

다중시간분할 방식 기반의 에드혹 망 전송기술 분석

종신회원 정 중 문*, 정회원 조 형 원*, 진 기 용*,
준회원 조 민 희*, 김 지 현*, 정회원 정 운 철**, 주 성 순**

Analysis of TDM-based Ad Hoc Network Transmission Technologies

Jong-Moon Chung* *Lifelong Member*, Hyung-Weon Cho*, Kiyong Jin* *Regular Members*,
Min-Hee Cho*, Ji-Hyun Kim* *Associate Members*,
Wun-Cheol Jeong**, Seong-Soon Joo** *Regular Members*

요 약

무선 센서 네트워크(WSNs)로부터 유비쿼터스 센서 네트워크(USNs)으로 향한 진화를 위해서는 보다 많은 데이터-트래픽 전송량, 많은 수의 사용자 지원, 강화된 내부연산 능력, 그리고 보다 긴 수명에 대한 요구가 강해지고 있다. 그리하여 효율적으로 통신 시간을 동등하게 제어하는 기술과 적은 소비 전력이 USN 미디엄 액세스 제어(MAC) 프로토콜에 있어서 가장 중요한 디자인 목표가 되어 몇 가지의 다중시간분할방식(TDM) MAC 프로토콜들이 제시 되었다. 하지만 존재하는 프로토콜들의 장점과 단점을 분석하는 것은 쉽지 않기 때문에 보다 발전된 MAC 프로토콜을 만드는 것은 도전적인 과제이다. 이러한 목적으로 본 논문에서는 기존의 에드혹 망 다중시간분할방식 프로토콜들의 복잡도를 유도하였고 비교 분석한 결과를 제시한다. 프로토콜의 복잡도는 전력 소비량과 집적적인 관계를 갖기 때문에 에드혹 망의 MAC 프로토콜의 효율성을 평가하는 데에 많은 연관성을 가진다.

Key Words : Ubiquitous sensor network, wireless sensor network, time coordination, medium access control

ABSTRACT

In the evolution from wireless sensor networks(WSNs) to ubiquitous sensor networks(USNs), technologies that can support intensive data-traffic loads, large number of users, improved interoperability, and extreme longevity are required. Therefore, efficient communication time coordination control and low power consumption becomes one of the most important design goals for USN MAC protocols. So far several time division multiplexed (TDM) MAC protocols have been proposed. However, since the pros and cons of existing protocols are not easy to analyze, it becomes a challenging task to design improved TDM MAC protocols. Based on this objective, this paper provides a novel protocol analysis along with a message complexity derivation and comparison of the existing TDM MAC protocols.

I. 서 론

「유비쿼터스」라는 단어는 언제나 그리고 어느 곳

에나 존재한다는 편재의 개념과 연관되어 있다. 유비쿼터스 센서 망(USN: Ubiquitous Sensor Network)이라는 용어는 센서(sensor) 디바이스(device)가 어

* 본 연구는 지식경제부의 QoS 및 확장성지원(S-MoRe) 센서네트워크 고도화 기술개발 과제(2008-F-052)의 지원으로 수행 되었음.

* 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 통신 & 네트워크 연구실(jmc@yonsei.ac.kr),

** 한국전자통신연구원(ETRI)(wjeong@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2009-02-049, 접수일자 : 2009년 8월 6일, 최종논문접수일자 : 2009년 8월 6일

면 환경에서도 무선 네트워크를 구성하기 위한 신뢰성 있는 동작이 가능하고 현존하는 어떤 장치와도 연동할 수 있는 것과 동시에 매우 긴 수명을 가진다는 무선 센서 망(USN: Wireless Sensor Network) 기술의 기대되는 미래의 방향에 대한 통찰을 제공한다.

WSN에 대한 요구가 날로 증폭되어가는 가운데, 미래의 USN 기기들을 지원 할 수 있는 기술들이 연구 되고 있다. WSN으로부터 USN으로 이르는 기술적인 혁명에는 본 논문에서 분석하는 다중시간 분할(TDM: Time Division Multiplexed) MAC 프로토콜들에 대한 연구가 중요하다.

