
무선 Ad hoc 네트워크의 지향성 통신 성능분석

이신규* · 홍진대* · 김현태** · 나인호*

Performance Analysis of Directional Communication for Wireless Ad Hoc Networks

Sin-kyu Lee* · Jin-dae Hong* · Hyun-tae Kim** · In-ho Ra*

이 논문은 2009년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-314-D00347)

요 약

Ad hoc 네트워크는 데이터 발신과 라우터 역할을 동시에 수행할 수 있는 노드들로 구성되며 특정한 네트워크 기반 구조의 지원 없이도 동작할 수 있는 장점을 지니고 있다. Ad hoc 네트워크에서는 무선 네트워크 상의 전체 전송 영역에서 높은 처리율과 낮은 지연시간을 반드시 제공할 수 있어야 한다. 최근 들어 빔 생성(beam-forming) 방식이나 멀티플렉싱 방식의 다중안테나(MIMO)를 이용하여 높은 처리율과 낮은 지연시간을 제공하기 위한 새로운 연구가 수행된 바 있으며, 이러한 연구 결과에 의해 송·수신자들이 서로 간에 심각한 간섭을 일으키지 않는다면 다수의 송·수신자가 안테나의 지향성 빔을 이용하여 통신을 위한 공간 재사용 가능성을 높일 수 있음을 검증한바 있다. 그러나 Ad hoc 네트워크에서 노드 밀도가 증가하면 지향성 안테나의 성능은 무지향성 안테나의 성능과 유사하게 된다. 본 연구에서는 QualNet을 이용한 시뮬레이션을 통해 Ad hoc 네트워크 내의 노드 수가 크게 증가하면 지향성 안테나의 평균 처리량과 패킷 에러율이 무지향성 안테나의 성능에 점진적으로 근접한다는 사실을 증명하였으며, 무선 네트워크에서 지향성 안테나 성능 개선을 위해 비중 있게 다루어야 할 중요 이슈들에 대해 자세히 기술하였다.

ABSTRACT

Ad hoc wireless networks operate without any infrastructure where a node can be a source and a router at the same time. This indispensably requires high throughput and low delay performance throughout the wireless network coverage span, particularly under heavy traffic conditions. Recent research on using multiple antennas in beam-forming or multiplexing modes over a wireless channel has shown promising results in terms of high throughput and low delay. Directional antennas have shown to increase spatial reuse by allowing multiple transmitters and receivers to communicate using directional beams as long as they do not significantly interfere with each other. However, directional antenna performance asymptotically approaches the omni-directional performance in a high density ad hoc network. Simulation results in QualNet validate that average throughput and packet corruption ratio of directional antenna approach omni-directional performance. Moreover, we further highlight some important issues pertaining to the directional antenna performance in wireless networks.

키워드

무선 에드혹 네트워크, 지향성 MAC, 간섭, MIMO

Key word

Wireless Ad hoc Network, Directional MAC, Interference, MIMO

* 군산대학교 전자정보공학부

** 군산대학교 BK-21 지능형 임베디드시스템 인력양성사업팀

접수일자 : 2009. 09. 21

심사완료일자 : 2009. 10. 29

I. 서 론

무선 Ad hoc 네트워크에서 지향성 통신 기법을 이용하면 특정 지역의 공간영역을 효과적으로 재사용함으로써 채널 이용율을 향상시킬 수 있다고 알려져 있다. 이러한 사실을 기반으로 서로 통신을 원하는 여러 개의 무선 노드들이 상호 간의 간섭이 발생하지 않도록 서로 다른 방향으로 빔(beam)을 형성하여 통신하도록 네트워크를 구성하면 전체 무선 네트워크의 평균 처리량을 향상시킬 수 있다.

그러나 지향성 안테나의 빔을 이용한 무선통신 기법에서는 발신지로부터 목적지로의 정확한 방향 설정과 위치추정이 필요하다. 따라서 각 노드는 자신으로부터 목적지로의 방향뿐만 아니라 자신과 인접한 지역 내의 다른 노드들이 어떤 진행방향으로 통신을 수행하고 있는지 알고 있어야 한다. 이를 위해 각 노드는 이웃 노드들에 대한 위치, 통신상태, 통신방향, 전송속도 등의 정보를 테이블에 저장하여야 한다. 이러한 정보들은 지향성 통신을 효과적으로 제어하고 평균 처리량을 높이기 위해 항상 최신의 정보로 갱신 및 유지되어야 한다. 이러한 연구 결과는 RTS/CTS 교환 방식의 IEEE 802.11 CSMA/CA 매체접근제어 기법을 기반으로 한 지향성 통신용 MAC 프로토콜의 개발과정에서 폭넓게 적용되고 있다[1].

본 논문에서는 각 노드들이 서로 상대방의 통신 범위 안에 위치하도록 배치된 고밀도 네트워크에서 DMAC (Directional MAC)을 이용한 지향성 통신 방식에서 발생할 수 있는 물리적 한계를 분석하여 지향성 통신 방식의 제약사항들을 철저히 분석한다. 또한 QualNet 4.0 시뮬레이터를 이용하여 패킷 도착율 변화에 따른 처리율 저하 정도와 패킷 붕괴율 측면에서 무지향성 통신과 지향성 통신의 성능을 비교 및 평가한다. 또한 SNIR (Signal-to-Noise plus Interference) 임계 요구조건을 기반으로 지향성 노드들 간의 최대 허용 가능한 거리 범위를 결정하기 위한 분석적 모델을 통해 제안한다.

II. 기본 DMAC 프로토콜

지금까지 제안된 대부분의 지향성 MAC 프로토콜에서는 지향성 통신과 무지향성 통신이 결합된 전송 형식을 모두 지원하고 있다. 예를 들어 Nasipuri[2]의 연구에서는 RTS/CTS 제어패킷의 교환을 무지향성 통신으로 수행하고 데이터 패킷과 ACK 패킷의 교환은 지향성 통신으로 수행하는 결합방식을 제안한 바 있다.

