

IEEE 802.15.4 무선 PAN의 Slotted CSMA/CA MAC 시뮬레이션

이해림*, 정민영**, 이태진**

Simulation of Slotted CSMA/CA MAC in IEEE 802.15.4 WPAN

Hae Rim Lee, Min Young Chung, Tae-Jin Lee

Abstract

IEEE 802.15.4 low-rate Wireless Personal Area Networks (WPAN) are expected to provide ubiquitous networking between small personal/home devices and sensors with low power consumption and low cost features. The technology employs special CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) to save power consumption for small or portable WPAN-enabled devices. In this paper, we simulation the slotted CSMA/CA of IEEE 802.15.4 MAC and evaluate its performance limit in order to grasp the characteristics of Medium Access Control (MAC) of IEEE 802.15.4 WPAN.

Key Words: IEEE 802.15.4, WPAN, CSMA/CA, MAC, Throughput, Simulation

* 성균관대학교 공과대학 전자전기공학과

** 성균관대학교 정보통신공학부

1. 서론

초기 무선 PAN기술인 블루투스(Bluetooth)는 유선 대체 목적에 고안되어 발전했으나, 다양한 응용에 적용하기 위해 시스템이 복잡해지고, 이러한 복잡성으로 인한 초기 목표 가격의 상회로 제품 출시가 지연되었으나 최근 특정한 응용을 위한 제품이 점점 더 많이 출시되고 있다. IEEE 802.15.3 무선 PAN은 가정 혹은 개인 멀티미디어 장치들 사이의 고속 통신을 위해 55Mbps 정도의 높은 데이터 전송률에 초점을 맞추고 있다. 최근 IEEE 802.15.4라는 새로운 표준이 등장하였고, 이 기술의 목표는 저 전력, 저 비용을 목적으로 낮은 전송율의 값싼 장치 사이의 무선 접속성을 위해 MAC계층과 PHY계층에서 표준을 제공하고 있다.

IEEE 802.15.4 MAC은 Star 및 Peer-to-peer 네트워크 토폴로지의 사용이 가능하며, 이 네트워크를 구성하는 FFD(Full Function Device)는 Star와 Peer-to-peer 네트워크에 모두 사용가능하고, 피코넷(Piconet)의 피코넷 코디네이터(coordinator)의 사용이 가능하다. 반면 RFD(Reduced Function Device)는 Star 네트워크에 국한되며 피코넷 코디네이터로의 사용이 불가능하다.

IEEE 802.15.4 MAC은 비 동기 경쟁기반의 접근과 경쟁 기반의 접근과 비경쟁기반의 접근이 둘 다 가능한 비콘(beacon) 동기화된 슈퍼프레임 구조로 정의된다. 비콘 사용 가능한 모드에서 한 피코넷의 피코넷 코디네이터는 피코넷 내의 장치들 간의 동기를 유지하기 위해 규칙적인 슈퍼프레임 간격의 무선 PAN 비콘을 방송(broadcast)한다. 한 슈퍼프레임 간격은 CAP(Contention Access Period)와 CFP(Contention Free Period)로 나누어지며, CFP안의 스테이션들은 시간지연에 민감한 데이터 스트림을 교환하고, CAP안에서는 비 동기 데이터의 전송을 위해 서로 경쟁한다[3].

IEEE 802.15.4는 특히 배터리 공급이 적거나 휴대용 무선 PAN 장치들을 위해 필수적인 요

건인 파워 절약을 위해 슈퍼프레임 구조안의 CAP동안 slotted CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)에 기반을 두고 디자인되었다. Slotted CSMA/CA 메커니즘의 기본 원리는 백오프(backoff) 동안 채널 상태 감지를 하지 않음으로써 전력 소모를 최소화하기 위해서이다[3][7][8]. 최근 여러 가지 어플리케이션 시나리오들과 beacon-enabled MAC의 수행에 초점을 둔 시물레이션 기반의 연구들이 있었고, [2][9]에서는 NS-2 시뮬레이터를 사용하여 CBR 트래픽 하에서 IEEE 802.15.4 MAC의 다양한 특징들의 성능을 평가하였고, [4]에서는 dense 네트워크 하에서의 평균파워 소모와 전송 신뢰성을 분석하였다.