오래 전부터 에드혹 망(AHN: Ad Hoc Network)을 위한 여러 MAC 프로토콜이 제안되어 왔고 그 중 일부는 다중시간분할방식(TDM)을 이용하는 기술들이 제안 되었다. 미래의 USN들은 더 큰 데이터(data) 트래픽(traffic) 용량과 더 높은 신뢰도, 더 많은 센서 노드들을 지원해야 하기 때문에 망의 통신 효율을 향상시키기 위해서는 자연히 한 단계 높은 전송 제어 기술들이 필요하게 된다. 본 논문에서는 에드혹 망을 위해서 제안 된 대표적인 TDM MAC 프로토콜들을 분석하고, 본 논문의 결과가 앞으로의 USN 프로토콜 개발에 도움이 되고자 쓰여졌다.

II. TDM 기반의 에드혹 망 프로토콜 작동원리

본 논문에서는 대표적인 TDM 기반의 에드혹 망 프로토콜들인 에너지 인식형 TDMA 기반 MAC^[1], ZMAC^[2], 및 TMMAC^[3]에 대한 비교 분석을 제공한다. 먼저 세 가지 TDM 기반의 에드혹 망 프로토콜들의 작동원리들을 소개한다.

2.1 TDMA MAC

에너지 인식형 TDMA MAC 프로토콜은 슬롯이 게이트웨이(gateway)에 의해 할당되는 TDM 기반 MAC 계층에서 이용된다. 게이트웨이는 자신의 클러스터 안에 있는 각각의 노드들이 이용해야하는 시간 슬롯과 전송해도 되는 슬롯의 정보를 알려 준다.^[1]

TDMA MAC 프로토콜은 data transfer phase, refresh phase, event-triggered rerouting phase, refresh-based rerouting phase으로 이루어져 있다. Data transfer phase에서는 노드들은 자신이 인지한 정보들을 게이트웨이가 정해진 타임 슬롯에 전송한다.

다. 전송하지 않는 노드들은 status update를 전송하거나 route broadcast를 전송받아야 할 때까지 sleep-mode로 남아있을 수 있다. Refresh phase는 device와 network 정보를 update하기 위해 게이트웨이에 의해서 주기적으로 수행된다. Refresh phase 중에 클러스터 안의 노드는 자신에게 예정된 에너지 level, state, position과 다른 정보들을 게이트웨이에 전송한다. Refresh phase 동안 수집된 에너지 정보를 이용해 에너지가 너무 낮은 노드는 rerouting 을 수행하게 한다. Rerouting process는 센서로부터 status update가 이루어진 후, 혹은 센서 위치/조직에 변화가 감지되었을 때 시작된다. Rerouting process는 각각 다른 주파수 채널에서 실행되는 event-triggered rerouting phase와 refresh-based rerouting phase를 포함하고 있다. Refresh-based rerouting phase는 refresh phase에 이어 바로 실행된다. Event-triggered rerouting phase가 진행될 동안 게이트웨이는 device와 네트워크에 발생한 변화와, 특히 에너지 레벨이 기준선보다 낮은 노드에 대한 조정을 수행한다.^[1]

2.2 ZMAC

ZMAC은 TDMA 프레임 구조를 기초로 하고 있지만 개개의 time-slot은 CSMA/CA방식에 의해 접근하도록 되어있다.^[2] 노드가 전송해야 할 데이터가 있을 때, ZMAC은 먼저 그 노드가 현재 time-slot에 대해 권한이 있는지 확인한다. 권한이 있으면 ZMAC은 먼저 (특정 타임 T_0 내로) 무작위로 backoff를 하여 backoff timer가 끝나는 대로 clear channel assessment(CCA)를 실행한다. CCA의 결과에 기초하여 채널이 비어 있으면 노드는 남은 time-slot 시간 동안 데이터를 전송한다. 채널이 비어있지 않으면 노드는 채널이 빌 때까지 기다렸다가 위의 과정을 반복한다. 만약 노드가 현재 slot의 권한을 가지고 있지 않으면 T_0 만큼 기다린 다음 데이터를 전송하기 전 contention window [T_0, T_{n0}]사이의 랜덤(random) 값을 취해 backoff를 수행한다. ZMAC은 동기화 오류와 slot 할당 실패, time varying channel condition에 잘 견디도록 하기 위해 이런 식으로 디자인 되었다.^[2]