앞서 설명한 MAC 프로토콜과 유사한 기존의 다른 여러 프로토콜에서는 지향성 RTS와 지향성 CTS를 사용하는 방법과 지향성 RTS에 무지향성 CTS를 사용하는 방법 등을 이용하고 있다[3]. 이러한 기법들은 처리량과 채널 이용율을 모두 증가시킬 수 있지만 발신지와 목적지 간의 통신방향을 설정하기 위해 GPS 장비를 반드시 사용하여야 한다. 한편, 지향성 통신에 필요한 발신자와 목적지 간의 방향 설정을 위해 다중 지향성 안테나의 스위칭 기능을 통해 도착방향 (DOA: Direction of Arrival)을 이용하는 방식이 제안된 바 있으나 이 방식은 처리량을 향상시킬 수 있지만 노출된 노드 문제 (the exposed node problem)를 해결할 수 없는 단점이 있다. MMAC 프로토콜 (Multihop MAC protocol)에서는 송신자와 수신자가 동시에 상대방으로부터 무지향적인 범위에 위치할 가능성이 적다는 사실을 이용하여 무지향성 안테나에 비해 상대적으로 더 넓은 통신 범위의 지향성 안테나를 사용하고 있으며, DRTS (Directional RTS) 패킷이 여러 홉을 통과하여 목적지에 도착하면 발신지 위치에 대한 방향 정보를 목적지에 알려준다. 이 방식은 IEEE 802.11 및 Basic DMAC 프로토콜과 비교했을 때 처리량과 지연시간 측면에서 성능 개선 효과를 유도할 수 있다고 알려진 바 있다. 그 외에도, 인접 노드와의 통신 방향에 관한 정보를 유지하기 위해 조향 안테나(stearable antenna)를 사용하여 AST(Angle Signal Table)을 주기적으로 갱신하는 Adaptive MAC 프로토콜이 제안된 바 있다[4][5].

Ad hoc 네트워크를 위해 제안된 대부분의 MAC 프로토콜들은 IEEE 802.11 DCF(Distributed coordination Function)을 기반으로 개발된 것으로서[6], DCF 기법에서는 송신자가 RTS 제어 패킷을 수신자에게 전송하는 방식으로 채널예약 요청패킷을 전송한다. RTS 제어 패킷 수신자는 채널예약 요청에 대한 응답으로 CTS 제어

패킷을 전송한다. 이와 같은 핸드셰이크 기법(handshake scheme)을 사용하면 다음과 같은 작업을 처리할 수 있다. 1) 송신자 A와 수신자 B는 상호 간의 통신을 설정하고 관련된 파라미터들을 초기화한다. 2) 송신자 A 또는 수신자 B의 통신 범위에 위치한 이웃 노드 N은 송·수신자 간의 세션이 진행 중인 동안에 전송 초기화를 수행하지 않는다. 이러한 RTS/CTS 기법은 송신자 또는 수신자와 인접한 각 노드들이 동일한 시간에 통신을 시도할 때 발생하는 모든 발생 가능한 충돌을 회피할 수 있기 때문에 "숨겨진 터미널 문제"를 해결할 수 있다. 그러나 이 방식은 이웃한 노드 N에 대해 노드 N의 수신자 M이 송신자 A의 통신 범안 밖에 존재하는 경우에도 노드 N과 M 사이의 통신을 설정하지 못하게 하는 문제점을 지니고 있다. 따라서 무지향성 통신에서 사용하는 RTS/CTS 기법은 네트워크 내에서 수많은 노출된 노드(exposed nodes) 문제를 일으켜 공간 재사용이 제한적일 수밖에 없기 때문에 결과적으로 네트워크 이용율과 평균 처리량이 저하된다.

그러나 DMAC 프로토콜을 이용한 지향성 통신에서는 지향성 RTC/CTS 패킷과 데이터 패킷을 사용함으로써 노출된 노드 문제를 해결할 수 있으나 Choudhury [6] 등의 연구 결과에 의하면 DMAC 프로토콜은 비대칭 안테나 이득과 deaf 노드 문제로 일으켜 결국에는 숨겨진 터미널 문제가 발생할 수밖에 없다고 검토된 바 있다.

기본 DMAC 프로토콜에서 각 노드는 지향성 방식으로 통신을 수행하기 때문에 자신과 인접한 지역에서 동작 중인 다른 노드가 현재 유지하고 있는 세션의 통신 방향이 무엇인지를 알려주는 정보 테이블을 보유하여야 한다. 패킷에는 인접 지역의 노드들이 간섭을 일으키지 않도록 해당 세션에 대한 지속시간 정보가 포함되어 있다. 휴지 상태(idle mode)에 있는 노드는 무지향성 안테나를 이용하여 자신과 인접한 노드들의 통신 상태를 감지하여 이 노드들이 연결한 세션의 통신방향과 지속시간에 대한 정보를 항상 최신의 상태로 유지한다. 연결 중인 세션의 통신방향에 해당하는 지역은 해당 세션이 지속되는 시간 동안 "사용중"으로 표시된다. 만약 어떤 노드가 특정 방향으로의 전송을 초기화하고자 할 때에 이러한 정보를 반드시 참조하도록 하여 가상 캐리어 센싱 메커니즘(virtual carrier sensing mechanism)을 제공하

고 있다. 통신 세션의 방향 및 지속시간과 관련하여 수집된 정보는 IEEE 802.11의 NAV (Network Allocation Vector) 개념과 비슷한 DNAV (Directional NAV)라 하며, "사용중(busy)"이라고 표시된 지역은 DNAV 각으로 정의된다.

전송개시를 원하는 송신자는 DNAV 변수 이외에도 예정된 수신자에 대한 위치좌표와 방향각(direction angle) 정보를 가진다. 송신자는 주어진 DIFS (Distributed Inter-Frame Space) 지속기간 동안 통신이 가능한지 알아보기 위해 수신자 방향 통신 채널의 물리적 상태를 센싱한다. 만약 그 채널이 DIFS 지속기간 동안 휴지(idle) 상태로 감지되면 수신자 방향으로 활성화된 모든 세션들이 통신을 수행할 수 있도록 자신의 DNAV 테이블에 이것을 표시한다.

만약 그 채널이 '사용중(busy)'이라고 감지되면 송신자는 패킷 내부의 지속기간 필드에 기록된 시간만큼 전송을 지연시키고 자신의 DNAV 테이블 정보를 갱신한다. 또 다른 경우, 즉 예정된 수신자에 대한 통신채널이 휴지상태이나 이 방향으로 통신을 원하는 활성화된 세션이 하나도 없으면 송신자는 0부터 w (전송시도 횟수에 따른 경쟁 윈도우의 크기) 사이의 랜덤 변수를 생성하고 그 시간만큼 전송을 지연한다. 만약 이때 전송이 지연된 시간 동안 해당 채널이 쉬고 있으면 DRTS 제어 패킷을 수신자에게 전송하여 해당 수신자가 휴지(idle) 상태일 때 무지향성 모드로 동작하도록 한다.

