

무선 Ad-hoc 네트워크의 최신 기술 동향

모정훈 (한국정보통신대학교)

I. 서론

본 논문에서는 이동 Ad-hoc 네트워크의 발전 과정, 그 연구 및 현황을 그리고 앞으로의 기술적 과제를 살펴본다. II장에서는 간략한 이동 Ad-hoc 네트워크의 발전 과정을 기술하고 III장에서는 MAC, 라우팅, 트랜스포트, 보안에 관련된 연구 동향에 대하여 기술한다. IV장에서는 앞으로의 기술적 과제에 대하여 다루고, 결론을 통해서 논문의 내용을 요약한다.

II. 무선 Ad-hoc 네트워크의 발전 과정

무선 Ad-hoc 네트워크의 시초는 1980년대 SURAN (Survivable Adaptive Radio Network) 프로젝트로 이어진 1972년 미국방성(DoD)의 프로젝트인 PRNET (Packet Radio Network)로 거슬러 올라간다¹⁾. SURAN의 목적은 인프라가 없는 혹독한 전쟁상황에서 움직이는 군인, 탱크, 비행기를 패킷 전송에 기반한 네트워크로 연결하는

것이였다. 그 이후 노트북의 보급, 공개 소프트웨어, 적외선, 그리고 RF에 기반한 기술의 발전과 더불어 1990년대에 이르러야 비군사적인 분야에서의 Ad-hoc 네트워크 개념이 싹트기 시작했다. 1994년 몇몇 학회에서는 인프라가 없는 구조에서의 노트북과 같은 모바일 호스트들의 집합체로서의 Ad-hoc 네트워크라는 아이디어가 제안되었고 그 이후 IEEE 802.11 서브커미티에서 Ad-hoc 네트워크이라는 용어를 받아들인 이후로 Ad-hoc망에 대한 관심은 급증했다^{2,3)}.

비슷한 시기에 미국방성은 GloMo (Global Mobile Information Systems)라는 새로운 프로젝트를 후원하였는데 이 프로젝트의 목적은 ethernet에 기반한 멀티미디어 타입의 서비스를 장소나 시간에 구애받지 않고 노트북이나 PDA에 제공하는 것이였다. 채널 공유방법으로 CSMA/CA와 TDMA를 사용하였고 몇 가지 새로운 Routing과 토폴로지 제어 방법이 개발되였다.

90년대 후반에는 IETF산하에 MANET (Mobile Ad-hoc Networking) working 그룹⁴⁾이 형성되었고 MANET는 Ad-hoc 네트워크에서 사용되는 routing 프로토콜을 표준화하였다. AODV, DSR등의 프로토콜을 표준화하였다. 그

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터육성, 지원사업의 연구결과로 수행되었음

리고 802.11 서브커미티에서는 CSMA/CA에 기반한 MAC 프로토콜과 물리 계층을 표준화하였다. 이 외에도 Bluetooth^[5]와 HIPERLAN^[6]등 이동 Ad-hoc 통신망을 상업적인 목적으로 활용하는 방안에 대한 표준화 과정과 개발이 활발하게 이루어져 현재에 이르렀다.

III. Ad-hoc 네트워크의 연구 동향

이 장에서는 현재 Ad-hoc 네트워크에서의 최신 연구동향에 관하여 MAC, 라우팅 그리고 Transport를 계층별로 알아본다. 또한 최근 활발한 연구가 진행 중인 보안 측면과 Ad-hoc망의 용량에 관한 연구를 기술한다.

1. MAC(Medium Access Control) 연구 동향

무선 Ad-hoc 네트워크에서의 MAC 프로토콜은 여러 사용자가 무선 매체를 공평하면서도 효율적으로 사용하도록 분산된 방법을 제공해야 한다^[7]. 무선 Ad-hoc 네트워크에서의 대표적인 문제인 숨은 터미널 (Hidden Terminal)문제^[8]와 노출 터미널 (Exposed Terminal)문제를 해결하는 방법으로 제안된 CSMA/CA에 기반한 프로토콜이 802.11 커미티에 의해 표준화되었다. 그 이후 많은 연구가 진행되고 있고 최근에 제안되고 있는 MAC 프로토콜은 다중 채널의 사용, 다중 홉 혹은 클러스터 토폴로지에 기반, 그리고 전력 사용 최소화라는 특징을 가진다.