2.3 TMMAC

TMMAC은 multiple channel과 낮은 오버헤드의 single half-duplex radio transceiver TDMA의 이점을 취하도록 디자인되었다. TMMAC은 시간을 ad

hoc traffic indication message(ATIM) 윈도우와 커뮤니케이션(communication) 윈도우라는 두 윈도우의 고정된 길이로 나눈다. ATIM 윈도우에서는 IEEE 802.11 distributed coordinate function(DCF)에 기반을 둔 negotiation process를 이용하여 source 노드와 destination 노드가 통신하기 위한 주파수와 time-slot을 결정한다. Negotiation process 중에는 노드들은 각자의 channel usage bitmap(CUB) 정보, channel allocation bitmap(CAB) 정보를 교환하고 이웃 노드들은 negotiation message를 듣고 자신의 CUB와 CAB 테이블을 갱신한다.^[3]

III. 메시지 및 프로토콜 복잡도 분석

3.1 TDM 기반의 에드혹 망 MAC 프로토콜 분석
 메시지를 가진 패킷을 보내고 받는 것은 네트워크에서 수행하는 작업 중에서 가장 많은 에너지를 소비하는 요인이기 때문에 메시지 복잡도 분석은 USN의 전력 소비량 분석에 있어서 가장 중요한 변수가 된다.^[6]

메시지 복잡도 유도를 위한 일반적인 방법론은 [4]에서 사용한 방법으로 플로우차트(flowchart)를 이용해 RTTS image segmentation algorithm을 분석하였다. 논문 [5]에서는 시간 복잡성이 서로 다른 알고리즘의 성능을 측정하고 비교하는 데에 가장 중요한 요소라는 점을 지적했다. 논문 [6]에서는

mobile ad hoc network(MANET) address autoconfiguration protocols의 성능 분석을 위해 message complexity가 이용 되었다. 논문 [4]과 [6]에서 사용된 복잡도 분석 방법을 기반으로 하여 TDM 기반의 에드혹 망 MAC 알고리즘들의 메시지 복잡도를 분석한다.

TDMA MAC은 클러스터 기반의 MAC프로토콜이기 때문에 비교하기 전에 클러스터 구조를 정의해야 할 필요가 있다.

3.1.1 클러스터 구조 1

전체 노드 N개를 100%라고 했을 때 전체의 5%가 클러스터 헤드 노드(N_1)고 나머지 95%가 멤버 노드(N_2)인 경우, 평균적으로 클러스터 당 19%($N_2/N_1=95/5$)의 노드를 가지게 된다.

3.1.2 클러스터 구조 2

전체 노드 N개를 100%라고 할 때 10%가 클러스터 헤드 노드(N_1)이고 90%가 멤버 노드(N_2)인 경우, 평균적으로 클러스터 당 9%($N_2/N_1=90/10$)의 노드를 가지게 된다.

3.1.3 클러스터 구조 3

전체 노드 N개를 100%라고 할 때 20%가 클러스터 헤드 노드(N_1)이고 80%가 멤버 노드(N_2)인 경우, 평균적으로 클러스터 당 4%($N_2/N_1=80/20$)의 노드를 가지게 된다.

ZMAC과 TMMAC은 클러스터 기반이 아니기 때문에 N_1 과 N_2 에 영향을 받지 않는다.

표 1은 앞에 제시된 MAC 프로토콜들의 메시지 복잡도를 요약하고 복잡도가 적은 순으로 순위를 매겨 보았다.

결과는 TDMA MAC이 가장 낮은 복잡도를 보였다. 또한 클러스터의 수가 증가함에 따라(즉, 클러스터 구조 1 → 2 → 3) 전체 메시지 복잡도는 감소했다. 이것은 TDMA MAC의 효율성을 보여준다. 비 계층적 프로토콜인 ZMAC이나 TMMAC에 비해서도 유리함을 보였다.

표 1. TC MAC 프로토콜의 복잡도 비교

MAC 프로토콜	복잡도	순위
TDMA MAC	$2[O(N)+N_1O(N_2/N_1)]$	1
TMMAC	$5O(N)$	2
ZMAC	$6O(N)+ NO(d)$	3