또한, 수신자가 DRTS 패킷을 수신하면 해당 채널 방향에 대한 DNAV 테이블 정보를 검사하고 그 방향으로 SIFS(Shorter Inter-Frame Space) 시간 동안 채널 상태를 센싱한다. 이때 해당 채널이 SIFS 시간 동안 휴지 상태에 있으면 수신자는 송신자에 대한 응답으로 DCTS (Directional CTS) 패킷을 전송한다. 그러나 해당 방향으로 통신 채널이 사용되고 있으면 DCTS 패킷을 전달하지 않는다. 한편 송신자가 DCTS 패킷 수신을 기다리는 동안에 DRTS 타이머가 만료되면 송신자는 DRTS 패킷을 재전송하기 위한 준비를 함으로써 채널예약 과정이 완료된다.

채널예약 과정이 완료한 후에 송신자는 데이터 패킷을 해당 방향으로 데이터를 전송하고 수신자는 에러 없이 수신된 패킷에 대한 응답으로 ACK 패킷을 송신자에게 전달한다. 본 논문에서는 IEEE 802.11b의 물리적

층 위에 기본 DMAC 프로토콜이 작동하도록 하는 방식으로 밀집형 무선 Ad hoc 네트워크 환경에서 지향성 통신 기법의 성능을 평가하였다.

III. 지향성 안테나의 성능 이슈

지향성 안테나는 폭 넓게 연구되고 있는 분야로서 특히 신호처리, 통신, 마이크로파, 안테나 이론 등의 학문분야에서 지향성 안테나의 성능 향상 방안에 관한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 다양한 무선기술 표준에서 다중 안테나를 이용하기 위한 방안이 진행되고 있으며 소형, 저비용, 고효율성 등을 모두 고려한 스마트 안테나의 개발이 집중적으로 수행되고 있다. Ramanathan [7] 등이 연구한 바와 같이 지향성 안테나의 빔 생성방식(beam-forming)은 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

- 교환 빔-생성 안테나

여러 방향으로 안테나 빔을 생성하기 위해 다수의 안테나 요소(element)가 미리 정의된 고유 위상을 가지도록 한다. 노드는 모든 방향에서 데이터를 송수신할 수 있도록 다중의 정적 빔을 한 번에 하나씩 스위칭한다.

- 조향성 빔-생성 안테나

지향하고자하는 방향으로의 통신범위를 최대화하기 위해 각 안테나 요소의 위상을 동적으로 조정할 수 있고 간섭을 일으키는 방향으로는 널(null) 신호를 보낸다. 모바일 노드의 위치를 항상 추적할 수 있도록 빔 생성 알고리즘에서 사용하는 가중치 값을 계속적으로 수정한다.

무선 Ad hoc 네트워크에서 사용하는 지향성 안테나는 협소한 빔 폭과 높은 전파이득으로 인하여 국한된 전송영역에서 상대적으로 긴 거리에 데이터를 전송할 수 있기 때문에 무지향성 안테나보다 성능이 우수하다. 협소한 빔 폭은 간섭을 완화시키는데 상당히 효과적이고 이득은 유효 커버리지를 넓히는데 매우 효과적이다. 그러나 무선 Ad hoc 네트워크에서 무지향성 안테나보다

지향성 안테나를 사용할 때 얻을 수 있는 장점은 어떤 시나리오와 성능 매트릭스를 사용했느냐에 따라 상당히 달라질 수 있다. 이와 관련된 주요 성능 이슈는 다음과 같다.

3.1. 무선전파 환경

상업 및 군사용 무선 Ad hoc 네트워크용 응용에서는 다양한 무선 전파 환경에 적용할 수 있는 Ad hoc 네트워크를 요구한다. 예를 들면 Ad hoc 네트워크는 옥내 또는 옥외환경에 모두 사용되며, 통신 환경이 다르면 Ad hoc 노드에 필요한 전파 조건(propagation condition)을 달리한다. 전형적인 옥외환경은 도시근교, 시골, 도시중심 등과 같이 3가지 환경으로 다시 분류된다. 도시 환경은 협소한 지역에 많은 건물들이 존재하기 때문에 무선신호가 전파될 때 빈번한 NLOS(non-line-of-sight) 문제로 전송방해가 발생하기 때문에 송신자와 수신자 간의 다중 경로를 통해서 전파된다. 그러나 시골 환경은 대부분 약간의 초목과 소규모의 주거용 건물, 그리고 개방된 공간으로 구성되기 때문에 전형적인 시골 환경에서는 NLOS 문제가 발생하더라도 신호 감쇠가 덜 일어나기 때문에 상대적으로 적은 수의 다중 경로를 통해 전파된다.

크고 작은 건물이 많은 도시 환경에서는 신호의 산란 현상이 많이 발생하기 때문에 서로 간의 상관성이 적은 다수의 신호가 넓은 각도로 수신자에게 전달되며, NLOS 및 신호 블록킹 현상 또한 빈번하게 발생하여 신호의 세기가 심각하게 감쇠될 수 있다. 반면에 시골환경에서는 산란 현상이 적게 발생하여 좁은 각도에서 상관관계가 매우 큰 신호들이 수신자로 전달되며, 다양한 다중경로 선택 가능성과 적은 신호 블록킹으로 인해 NLOS 현상이 심각한 문제를 일으키지 않는다. 따라서 서로 다른 전파환경에서 요구하는 고유한 전송 특성에 적합한 전송 파라미터를 적용성 있게 사용하는 것이 중요하다. 예를 들어 시골환경에서는 지향성 안테나를 사용하여 간섭신호(interferers)가 발생할 수 있는 방향으로 어떤 전송도 수행하지 않는 빔 생성 모드를 설정하는 것이 필요하다.

그림 1은 도시 환경에서 송신자가 수신자로부터 멀어지는 방향으로 이동할 때 갑자기 발생할 수 있는 NLOS 상황을 나타낸 것이다. 도시 환경에서는 시간에 따라 변

경되는 다중 경로들로 인해 NLOS 상태에 있는 노드를 추적하기 위해서 빈번한 안테나 스위칭 또는 고속의 빔 조향이 요구된다. 이런 상황에서는 상관성 없는 전파전송의 장점을 이용하기 위해서 다이버시티 모드(diversity mode) 안테나를 사용하는 것이 타당할 것이다. 이와 같은 시나리오 예를 통해 모든 전파환경에 최고의 성능을 제공하는 빔 생성 방식은 존재할 수 없다는 것을 알 수 있지만 일반적으로 지향성 안테나는 무지향성 안테나보다 우수한 성능을 보인다.

