 값은 $0.5J$이며 광고 메시지와 요청 메시지의 크기는 $16Bytes$, 데이터의 크기는 $500Bytes$이다. 데이터 송수신에 필요한 에너지 소모 모델은 $E_t(d) = \alpha_{11} + \alpha_2 d^2$, $E_r = \alpha_{12}$을 사용하였다[6]. E_t는 송신에 필요한 에너지 이며 E_r은 수신에 필요한 에너지이다. 또한 노드가 데이터를 수신해 다시 전송하는데 필요한 에너지 $E_{relay}(d)$는 $\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_2 d^2$ 이다. 그리고 상수 α_{11}과 α_{12}는 $80nJ/bit$, α_2는 $100pJ/bit/m^2$으로 설정하였다. 여기서, α_{11}은 송신장치가 데이터 송신 시 1비트 당 소모하는 에너지이며, α_2는 연산 증폭기(op-amp)가 소모하는 에너지다. α_{12}는 수신 장치가 데이터 수신 시 1비트 당 소모하는 에너지이다. 식(1)에서 $\log$함수의 밑 b는 10으로 설정하였다.

그림 6에서는 제안한 프로토콜을 SPIN, SPMS와 이벤트 당 노드의 평균 에너지 소모율 측면에서 비교하고 있다. 이벤트 당 노드의 평균 에너지 소모율은 프로토콜의 에너지 효율적 데이터 전송 정도를 나타내는 기준이 된다. 제안 프로토콜은 SPIN과 비교하였을 때, 약 21~33% 정도 향상 되었으며 SPMS에 비해서는 3~13% 정도의 성능 향상을 보였다. 그래프에서 보이듯이 제안 프로토콜은 밀도가 높을수록 전송효율이 더 높게 나타났다. 그림 7에서는 거리 메트릭에 대한 가중치가 증가할수록 에너지 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

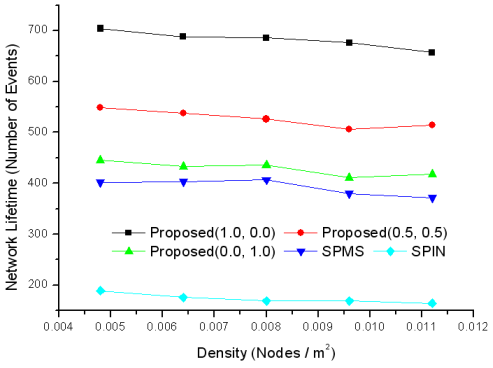


(그림 6) 이벤트 당 노드의 평균 에너지 소모율 1



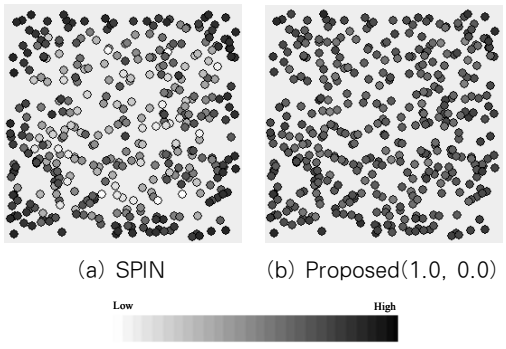
(그림 7) 이벤트 당 노드의 평균 에너지 소모율 2

그림 8에서는 제안프로토콜의 각 3가지 경우와 SPIN, SPMS의 네트워크 라이프타임을 밀도의 변화에 따라 비교하고 있다. 에너지 메트릭만을 고려한 경우($\omega_e = 1$) SPMS에 비해 71~78%의 성능 향상을 보였다. 그리고 에너지와 거리를 함께 고려한 경우 29~38%, 거리만을 고려($\omega_d = 1$)하였을 때는 8~12%의 성능 향상을 보였다. 그리고 SPMS와 제안 프로토콜 모두 SPIN에 대해서는 현격한 성능 차이를 보였다.