기존의 연구는 Slotted CSMA/CA의 최대 성능이 어느 정도인지에 대한 연구가 없는 실정이다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 MAC의 slotted CSMA/CA를 위한 성능 평가를 시물레이션으로 수행하고 이를 바탕으로 성능 한계를 연구한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.15.4 MAC의 기능들을 설명한다. 3장에서는 slotted CSMA/CA의 시물레이션 및 성능분석을 수행하고, 4장에서 결론을 맺는다.

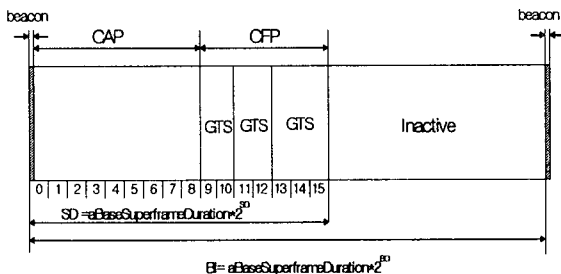
2. IEEE802.15.4의 MAC 기능

2.1 Superframe 구조

응용 분야에 따라 처리지연 시간이 짧아야 되는 서비스에 적용 가능하도록 IEEE 802.15.4 저속 무선 PAN은 저 전력 소모를 위해 선택적으로 슈퍼프레임 구조를 사용할 수 있도록 하고 있다. 슈퍼프레임에는 PAN 코디네이터로 불리는 지정된 코디네이터가 있는데 이를 통해 PAN내의 스테이션들에게 비콘 프레임을 주기적으로 방송한다. 이 때 연속된 두 개의 비콘 프레임 사이의 시간을 활성(active) 구간과 비활성(inactive) 구간으로 분할하여 사용할 수 있다.

슈퍼프레임 구조에서 동작하는 PAN에서는 활성구간에만 채널로의 접근이 허용되며, 일반적인 경우 비활성 구간에서는 모든 장치들이 sleep mode로 동작하기 때문에 슈퍼프레임 구조를 조정하여 저 전력 소모가 가능해진다. 또한 두 비콘 사이의 시간은 슈퍼프레임의 주기와 무관하게 16개의 동일한 타임 슬롯으로 나누어지며 비콘, CAP와 CFP의 세 부분으로 구성된다. CAP는 비콘의 전송과 함께 시작하고, CAP가 끝나기 전의 한 IFS(Interframe spacing) 기간 이전에 전송을 완성하며, CAP안에서의 채널의 접근은 slotted CSMA/CA 메커니즘을 사용한다. CFP는 GTS(Guaranteed Time Slots)의 사용을 통해 PAN 코디네이터에 의해 전체적으로 조절되며 GTS들의 전체 길이에 따라 CFP 기간이 결정된다.

또한 슈퍼프레임 구조는 <그림 1>의 SD(Superframe Duration)와 BI(Beacon Interval)로 나누어지며, SD는 active구간의 지속시간을, BI는 beacon frame의 시간 간격을 의미한다. 여기서 BI와 SD는 고정된 시간이 아니며 SD는 PIB(PAN Information Base)에 정의된 SO(macSuperframeOrder)의 값에 의해 BI는 PIB에 정의된 BO(mac BeaconOrder)에 의해 기본 구간인 aBaseSuperFrameDuration의 배수로 결정된다. 여기서 aBaseSuperFrameDuration은 SO가 0일 때 한 슈퍼프레임을 형성하는 심볼 수를 나타낸다[1][6].



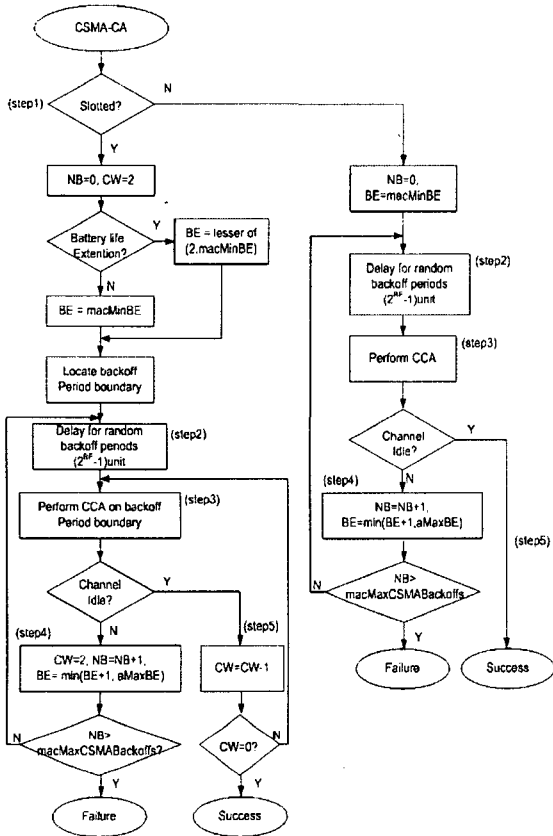
<그림 1> IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임 구조