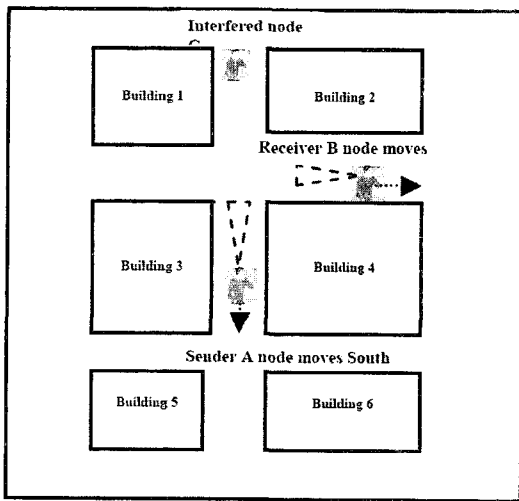


그림 1. LOS와 NLOS 무선 전파 환경
Fig. 1 LOS and NLOS radio environment

3.2. 이동성

지향성 안테나는 보통 45-60도 정도의 좁은 빔 폭을 사용한다. 개방된 전파 환경에서 모바일 노드가 초당 20m 정도로 고속 이동할 때 노드가 어떤 빔 폭을 사용할 수 있는 시간은 노드의 이동속도(velocity)와 송·수신자 간의 거리에 의해 결정된다. 따라서 빔 폭이 좁아질수록 해당 통신 커버리지 안에서 노드가 빔 폭을 사용할 수 있는 시간 또한 점점 더 줄어들게 된다. 이러한 이유로 Ad hoc 노드는 빈번히 안테나를 스위칭하거나 방향을 재조정해야 하고 새로운 통신 링크를 자주 설정하게 된다. 무지향성 안테나는 지향성 안테나에 비해 노드의 이동성에 영향을 적게 받지만 고속 이동 네트워크에서 지향성 안테나의 실제 성능 특성에 관해 세부적이고 총괄적으

로 분석한 연구 결과가 아직 없다[8]. 본 논문에서는 어떤 노드의 인접한 지역에서 일어나는 이동성을 기반으로 무선 Ad hoc 네트워크에서 빔 폭 적응성의 중요성을 성능 분석을 통해 검증한다.

3.3. 토폴로지 및 연결성

본 연구에서는 Ad hoc 노드들이 분할된 지역 네트워크인 클러스터들로 구성되지 않는 평면 토폴로지를 대상으로 한다. 평면 토폴로지를 이용하면 미리 지정된 지역에 노드들을 조밀하게 배치하거나 성기게 배치할 수 있다. 밀집형 노드 배치에 대한 대표적인 것으로 재난지역에서 긴급 구조작업을 신속하게 제어하고 수행할 수 있도록 좁은 지역에 많은 노드들을 배치하는 예가 있다. 이러한 긴급 상황 시나리오에서는 지향성 안테나를 사용하여 네트워크 내에 다중 세션을 설정하고 효과적으로 공간을 재활용함으로써 높은 네트워크 이용률을 제공할 수 있다.

또한 이동 환경에서 지향성 안테나를 사용하면 좁은 빔 폭으로 다른 노드와의 간섭을 최소화 하면서 원거리 전송을 제공할 수 있어 연결을 최대한 유지할 수 있다. 한편, 노드들이 너무 근접하게 배치된 고밀도 환경에서는 지향성 빔들이 서로 중첩되기 때문에 지향성 안테나를 사용하여 얻을 수 있는 공간 재사용률이 점진적으로 저하된다. 이것은 노드 밀도가 증가함에 따라 패킷 처리율이 저하되고 패킷 붕괴율은 증가되는 것을 의미한다. 만약 이러한 상황에서 무지향성 안테나를 사용하면 과도한 커버리지 중첩으로 인하여 전파신호 간의 간섭과 충돌을 회피할 수 없다. 본 연구에서는 노드 밀도가 증가하면 빔 폭 적응성 그리고 네트워크 및 물리 계층 등에서 요구된 적응성에 어떤 영향을 주는지에 대해 분석한다.

3.4. 에너지 소비량

일반적으로 무선 Ad hoc 네트워크는 하나의 노드가 발신자와 라우터 역할을 동시에 수행하는 분산 방식으로 동작하며, Ad hoc 노드가 여러 가지 기능을 수행해야 하기 때문에 전력 소모가 많다. 또한 지향성 안테나는 연결성 유지 및 최적의 성능 제공을 위해 안테나 방향조정, 다중 안테나 요소를 통한 동적인 스위칭 작업을 수행하기 때문에 추가적인 전력 소비가 발생한다.

에너지 소비와 관련하여 넓은 범위의 Ad hoc 네트워크에 적은 수의 노드들이 분포되어 장기간 운영되는 상태에서 멀리 떨어진 지역에 긴급 상황이 발생했다고 가정하자. 필요한 위치에 노드들이 충분히 배치되어 있지 않은 이러한 상황에서 지향성 안테나를 사용하면 불필요한 전력 소비가 많이 발생하여 네트워크를 장기간 운영하려면 배터리 교체가 요구된다. 따라서 이런 경우에는 배터리 전력 소모를 줄이고 구조작업을 장기간 수행할 수 있도록 무지향성 안테나를 사용하는 것이 오히려 좀 더 효과적이다. 본 연구에서는 지향성 안테나가 상황에 맞게 신중히 사용될 수 있도록 무선 환경 시나리오에 따른 지향성 안테나의 성능을 분석한다.

IV. 시뮬레이션 모델

앞서 설명한 바와 같이 지향성 안테나의 성능은 네트워크 시나리오와 지향성 통신을 제어하는 MAC 프로토콜에 따라 좌우된다. 본 논문에서는 특정한 시나리오에서 지향성 및 무지향성 통신의 성능 그리고 지향성 통신이 지닌 한계점들을 측정하기 위해 조향성 빔 안테나(steering beam antenna)에서 작동하는 DMAC 프로토콜의 성능을 QualNet 4.0 시뮬레이터를 이용하여 분석한다[9].

4.1. 시뮬레이션 시나리오

무선 Ad hoc 네트워크의 지리적 범위는 100m×100m 크기의 평면 지형을 가정하며, 그림 2와 같이 10개의 Ad hoc 노드를 5개의 쌍(pair)으로 구성하여 이것들이 100m×100m 지역에 균일하게 분포되도록 한다. 각각의 쌍은 통신 세션이 연결된 발신지 및 목적지 노드로 구성된다. 어떤 하나의 쌍에 속한 발신지와 목적지 간의 거리는 쌍과 쌍 간의 거리보다 짧다. 지향성 통신과 무지향성 통신의 성능을 효과적으로 비교하기 위해 노드들은 고정시키고, 한 쌍의 발신지와 목적지 노드간의 거리는 단일 홉 세션으로 통신이 가능하도록 쌍들 간의 거리보다 가깝게 하여 분리된 형태를 유지하여 단일 홉 기반의 무선 Ad hoc 네트워크 시뮬레이션을 수행한다.