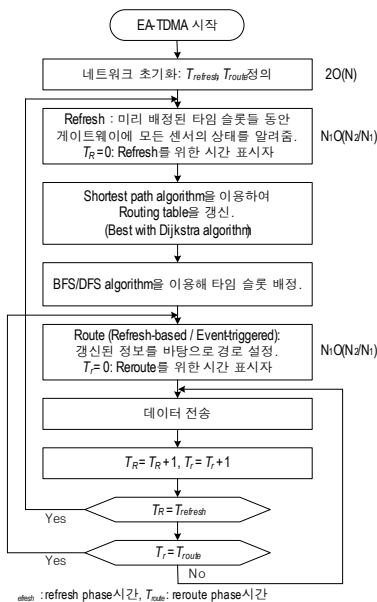


그림 1. TDMA MAC의 작동과 복잡도 계산

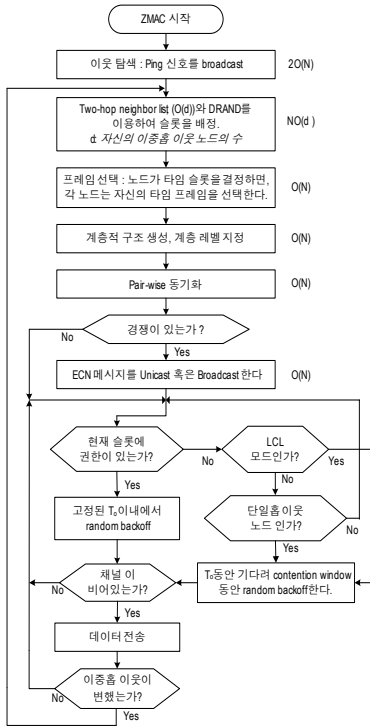


그림 2. ZMAC의 작동과 복잡도 계산

3.2 에드혹 망 적용 기반의 비교 분석

앞서 분석한 에드혹 망 TDM 기반의 MAC 프로토콜의 메시지 복잡도를 비교 분석하면 다음 사항들을 발견 할 수 있다.

3.2.1 TDMA MAC

네트워크 구조의 관점에서 TDMA MAC은 클러스터 기반 계층 구조 MAC 프로토콜이다. 계층 구조를 가지고 있기 때문에 한번 초기설정이 실행되면 TDMA MAC 프로토콜은 비 계층적 MAC 프로토콜에 비해 망 확장가능성(scalability) 면에서 유리하다. 하지만 TDMA MAC 프로토콜을 적용한 에드혹 망에서 센서 노드는 자신의 클러스터의 게이트웨이 노드를 통해서 다른 노드들에게 통신을 수행하기 때문에 게이트웨이 노드의 에너지 소비량은 매우 많이 된다. 그 이유는 TDMA MAC 프로토콜은 게이트웨이를 선택하는 별도의 process가 없으므로 한번 선정된 게이트웨이 노드는 계속 그 역할을 수행해야 한다. 따라서 센서 망으로 이용 될 경우에는 게이트웨이 노드가 우선으로 전원을 공급하거나 매우 큰 건전지를 이용해야 할 것으로 예상 된다. 이러한 점을 고려 할 때 TDMA MAC 프로토콜은 MANET 보다는 고정된 위치에 설치하여 이용하는 WSN에 더 적합하다고 할 수 있다.

3.2.2 ZMAC

ZMAC에서 노드는 CSMA/CA 프로토콜을 이용해 TDMA time slot에 접속한다. 그러므로 CCA channel assessment 와 idle listening이 에너지 소비를 줄이는 결정적인 요인이다. 에너지 소비는 센서 노드의 수명과 밀접하게 연관되어 있다. ZMAC가 갖는 가장 큰 문제점은 노드가 현재 time-slot의 권한을 가지고 있더라도 노드는 여전히 전송 전에 random backoff를 수행해야 한다. 이 과정은 ZMAC을 동기화 오류에 강하게 하지만 반면에 전송용량(throughput)을 크게 저하시키는 결과를 낳는다.

3.2.3 TMMAC

TMMAC의 한가지 문제가 되는 점은 ATIM 윈도우 크기의 동적 할당이다. 각 노드는 개별적으로 ATIM 윈도우의 크기를 제어하기 때문에 서로 다른 노드가 서로 다른 ATIM 윈도우 크기를 가지는 것을 허용한다. 그러나 서로 다른 ATIM 윈도우가 이웃 간에서 사용되면 노드 간의 간섭을 일으키게 된다. USN이 TMMAC을 ATIM 윈도우의 full

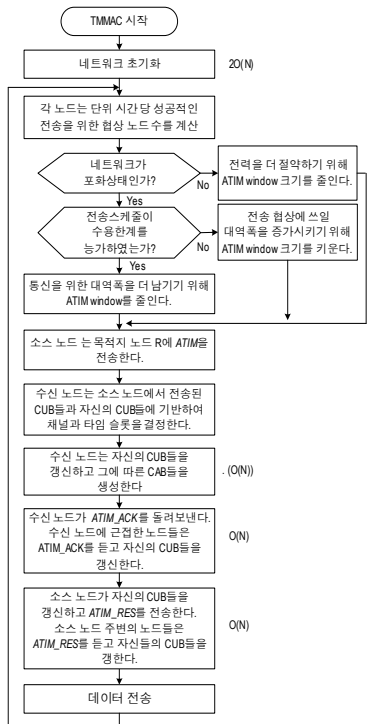


그림 3. TMMAC의 작동과 복잡도 계산

coordination에 의한 간섭 없는 time-slot을 위해 브로드캐스트 스케줄링(broadcast scheduling) 기법을 사용한다면, 막대한 양의 coordination information 교환이 요구되고 이것은 많은 양의 에너지 소비를 불러오게 된다.