2.2 CSMA/CA 알고리즘

비콘을 사용하는 슈퍼프레임 구조의 CAP안에서 모든 프레임들은 slotted CSMA/CA를 사용하며, 슈퍼프레임 구조 즉 비콘을 사용하지 않는 경우는 unslotted CSMA/CA 알고리즘을 사용하여 전송을 수행한다. 두 경우 모두 백오프(backoff) 기간이라 불리는 시간 단위를 사용하여 백오프 알고리즘을 수행하며, slotted CSMA/CA안에서 채널 접근 제어를 위해 각 스테이션 안에 3가지 카운터를 유지한다.

NB는 한 프레임 전송동안 백오프 시도의 횟수, BE는 전송 시도 전에 랜덤 백오프 기간을 생성하기 위한 백오프 지수를 나타내며 CW는 랜덤 백오프 기간 후 CCA(Clear Channel Assessment)를 위한 카운터이다. 즉 프레임 전송 시작 전에 채널 사용이 가능한지 확인을 위한 슬롯 수를 나타낸다. 그림 2는 IEEE 802.15.4 MAC의 CSMA/CA 알고리즘을 단계적으로 보여주며 slotted CSMA/CA를 사용할 경우 MAC 부 계층은 NB, BE, CW값을 초기화시키고 battery life extension의 사용 여부 결정 후 백오프 기간의 시작을 찾게 되지만, unslotted CSMA/CA의 경우는 NB, BE를 초기화한다(step1). 그 후 $0 \sim 2^{BE}-1$ 의 범위 사이에서 결정된 백오프 기간의 랜덤 슬롯 수만큼 지연되고(step2), 물리계층에 CCA를 요청한다(step3). 만약 채널이 두 번의 CW 슬롯 동안에 한번이라도 busy하다면(step4), CW의 값을 2로 리셋 시키고 NB, BE값을 1씩 증가 시킨 후 NB의 값이 macMax -CSMABackoffs보다 작거나 같다면 step2로 되돌아가게 되고, 그렇지 않으면 채널 접근 실패 상태로 종결된다. 만약 채널이 두 번의 CW 슬롯동안에 idle하다면(step5), slotted CSMA/CA로 동작하는 경우 프레임 전송을 시작하고, unslotted CSMA/CA의 경우는 CCA 수행 후 곧 바로 프레임 전송을 시작한다.