그러나 각 쌍의 무지향성 통신 커버리지가 다른 모든 쌍의 통신 커버리지와 크게 겹쳐질 정도로 쌍 간의 거리가 매우 짧아서 심각한 간섭 현상이 발생한다. 이러한 시나리오는 다수의 노드들이 서로 근접하여 상호 간의 무선 전파 커버리지가 중첩될 때 발생 가능한 실제 사례에 해당한다.

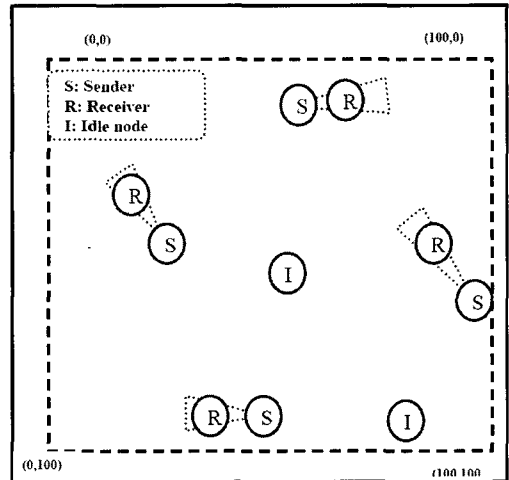


그림 2. 시뮬레이션 시나리오 스냅샷
Fig. 2 Simulation scenario snapshot

4.2. 시뮬레이션 파라미터

지향성 통신의 한계를 테스트하기 위해 시뮬레이션을 두 개로 분리하여 수행한다. 첫 번째 경우는 그림 2에 보인 것과 같이 송수신자 간의 거리는 거의 일정하며 노드 위치는 고정되어 있다. 두 번째 경우는 동일한 방위(orientation)를 갖는 송수신자 쌍들이 대략 30m 떨어진 거리에 서로 근접하도록 이동한 다음, 이 간격을 유지하도록 하여 지향성 통신에서 공간 재사용의 한계가 어느 정도인지 실험한다. 이때 같은 쌍에 속한 송신자와 수신자 간의 거리는 항상 일정하게 유지하고 처리율과 패킷 붕괴율 측면에서 무지향성 통신과 지향성 통신의 성능을 비교한다.

처리율은 수신측 목적지에서 측정하고 패킷 붕괴율은 수신자가 받지 못한 패킷과 송신자가 전송한 전체 패킷의 비율로 정의하며, 동시에 병행 수행되는 4 개의 CBR 세션에 대해 송신측 데이터 전송률을 41Kbps에서 1.95Mbps로 증가시키면서 처리율과 패킷 붕괴율을 계

산한다. 객관성 있는 성능 측정 결과를 생성하기 위해 시뮬레이션을 10회 분리 수행하였고 매번 서로 다른 시드(seed) 값이 사용되도록 하였다. 지향성 안테나는 QualNet 4.0 시뮬레이터에 제공하는 방향 조정이 가능한 조향성 빔-생성 안테나로서 최대 빔 이득(a peak-of-beam gain)이 15dBi이고 빔 폭은 대략 45도 각도로 설정한다. 물리계층, MAC 계층 및 응용 계층 등에서 사용된 시뮬레이션 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Simulation parameters

파라미터	값
Area	100m x 100m
Total Nodes	10
Active Nodes	8
Simultaneous CBR Sessions	4
Mobility	No
Sender-Receiver Orientation	Random
Total CBR Packets Sent Per Session	512Bytes
CBR Packet Inter-Arrival Time	2.1ms to 0.1s
Simulation Time	300s
Transmit Power	15dBm
Receiver Sensitivity	-89dBm
Antenna Loss	1.3dB
Power Control	No
Noise Figure	10dB
Path Loss	Two Ray Model
Shadow Loss	4dB
DMAC NAV Angle	45Degrees
Directional Antenna Gain	15dBi
Directional Antenna Beam-Width	45Degrees(Approx.)

V. 시뮬레이션 결과 및 검토

앞에서 기술한 바와 같이 본 연구의 시뮬레이션에서는 송수신자 쌍은 서로 근접한 지역에 위치하기 때문에 “히든 터미널 노드” 문제가 발생하지 않는다. 그림 3과 그림 4는 각각 무방향성 및 지향성 통신 방식에 대해 수신

측에서 측정된 처리율을 나타낸 것이다. 일반적으로 무지향성 통신에서는 노드 쌍 간의 전파간섭현상이 빈번히 발생하기 때문에 충돌 회피를 위해 IEEE 802.11 MAC 센싱 및 back-off 메커니즘을 사용하며, RTS/CTS 메커니즘을 통해 채널을 예약한다.

이때 여러 개의 RTS/CTS 패킷이 동시에 전송될지라도 만약 SNIR이 임계값보다 크면 간섭현상이 발생하더라도 일부 송수신자 사이에는 RTS/CTS 패킷을 계속 송·수신할 수 있다. 또한, 41kbps~500kbps 범위의 저속 데이터 채널에 비해 512kbps~1.95Mbps 범위의 고속 데이터 채널에서는 채널에 대한 접근 요구가 훨씬 많이 발생한다. 따라서 고속 데이터 채널에서는 back-off가 자주 발생할 수밖에 없다. 저속 데이터 채널에서는 채널에 대한 접근 요구가 낮기 때문에 back-off 타이머의 윈도우는 거의 변하지 않으며, 여러 개의 송수신 노드 쌍이 동시에 데이터를 전송할 확률이 증가된다. 반면에 고속 데이터 채널에서는 채널에 대한 접근 요구가 매우 높으며, 이에 따라 back-off 타이머가 최대치까지 증가된다.

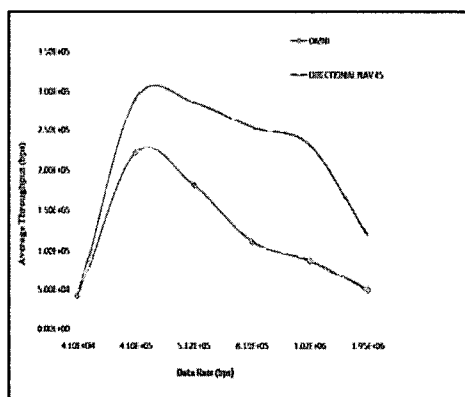


그림 3. 무방향성과 지향성 통신의 처리율 성능 비교
Fig. 3 Throughput performance omni versus directional

그림 3과 그림 4에 나타난 바와 같이 송신측에서 back-off가 빈번히 발생하면 수신측의 평균 처리율은 저하된다. 무지향성 안테나의 경우 데이터 전송률이 410kbps를 초과할 때 평균 처리량이 감소하기 시작한다. 그림 4는 송수신 노드 쌍 간의 근접 거리가 대략 20m~30m 떨어진 정도로 점점 가까워질 때 간섭이 증

가되는 현상(SNIR이 낮아짐)과 RTS/CTS 패킷 획득률이 줄어드는 현상을 보이고 있다. 이것은 결과적으로 송수신자 쌍 간의 거리가 가까워질수록 무지향성 통신의 평균 처리량이 점점 저하되는 것을 의미한다.