(그림 8) 네트워크 라이프타임

그림 9의 모습은 400회의 동일한 이벤트 발생 후 네트워크의 에너지 분포에 대한 모습이다. SPIN의 경우 상당수의 노드가 이미 에너지를 모두 소모한 것을 알 수 있다. 그러나 제안 프로토콜의 경우 에너지 메트릭만 고려했을 때 에너지 분포가 매우 균일하다는 것을 알 수 있다.



(a) SPIN (b) Proposed(1.0, 0.0)

(c) 에너지 레벨

(그림 9) 에너지 소모 분포도

4. 결 론

본 논문에서는 에너지 효율적으로 데이터를 전송하는 동시에 네트워크 라이프타임을 최대화 할 수 있는 무선 센서 네트워크(WSN)의 Proactive 프로토콜을 제안하였으며, 밀도가 높아질수록 SPIN, SPMS 보다 에너지 효율이 더욱 높았다. 그리고 네트워크 라이프타임은 SPMS에 비해 최대 78%가 향상되었다. 또한 에너지와 거리 메트릭의 가중치를 조절함으로써 에너지 효율적인 프로토콜과 네트워크 라이프타임을 강조한 프로토콜 사이에서 적절히 목표를 달성할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문의 연구 및 성능평가를 위해 많은 도움을 주신 조지훈 학우에게 감사의 마음을 전합니다. 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과 (IITA-2009-(C1090-0902-0046)) 및 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-357-D00172)임. 교신저자 : 추현승

참 고 문 헌

[1] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," IEEE Wireless Communications, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, December 2004.

[2] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," ACM/IEEE MOBICOM 99, August 1999.

[3] G. Khanna, S. Bagchi, and Y.-S. Wu, "Fault Tolerant Energy Aware Data Dissemination Protocol in Sensor Networks," IEEE Dependable Systems and Networks (DSN), pp. 739-748, 2004.

[4] Z. J. Haas and M. R. Pearlman, "The performance of query control schemes for the zone routing protocol," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 9, no. 4, pp. 427-438, August 2001.

[5] R. Khosla, X. Zhong, G. Khanna, S. Bagchi, and E. J. Coyle, "Performance Comparison of SPIN based Push-Pull Protocols," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 3990-3995, March 2007.

[6] M. Bhardwaj, T. Garnett, and A. P. Chandrakasan, "Upper bounds on the lifetime of sensor networks," IEEE ICC 01, vol. 3, pp. 785-790, June 2001.

◐ 저 자 소 개 ◑

김 문 성(Moonseong Kim)

2007년 2월 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(박사)
2007년 3월 ~ 2008년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 연구교수
2007년 12월 ~ 현재 Visiting Research Associate, Michigan State University, USA
관심분야 : 라우팅 프로토콜, 모바일컴퓨팅, 센서네트워크, 네트워크 보안
E-mail : mkim@msu.edu

조 상 훈(Sang-Hun Cho)

2002년 2월 성균관대학교 수학과 졸업(학사)
2004년 8월 성균관대학교 수학과 졸업(석사)
2004년 9월 ~ 현재 성균관대학교 컴퓨터공학과 박사과정
관심분야 : 라우팅 프로토콜, 광 네트워크, 펨토셀 네트워크
E-mail : shcho@ece.skku.ac.kr

임 형 진(Hyung-Jin Lim)

2006년 8월 성균관대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사)
2006년 9월 ~ 2007년 8월 성균관대학교 박사후연구원
2007년 10월 ~ 현재 금융보안연구원 인증관리팀 선임연구원
관심분야 : IP 이동성관리, VPN, AAA 및 접근제어, 키관리 및 인증프로토콜, 멀티팩터인증
E-mail : hjlim@fsa.or.kr

추 현 승(Hyunseung Choo)

1996년 University of Texas 컴퓨터공학과 졸업(박사)
1998년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신공학부 부교수
2005년 10월 ~ 현재 지식경제부 ITRC 지능형HCI융합연구센터장
관심분야 : 유/무선/광네트워킹, 모바일컴퓨팅, 센서네트워크, 임베디드SW, 그리드컴퓨팅
E-mail : choo@skku.edu