Battery life extension의 사용은 백오프 지연을 줄이는 방법으로 최대 백오프 값을 battery



<그림 2> IEEE 802.15.4 MAC의 CSMA/CA 알고리즘

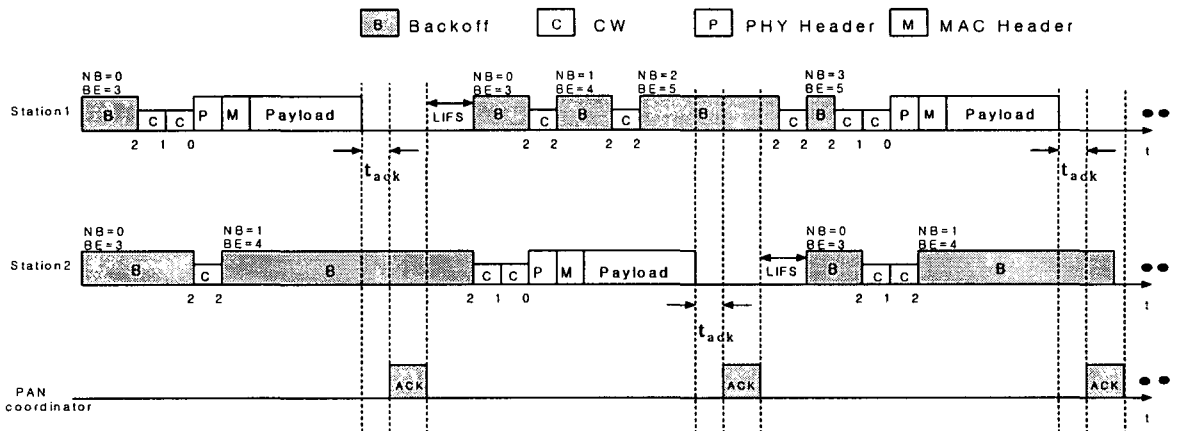
life extension을 사용하지 않는 경우보다 작은 값을 사용한다. 백오프 지연은 0과 최대 백오프 값 사이의 임의의 값으로 결정되므로 최대 백오프 값이 적을수록 평균 백오프 지연은 적어지고 그만큼 MAC의 처리 시간이 줄어들기 때문에 파워 소모를 줄일 수 있다[1].

<그림 3>은 앞에서 설명한 slotted-CSMA/CA MAC 행동의 한 예로 하나의 PAN 코디네이터와 2개의 스테이션 사이의 동작과정을 보여준다. 만일 두 개의 스테이션이 동일한 시간에 CW 슬롯에서 채널 감지 CCA를 수행하고 있다면 두 스테이션은 채널상태가 idle 하다고 판단하고 CW 슬롯이 2에서 0이 된 후 동시에 프레임 전송을 하게 되어 스테이션 간에 충돌이 일어나게 된다[1][5].

데이터 손실을 줄이기 위해 충돌 발생시마다 재전송을 시도하여 최대 3번까지 재전송이 가능하며, 한 스테이션이 다섯 번 연속 채널이 busy인 경우와 충돌로 데이터 전송에 실패한 경우에는 3번의 재전송 기회가 주어진다.

3. 시뮬레이션 및 성능 분석

Slotted CSMA/CA의 시뮬레이션을 위해 n 개의 스테이션은 전송을 위해 경쟁중이고, 포화조건(saturation) 즉 한 프레임의 성공적인



<그림 3> Slotted CSMA/CA에서 MAC행동의 예

전송 후에 곧 바로 전송을 위해 이용할 수 있는 프레임이 항상 존재한다고 가정하였으며, 전송 경계는 비콘 없이 동기화되고 슈퍼프레임 구간 전체를 오직 CAP를 위해 사용한다고 가정한다. 이러한 경우에 <그림 2>의 CSMA/CA 알고리즘을 바탕으로 slotted CSMA/CA로 작동하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

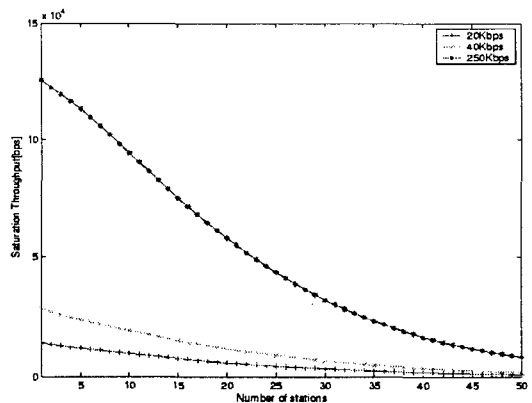
시뮬레이션 프로그램은 c를 이용해 이벤트 기반으로(event-driven) 작성하였다. 시뮬레이션에 사용된 환경은 중앙에 한 개의 PAN 코디네이터가 위치하고, 시뮬레이션 상의 모든 노드들이 코디네이터의 무선 전송 범위 이내에 존재하는 피코넷 상황이라 가정하였다. 시뮬레이션 수행시간은 500초로 하였고, 모든 시뮬레이션들은 독립적으로 수행되었으며 10번의 시뮬레이션 결과의 평균값을 구하였다. 표 1은 분석에 사용된 파라미터 값을 나타내며 여기서 r 은 symbol rate을 bit rate으로 변환해 주기 위한 배수이며, R 은 전송률을 나타내며 R 이 20과 40Kbps인 경우 BPSK가 사용되고 R 이 250Kbps인 경우 O-QPSK (4bits/symbol)가 사용된다. MAC 페이로드의 크기는 throughput을 최대하기 위해 MPDU의 프레임 오버헤드 부분인 MHR과 MFR을 최소화한 118byte로 설정하였다.