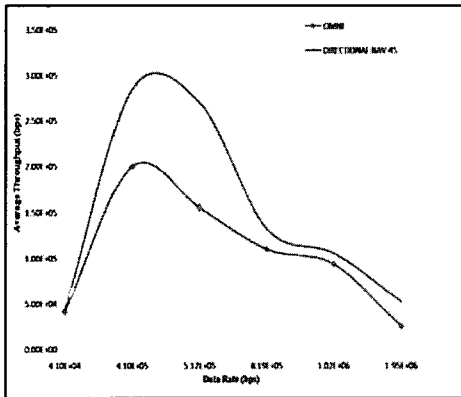


그림 4. 거리 단축시 무향성과 지향성 통신의 처리율 성능 비교
 Fig. 4 Throughput performance omnidirectional versus directional for reduced distance

무지향성 통신에서 송수신자 쌍들 사이에 발생하는 실제 간섭의 정도는 안테나 패턴, 노드 밀도, 상대적 거리, 상대적 방위, 지향성 통신범위에 따라 달라진다. 그림 3은 지향성 통신의 처리율이 무지향성 통신의 경우보다 훨씬 높다는 것을 보여주며, 이것은 지향성 통신의 경우 방향성 있는 통신 영역을 통해 송수신자 쌍들이 서로 다른 각도와 거리에서 통신하기 때문에 그만큼 간섭 가능성이 줄어든다는 사실을 내포한다. 이상적인 경우, 송신자가 2Mbps의 전송률로 전송할 때 지향성 통신을 통해 수신측이 얻어야 할 처리율은 2Mbps에 근접해야 한다. 그러나 송수신자 쌍 간의 통신 방향이 서로 중첩되면 간섭이 심화될 수 있고, 간섭이 주는 영향으로 back-off 현상이 많이 발생하여 실제 수신측 처리율은 많이 떨어진다. 다수의 송·수신자 쌍들이 각각 서로 중첩되지 않는 통신 커버리지를 가진다면 처리율을 증가시킬 수 있지만, 이것은 결국 송·수신자 쌍들이 그만큼 멀리 떨어져 있어야 가능하기 때문에 처리율에 좋지 않은 영향을 준다. 기본적으로 다른 노드와 통신 영역이 중첩된 노드의 처리율은 그렇지 않은 노드에 비해 떨어지기 때문에 어떤 주어진 지역에서 지향성 통신을 통해 얻을 수 있는

전체 평균 처리율은 저하된다.

데이터 전송률이 증가하면 back-off 횟수가 증가하여 평균 처리율이 감소한다. 지향성 통신이 무지향성 통신보다 성능 면에서 우수한 이유는 송·수신자 쌍들이 서로 중첩되지 않는 통신 영역을 갖도록 방향을 조정함으로써 공간 재사용의 효율성을 높일 수 있기 때문이다. 그림 4에서는 통신영역 간의 중첩이 증가하면 지향성 통신의 처리율은 현저히 감소하며, 전파 거리가 길수록 간섭도 커진다는 사실을 보여준다. 낮은 전송률(41kbps~500kbps)에서 처리율이 저하되는 주요 원인은 강한 간섭과 back-off들 때문이며, 높은 전송률(512kbps~1.95Mbps)에서는 전파 영역간의 심한 중첩과 back-off 횟수의 증가로 인해 처리율이 심각하게 저하되는 것이 실험을 통해 관측되었다. 또한, 지향성 통신의 처리율은 전송률이 클 때 무지향성 통신이 가지는 처리율에 거의 근접함을 보이고 있다.

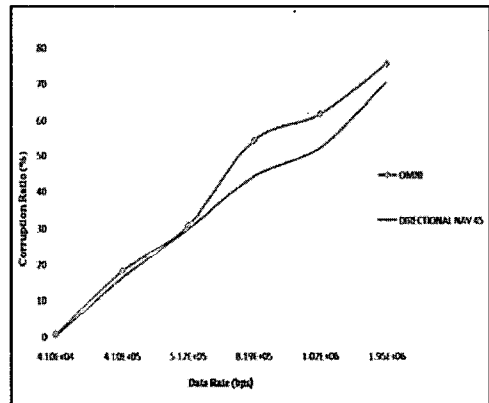


그림 5. 무지향성과 지향성 통신의 패킷 붕괴율 성능 비교
 Fig. 5 Packet corruption ratio performance omnidirectional versus directional

그림 5는 데이터 전송률이 증가함에 따라 패킷 붕괴율도 점차 증가하는 것을 보여주며, 심한 간섭현상과 통신 공간의 비효율적인 재사용 문제로 인하여 무지향성 통신의 성능이 지향성 통신에 비해 떨어지는 것을 나타내고 있다. 그러나 그림 6에 보인 바와 같이 지향성 통신의 패킷 전달율과 무지향성 통신의 패킷 전달률이 거의 일치하는 현상이 발생하는데 이것은 지향성 통신에서 송·수신자 쌍들 간의 거리가 짧아지면

전파 영역의 증첩이 증가되어 간섭이 커지기 때문인 것으로 해석된다. 반면, 데이터 전송률이 낮을 때에는 무지향성 통신의 패킷 전달률이 지향성 통신의 경우보다 높아지는 것을 알 수 있으며, 이것은 지향성 안테나에 고이득이 발생하면 간섭현상이 심화되고 패킷 획득이 비효율적으로 이루어지기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

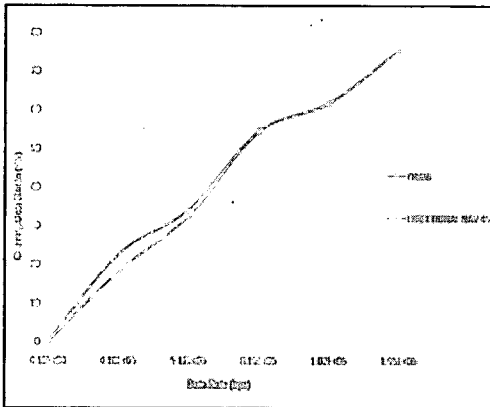


그림 6. 거리 단축시 무지향성과 지향성 통신의 패킷 붕괴율 성능 비교

Fig. 6 Packet corruption ratio performance omnidirectional versus directional for reduced distance

VI. 분석

앞서 설명한 바와 같이, 노드 밀도 증가하면 지향성 통신의 성능은 무지향성 통신의 성능에 근접하기 시작한다. 그러나 지향성 통신의 실제 성능은 불규칙한 지형 지대, 전파 환경, 기기종 노드, 균등하지 않은 노드 밀도, 비현실적인 안테나 패턴, 이동성, 전력 제어 등의 복잡한 요인에 의해 그 결과가 상당히 달라진다.