IV. 결 론

WSN를 위한 많은 에드혹 망 MAC 프로토콜들이 제시된 바 있다. 현재 상업적으로 사용되고 있는 대부분의 WSN들을 위한 MAC 프로토콜들은(IEEE 802.15.4를 포함하여) CSMA/CA에 기반을 두고 있다. 많은 논문들이 제시한 WSN MAC 프로토콜은 센서 노드가 이용할 수 있는 주파수 채널들이 충분하다고 가정하기 때문에 time coordination의 필요성을 무시하거나 채널 간 간섭의 문제점들을 축소 가정한다.

점점 더 많은 WSN 어플리케이션들이 새로 생겨남에 따라 WSN 사용자들의 수는 명백히 늘어날 것이고 데이터 트래픽의 양도 따라서 증가해 갈 것이다. 비록 넓은 주파수 영역이 WSN 서비스를 위해 사용될 수 있다고 할지라도 결국은 이 주파수 영역도 포화될 것으로 예상 된다. 따라서, time-domain coordination 기술들은 효율성을 결정하는 가장 중요한 성능 지표 가운데 하나가 될 것이다. 특히 비상상황에서 트래픽 부담이 급격히 증가하고 더 많은 사용자들이 서로와 능동적으로 소통하려 할 때 다수 사용자간의 time coordination의 중요성은 USN의 신뢰성을 결정짓는 가장 중요한 요소가 된다.

본 논문은 TDM MAC 프로토콜들의 분석과 전송 메시지의 복잡도에 대한 비교 분석 결과를 제시하였다. 전송 메시지의 복잡도는 에너지 소비와 USN 프로토콜의 효율적인 동작에 직접적으로 관련되어 있기 때문에 매우 중요하다.

3장의 결과에 따라 메시지 복잡도를 오름차순으로 정리하면 TDMA MAC, TMMAC, ZMAC으로 클러스터 기반의 프로토콜이 우수함을 보였다. 그러나 클러스터 헤드(CH) 노드는 다른 노드들에 비해 많은 양의 패킷 전송과 망 운영(coordination) 및 관리(management)를 수행해야하는 부담이 무겁기 때문에 CH 노드는 CH가 아닌 노드에 비해 에너지를 빨리 소모하게 된다. 따라서 클러스터 기반의 MAC 프로토콜들은 CH 역할을 넘겨주는 재조정 기술을 갖추어야만 하기 때문에 USN 노드들의 통신 프로

토콜 및 middleware가 복잡해지게 된다.

앞으로 USN 기술은 보다 많은 다중 채널 통신을 포함하게 될 것으로 보인다. 다수의 주파수 채널들을 사용할 수 있게 된다면 명백히 더 자유로운 USN MAC 프로토콜 디자인이 허용될 것이다. 그러나 여러 개의 채널을 사용할 수 있다고 해서 time coordination의 중요성이 사라지는 것은 아니다. 다중홉(multi-hop) USN들에서 최적의 time coordination이 가능하다면 단일 주파수 채널에서나 다수 주파수 채널 모두에서 커다란 이득이 된다.

앞으로의 연구는 위의 조건을 만족하는 USN 어플리케이션을 위한 최적의 TDM MAC 프로토콜을 개발하는 연구를 진행하는 것이 중요하다.