<그림 4>와 <그림 5>의 그래프는 slotted CSMA/CA로 작동하는 일반적인 경우와 battery life extension을 적용하는 경우에 각각의 data rate에 대한 saturation throughput을 보여주는 그래프로 일반적인 경우 MAC 페이로드(Payload) 크기를 최대로 한 경우 118byte이며 스테이션이 1개인 상황에서 250Kbps에서는 125.53Kbps를 20Kbps와 40Kbps에서는 각각 14.19Kbps, 28.38Kbps의 성능 한계 값을 얻을 수 있었다. 또한 <그림 5>에서 battery life extension의 적용은 최대 백오프 값을 줄이는 것으로 스테이션 1개인 경우 성능한계는 20, 40, 250Kbps에서 각각 14.63, 29.27, 137.18Kbps로 <그림 4>의 결과 값보다

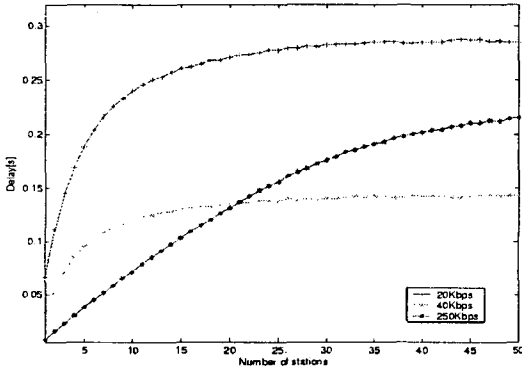
높지만 스테이션 수가 3개 이상이 되면 throughput이 더 낮아짐을 볼 수 있다. 이는 battery life extension 모드에서 최대 백오프 값을 줄임 으로 인해 스테이션의 증가에 따라 충돌 확률이 증가하므로 발생하는 현상이다. 즉 스테이션 수가 많은 환경에서 이 모드의 적용은 battery life extension의 효과를 기대만큼 얻지 못함을 보여준다.

<표 1> 시뮬레이션에 사용된 파라미터

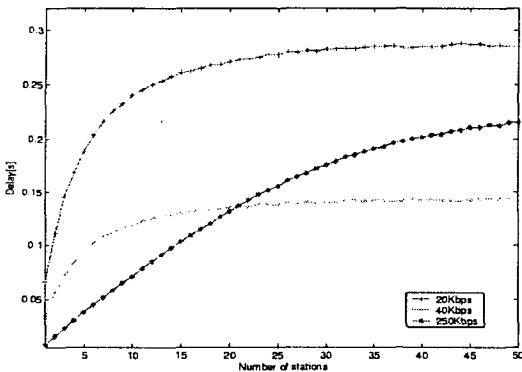
파라메타		값
T_{slot}	슬롯시간	$(20 \text{ symbols} * r)/R$ [sec]
T_H	MAC header+PHY header 전송시간	$(15 * 8)/R$ [sec]
T_P	MAC payload 전송시간	$(118 * 8)/R$ [sec]
T_{prop}	propagation delay	1 [μsec]
$t_{acktimeout}$	ack time out	$(12 \text{ symbols} * r)/R$ [sec]
T_{ACK}	ack 전송기간	$(11 * 8)/R$ [sec]
T_{LIFS}	long IFS duraton	$(40 \text{ symbols} * r)/R$ [sec]
R	사용대역에 따른 전송속도	20, 40, 250 [Kbps]
r		1,1,4 for $R = 20, 40, 250$ Kbps [bits/symbol]



<그림 4> Slotted CSMA/CA의 saturation throughput(battery life extension 적용하지 않은 경우)



<그림 5> Slotted CSMA/CA의 saturation MAC delay(no battery life extension)



<그림 6> Slotted CSMA/CA의 saturation MAC delay(no battery life extension)