본 장에서는 수신자에서 일어나는 영향만을 측정하여 네트워크 이용률 측면에서 무지향성 통신과 지향성 통신 사이에 어떤 관련성이 있는지 분석하며, 이를 위해 동일한 성능을 지닌 노드들로 구성된 동종 네트워크를 가정한다.

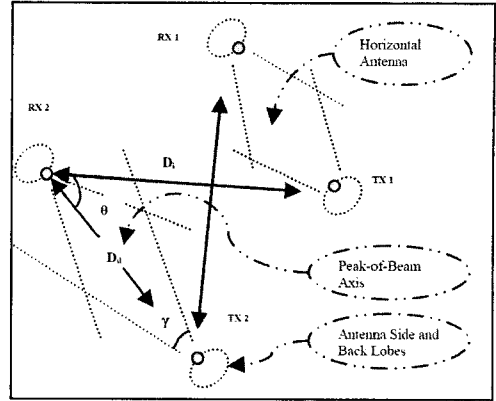


그림 7. 노드 쌍 간의 간섭 분석도
Fig. 7 Schematics for inter-pair interference analysis

그림 7은 송·수신자 쌍 간의 간섭을 분석하기 위해 본 논문에서 설정한 네트워크 모델이다. 여기서 P_t 는 송신 전력, χ 는 안테나 패턴의 빔 폭, 그리고 G_t 와 G_r 는 각각 송신기와 수신기에서의 최고 빔 이득(peak-of-beam gain)을 나타낸다. D_d 는 통신하고자 하는 송·수신자 쌍 간의 거리이고 D_i 은 통신을 방해하여 간섭을 일으키는 i 번째 간섭원(interferer: i_d)과 해당 수신자 간의 거리이다. 수신측에 설정한 잡음은 N 이며, 성공적인 패킷 획득을 위해 필요한 SNIR의 임계값은 β 이다. μ 를 신호 경로 손실에 대한 전파지수로 정의하고 간섭원과 수신자 안테나 이득이 취하는 방향이 각도 θ 일 때의 손실 인자는 $\epsilon_f(\theta)$ 로 정의한다. 수신측에서 패킷을 성공적으로 획득하기 위해서는 수신된 SNIR 값이 임계값 β 보다 커야 한다. 즉, 수신자 주변에 n 개의 간섭원이 존재할 때 식 (1)의 조건이 반드시 만족되어야 한다.

$$D_d^a \left[N + \sum_i^n \left(\frac{P_i G_i G_r \epsilon_f(\theta)}{D_i^a} \right) \right] \geq \beta \quad (1)$$

그림 7과 같이 주 간섭원이 최고 빔 축(peak-of-beam axis)에 대해 각 θ 에서 간섭을 일으킨다고 가정하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 단순화될 수 있다. 이때, 계산의 간소화를 위해 주 간섭원과 비교했을 때 잡음 및 다른 간섭원들이 미치는 영향은 무시할 만하다고 가정한다. D_i 는 예

상된 수신자와 i 번째 주 간섭원 사이에 요구된 최대 거리에 대한 근사치이다.

$$D_i \geq \beta^{-\frac{1}{\alpha}} D_d \varepsilon_i^{\frac{1}{\alpha}}(\Theta) \quad (2)$$

안테나 측면 로브(side lobe)에서 발생하는 간섭은 매우 미약하기 때문에 송수신자 최대 빔 축의 어느 한 쪽에 주요 간섭원이 존재한다. 따라서 이것은 어떠한 간섭원도 허용되지 않는 금지 영역(forbidden area)이 존재함을 의미한다. 또한 송신자와 수신자 사이의 통신 영역(coverage area)에서는 어떤 간섭원도 존재하지 않아야 하므로, 지향성 통신에 존재하는 전체 금지 영역 A_d 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$A_d = D_i^2 \Theta + \frac{D_d^2 \gamma}{2} \quad (3)$$

식 (2)의 D_i 를 식 (3)에 적용하면 식 (4)와 같이 A_d 를 단순화 할 수 있다.

$$A_d = \beta^{-\frac{2}{\alpha}} D_d^2 \varepsilon_i^{\frac{2}{\alpha}}(\Theta) + \frac{D_d^2 \gamma}{2} \quad (4)$$

여기서 A_d 는 단지 근사화된 영역으로서 모든 중첩 영역이 완벽히 제거된 금지 영역 전체를 나타내지는 않는다. 또한 본 논문에서는 그림 7에 나타낸 것과 같이 최대 빔 축을 따라 형성된 통신 영역은 송·수신자가 분리되지 않을 정도의 거리에 있다고 가정한다. 이러한 가정을 통해 무지향성 통신과 지향성 통신의 성능을 명확히 비교할 수 있다.

식 (1)에서 $\varepsilon_i(\Theta)$ 를 단위 값 1로 계산하면 무지향성 통신에서 어떤 간섭원으로부터 해당 수신자 간의 거리 D_o 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$D_o \geq \beta^{-\frac{1}{\alpha}} D_d \quad (5)$$

무지향성 통신의 금지 영역 A_o 는 반지름이 D_o 인 원의 영역으로 정의할 수 있다. 따라서 무지향성 통신의 금

지 영역은 식 (6)과 같다.

$$A_o = \pi \beta^{-\frac{2}{\alpha}} D_d^2 \quad (6)$$

식 (4)와 식 (6)의 비율을 계산하면 식 (7)과 같이 무선 Ad hoc 네트워크에서 동시에 활성화될 수 있는 세션들의 성능을 대략적으로 비교할 수 있다.

$$\frac{A_d}{A_o} = \frac{1}{\pi} \left\{ \Theta \varepsilon_i^{\frac{2}{\alpha}}(\Theta) + \frac{\beta^{-\frac{2}{\alpha}} \gamma}{2} \right\} \quad (7)$$