참 고 문 헌

- [1] K. Arisha, M. Youssef, and M. Younis "Energy Aware TDMA Based MAC for Sensor Networks," *Proc. IEEE Workshop IMPACCT 2002*, New York City, NY, U.S.A., May 2002.
- [2] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, "ZMAC: a hybrid MAC for wireless sensor network," *Proc. of the Intl. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.* 2005, pp. 90-101, San Diego, CA, U.S.A., Nov. 2-4, 2005.
- [3] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S. H. Son, and J. A. Stankovic, "TMMAC: An energy efficient multi-channel MAC protocol for ad hoc networks," (http://www.cs.virginia.edu/papers/2007_1_1_J_Zhang.pdf) Jan. 1, 2007.
- [4] S. H. Kwok and A. G. Constantinides, "A fast recursive shortest spanning tree for image segmentation and edge detection," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 6, no. 2, pp. 328-332, Feb. 1997.
- [5] A. Boukerche, S. Hong, and T. Jacob, "An efficient synchronization scheme of multimedia streams in wireless and mobile systems," *IEEE Trans. Parallel. Distributed Syst.*, vol. 13, no. 9, pp. 911-923, Sept. 2002.
- [6] S.-C. Kim and J.-M. Chung, "Message Complexity Analysis of Mobile Ad Hoc Network Address Autoconfiguration Protocols," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 7, no. 3, Mar. 2008.

정 종 문 (Jong-Moon Chung)

중신회원



1992년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
1994년 2월 연세대학교 본대학원 전자공학과 석사
1999년 5월 미국 펜실베이니아 주립 대학교 전기공학과 박사
1997년 6월~1999년 12월:미국 펜실베이니아 주립 대학교 전기공학과 강사 및 조교수

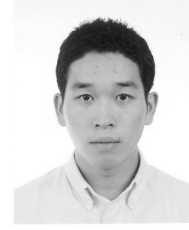
2000년 1월~2004년 5월 미국 오클라호마 주립 대학교 전기컴퓨터공학부 조교수 및 OCLNB 연구소장

2004년 6월~2005년 12월 미국 오클라호마 주립 대학교 전기컴퓨터공학부 부교수(Tenured) 및 OCLNB 연구소장

2005년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수
<관심분야> 이동통신, 무선 에드혹 망 통신, 위성통신, 통신 시스템 및 네트워크 설계 및 최적화

조 민 희 (Min-Hee Cho)

준회원



2007년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
2009년 2월 연세대학교 본대학원 전자공학과 석사
<관심분야> 이동통신, 무선 에드혹 망 통신, 무선 네트워크 설계 및 최적화

김 지 현 (Ji-Hyun Kim)

준회원



2008년 8월 연세대학교 전자전기공학부 졸업
2008년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
<관심분야> 무선 에드혹 망 통신, 통신 시스템 및 네트워크 설계 및 최적화

조 형 원 (Hyung-Weon Cho)

정회원



1992년 2월 광운대학교 전자재료공학과 학사
1994년 2월 광운대학교 전자재료공학과 석사
1997년 7월~현재 삼성탈레스 전문연구원

2006년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정 중
<관심분야> 무선 에드혹 망 통신, 통신 시스템 및 네트워크 설계 및 최적화

정 운 철 (Wun-Cheol Jeong)

정회원



1996년 2월 건국대학교 전기공학과 학사
1999년 5월 미국 펜실베이니아 주립 대학교 전기공학과 석사
2002년 8월 미국 펜실베이니아 주립 대학교 전기공학과 박사

2002년 9월~2005년 9월 미국 오클라호마 주립 대학교 전기컴퓨터공학부 연구 조교수
2005년 10월~현재 한국전자통신연구원 선임 연구원
2009년 3월~현재 과학기술연합대학원대학교 (UST) 이동통신 및 디지털방송공학 겸임 부교수
<관심분야> 이동통신, 무선 에드혹 망 통신, 다차원 신호처리, 정보이론

진 기 용 (Kiyong Jin)

정회원



2006년 8월 연세대학교 전기전자공학부 학사
2008년 8월 연세대학교 전기전자공학 석사

<관심분야> 이동통신, 무선 에드혹 망 통신, 통신 시스템 및 네트워크 설계 및 최적화

주 성 순 (Seong-Soon Joo)

정회원



1980년 2월 한양대학교 전기공학
학과 학사

1982년 2월 서울대학교 대학원
전기공학과 석사

1989년 2월 서울대학교 대학원
전기공학과 박사

1983년 1월~현재 한국전자통신

연구원 USN기반기술연구팀장

2004년 9월~현재 과학기술연합대학원 겸임교수

1996년 8월~1997년 8월 미국 아리조나 주립 대학
교 전기컴퓨터공학부 방문연구원

2007년 8월~2007년 12월: 나다 토론토 대학교 전
기공학부 방문연구원

<관심분야> 미래인터넷, 지능 공간 통신, 지능 제
어, 통신 시스템 및 네트워크 설계