<그림 6>은 데이터 전송에 실패할 경우 주어지는 3번의 재전송 기회 안에 전송에 성공하지 못한 경우를 제외한 데이터의 평균 MAC delay를 나타내며, 20, 40Kbps에서는 스테이션 20개 이전에 포화상태를 보이나 250Kbps에서는 계속해서 delay가 증가되는 모습을 볼 수 있다. 또한 delay가 n 이 50개 이하인 경우 20, 40Kbps에서 300msec와 150msec 이하가 됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15 표준 중 저속의 저 전력 사용에 적합한 기술인 IEEE 802.15.4 MAC의 CSMA/CA 메커니즘을 기술하였고, 이 메커니즘을 바탕으로 슈퍼프레임 구간을 CAP로 사용하며 slotted CSMA/CA로 작동하는 경우에 대한 시뮬레이션을 통해 IEEE 802.15.4 MAC의 성능평가를 수행하였다. 그 결과 노드 수가 적은 환경에서는 어느 정도 throughput을 보장 받을 수 있었지만 노드 수가 증가함에 따라 급격하게 throughput이 감소함을 볼 수 있었다. 또한 battery life extension 모드로 동작 시켰을 경우는 네트워크 환경내의 충돌의 급속한 증가로 인해 battery life extension의 효과를 얻지 못함을 확인하였다. 따라서 향후 노드 수가 많은 네트워크 환경 하의 power saving을 위해서는 이 모드를 개선 할 수 있는 연구가 수행돼야 할 것이다.

참고문헌

- [1] IEEE 802.15.4, Part 15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks, Oct. 2003.
- [2] G. Lu, B. Krishnamachari and C. S. Raghavendra, "Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-rate Low-power Wireless Networks," in Proc. of IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, pp. 701 - 706, 2004.
- [3] J. Zheng and M. J. Lee, "Will IEEE 802.15.4 Make Ubiquitous Networking a Reality?" IEEE Communication Magazine, vol. 42, no. 6, pp. 140 - 146, Jun. 2004.
- [4] B. Bougard and F. Catthoor, "Energy Efficiency of the IEEE 802.15.4 Standard in

- Dense Wireless Microsensor Networks: Modeling and Improvement Perspectives," in Proc. of Design, Automation and Test in Europe, pp. 196 - 201, Mar. 2005.
- [5] IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Aug. 1999.
- [6] G. A. Jose and J. A. Gutierrez, Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4, IEEE Press, 2003.
- [7] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester and J. A. Gutierrez, "Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 70 - 77, 2002.
- [8] F. Chin and Z. Wanjun, "System Performance of IEEE 802.15.4 Low Rate Wireless PAN Using UWB as Alternate -PHY Layer," in Proc. of IEEE PIMRC 2003, vol. 1, pp. 487 - 491, Sep. 2003.
- [9] P. Ai-Chun and T. Hsueh-Wen, "Dynamic Backoff for Wireless Personal Networks," in Proc. of IEEE GLOBECOM 2004, vol. 3, pp. 1580 - 1584, Dec. 2004.

주 작 성 자 : 이 해 립

논문투고일 : 2005. 06. 30

논문심사일 : 2005. 07. 21(1차), 2005. 07. 30(2차),
2005. 08. 23(3차)

심사판정일 : 2005. 08. 23

● 저자소개 ●



이해림

2003 경기대학교 공과대학 전자공학과 학사

2005 성균관대학교 공과대학 전자전기공학과 석사

관심분야: ZigBee, WPAN, IEEE 802.15.4 시뮬레이션 모델링 및 성능분석.



정민영

1990 KAIST 공과대학 전자공학과 학사

1994 KAIST 공과대학 전자공학과 석사

1999 KAIST 공과대학 전자공학과 박사

2000 ~ 2002 ETRI 선임 연구원

2002 ~ 현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수

관심분야: 유무선 홈 네트워크, 이동통신 네트워크,
IP 라우터 시스템, 광 네트워크 관련 성능분석.

이태진

1989 연세대학교 공과대학 전자공학과 학사

1991 연세대학교 공과대학 전자공학과 석사

1995 University of Michigan, Ann Arbor, EECS (M.S.E.)

1999 University of Texas, Austin, ECE (Ph.D.)

1999 ~ 2001 삼성전자 중앙연구소 책임연구원

2001 ~ 현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수

관심분야: 무선 PAN/LAN, ad-hoc/센서 네트워크, 광 네트워크,
통신 네트워크 성능 분석 및 설계.