여기서 $\beta^{-(2/\alpha)}$ 와 $\varepsilon_i(\Theta)$ 는 단위 값 1에 비해 매우 작기 때문에 Θ 와 γ 가 식 (7)에 미치는 영향을 무시할 수 있다. 따라서 무지향성 통신의 금지 영역은 지향성 통신의 금지 영역에 비해 매우 크다는 것을 유추할 수 있으며, 이것을 근거로 무지향성 통신의 네트워크 이용률이 더 낮다는 결론을 유도할 수 있다. 이론적으로 지향성 통신에서는 $N/2$ 의 활성화된 세션이 존재할 때 금지 영역 A_d 가 식 (8)을 만족할 수 있도록 어떤 영역 A 에 대해 N 개의 노드가 존재한다면 네트워크 이용율을 최대화할 수 있다.

$$\frac{N}{2} A_d \leq A \quad (8)$$

또한, $\rho = N/A_o$ 로 정의하면 식 (9)와 같은 단순화된 식을 얻을 수 있다.

$$\rho \leq \frac{2}{A_d} \quad (9)$$

식 (9)에 의해 노드 밀도 함수 ρ 는 어떤 노드의 전체 금지 영역에 반비례 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 관계는 전력 제어를 통해 제한된 전파영역에서 네트워크 이용율을 측정할 경우에만 성립될 수 있다. 그림 8은 20,000m²인 영역 A 에서 주어진 금지영역 A_d 에 대해 허용 가능한 노드의 수 N 을 나타낸 것이다.

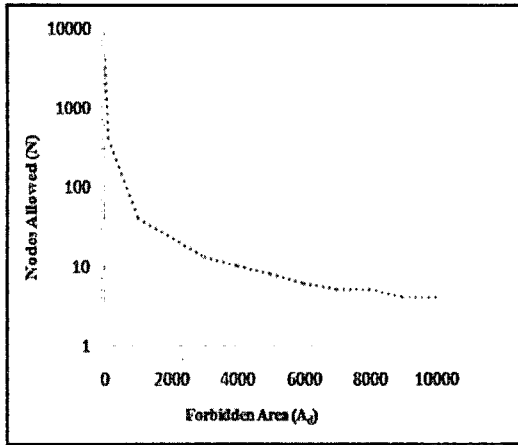


그림 8. 금지영역의 허용된 노드 수
Fig. 8 Allowed number of nodes as a function of forbidden area

VIII. 결 론

본 논문에서는 처리율과 패킷 붕괴율 측면에서 무지향성 통신과 지향성 통신의 성능을 비교하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 송신측 데이터 전송률에 관계없이 패킷 처리율과 붕괴율 측면에서 지향성 통신이 무지향성 통신보다 우수한 성능을 보이는 것을 보였다. 그러나 송·수신자 쌍들 간의 거리가 근접하고 데이터를 고속 전송할 경우에는 지향성 통신과 무지향성 통신의 성능이 거의 동일함을 보였다. 그 외에도 지향성 통신을 실제의 무선 Ad Hoc 네트워크 환경에 사용할 때 고려해야 할 주요 조건과 성능 극대화 방안에 대해 면밀히 분석하였다. 마지막으로 지향성 통신에서 공간 재사용의 효율성을 분석하기 위한 수학적 분석 모델을 제시하였고, 무선 Ad hoc 네트워크에서 최대 네트워크 이용률은 금지영역에 의해 결정되는 노드 밀도와 밀접한 관계가 있다는 것을 분석적으로 검증하였다.

참고문헌

- [1] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control and Physical layer Specifications, P802.11, Nov. 1997.
- [2] A. Nasipuri, S. Ye, J. You and R. Hiromoto, "A MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas," IEEE WCNC, Chicago, IL, September 2000.
- [3] S. Bandyopadhyay, S. Roy and T. Ueda, "Enhancing the Performance of Ad Hoc Wireless Networks with Smart Antennas," Auerbach Publications, USA, 2006.
- [4] S. Bandyopadhyay, K. Hausike, S. Horisawa and S. Tawara, "An Adaptive MAC and Directional Routing Protocol for Ad Hoc Wireless Networks Using ESPAR Antenna," in Proc. MobiHoc, October 2001.
- [5] S. Bandyopadhyay, "An Adaptive MAC Protocol for Ad-Hoc Networks with Directional Antennas," IEICE Trans. Comm., Vol. E84-B, No.11, NOVEMBER 2001.
- [6] R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan and N. Vaidya, "On Designing MAC Protocols for Wireless Networks Using Directional Antennas," IEEE Transaction on Mobile Computing, Vol. 5, No. 5, May 2006.
- [7] R. Ramanathan, "On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas," in Proc. MobiHoc, Long Beach, USA, June 2001.
- [8] S. Bandyopadhyay, M. Pal, D. Saha, T. Ueda, K. Hasuike and R. Pal, "Improving System Performance of Ad Hoc Wireless Network with Directional Antenna," IEEE Int'l. Conference on Communications, Vol. 2, pp. 1146-1150, May 2003,
- [9] "QualNet Simulator Version 4.0," Scalable Network Technologies. [www.scalable-networks.com.]

저자소개



이신규(Sin-kyu Lee)

1989년 원광대학교 회계학과(학사)
1991년 원광대학교 회계학과(석사)
2008년~현재 군산대학교 전자정보
공학부 박사과정

※ 관심분야: 무선 에드혹 네트워크, 멀티미디어 통신,
유비쿼터스 컴퓨팅



홍진대(Jin-dae Hong)

1988년 원광대학교 전자공학과
(공학사)
2005년 군산대학교 전자정보공학부
(공학석사)

2005년~현재 군산대학교 전자정보공학부 박사과정
※ 관심분야: 무선 센서 네트워크, 컴퓨터 네트워크,
이동통신



김현태(Hyun-tae Kim)

1996년 군산대학교 정보통신공학과
(공학사)
1998년 군산대학교 정보통신공학과
(공학석사)

2006년 군산대학교 정보통신공학과 (공학박사)
2009년~현재 군산대학교 BK21 지능형 임베디드 시스
템 인력양성사업단 연구교수
※ 관심분야: 에드혹 네트워크, 멀티미디어 통신, 유비
쿼터스 컴퓨팅



나인호(In-ho Ra)

1988년 울산대학교 전자계산학과
(공학사)
1991년 중앙대학교 컴퓨터공학과
(공학석사)

1995년 중앙대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
1995년~현재 군산대학교 정보통신공학과 교수
※ 관심분야: 무선 센서 네트워크, 멀티미디어 통신,
유비쿼터스 컴퓨팅, RFID/USN, 임베디드시스템