가) 다중채널 프로토콜

단일 채널 프로토콜 초기에 제안된 프로토콜은 대부분 하나의 미디어에서 콘트롤 프레임과 데이터 프레임의 전송이 일어난 단일 채널 프로

토콜이다. CSMA(Carrier Sense Multiple Access)에서 시작하여 CSMA/CA, MACA, 그리고 802.11b의 Ad-hoc 모드의 기본인 MACAW등이 모두 단일 채널 프로토콜에 속한다. 그 외의 단일 채널 프로토콜은 RTS 전송 전에도 캐리어 센싱을 추가한 FAMA (Floor Acquisition Multiple Access)^[9], 수신자가 송신자를 초대하는 MACA-BI (By invitation)^[10]가 있다. MACA-BI를 개선한 RIMA-SP (Receiver Initiated Multiple Access with Simple Polling)^[11], 콘트롤 오버헤드를 줄인 MARCH (Multiple Access with Reduced Handshake), 파워 콘트롤이 추가된 DPC/ALP와 PS-DCC는 모두 단일 채널에 기반한 방법이다.

다중 채널 기법은 주로 하나의 콘트롤 채널과 하나 혹은 그 이상의 데이터 채널로 구성된다. BTMA (Busy Tone Multiple Access)^[12]는 숨은 터미널 문제를 해결하기 위해서 하나의 채널을 busy tone으로 할당하였다. BTMA의 분산된 버전인 DBTMA^[13]는 두 개의 out-of-band 채널을 사용하여 RTS 전송을 보호하고 주변 노드의 전송을 막는다. PAMAS (Power Aware Multiple Access with Signaling)^[14]는 파워를 절약하기 위해서 슬리핑 모드를 추가했다. 이를 위해 RTS/CTS 프레임에 송신기간 정보를 추가하고 그 기간동안 다른 모바일은 절약모드로 전환된다. DCAPC (Dynamic Channel Assignment with Power Control)^[15]는 하나의 콘트롤 채널과 여러 개의 데이터 채널을 사용한다. 데이터를 보낼 때 사용가능한 하나의 채널을 선택하여 그 채널로 RTS를 최대 파워로 보낸다. 수신자는 그 채널이 사용 가능하면 CTS message를, 그렇지 못하면 사용 가능한 채널 리스트를 보내준다. GRID-B (Grid with Channel Borrowing)^[16] 방법은 각각의 모바일에 할당된 채널이 있고 로드가 심한 모바

일은 필요한 경우 주변의 다른 모바일로부터 채널을 빌린다. 이는 공통 콘트롤 채널을 통해서 이루어진다. GRID-B 방법에서는 CDMA 혹은 FDMA 방법을 사용할 것을 제안했다.

여러 개의 데이터 채널을 사용하는 기법은 다중화 방법에 따라서 TDMA, FDMA, CDMA, SDMA 그리고 둘 이상을 혼합한 Hybrid로 나뉜다.

TDMA FPRP (Five Phase Reservation Protocol)^[16]은 최초로 TDMA를 사용하는 기법이다. TDMA 기법은 미디엄을 여러 개의 고정된 시간 프레임으로 분할하여, 각 시간 프레임에 하나의 전송을 할당하는 방식으로 모든 노드들 사이에 주기적으로 동기화되어야 하고 이러한 성격 때문에 실시간 트래픽에 적합하다. FPRP는 데이터를 전송하는 정보 슬롯과 그 정보 슬롯을 예약하기 위한 예약 슬롯으로 구성된다. 예약 슬롯은 노드들 사이의 경쟁을 통해 정보 슬롯을 예약하는 5개의 구간으로 구성되어 있다. FPRP는 GPS를 통해 완벽한 동기화를 유지한다. CATA (Collision Avoidance Time Allocation)^[17]와 SRMA/PA (Soft Reservation Multiple Access with Priority) 역시 FPRP와 유사한 TDMA 프로토콜이다.

FDMA 사용 가능한 미디엄을 여러 주파수 채널로 분할하는 방법으로 GRID-B 혹은 MCSMA^[18]가 이에 속한다. MCSMA는 각 노드들이 사용 가능한 채널들의 정보를 가지고 있고 각 채널에서 CSMA로 동작한다. 기존의 CSMA에 비해 전체적인 충돌을 줄일 수 있다는 장점이 있지만, 각 채널에서의 숨은 터미널 문제를 해결하지는 못한다.

CDMA 각 발신자 노드들이 서로간의 직교성을 갖는 코드들로 신호를 펼쳐 보낸다. MC MAC (Multi Code MAC)은 CDMA방식을 사용하며, N개의 데이터 전송을 위한 코드와 하나의 콘트롤 코드로 구성되어 있다. 발신자가 콘트롤

코드로 사용하려는 데이터 코드와 함께 RTS를 보내고 중복된 코드가 없다면 CTS를 받고 데이터를 보낸다.

IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) MAC프로토콜로는 MACAW와 CSMA가 결합된 형태를 표준으로 지정한다. 802.11에서 사용하는 CDMA의 방법으로 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)과 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)가 있다. FHSS에서는 79개의 홉핑 가능한 채널이 존재하며, DSSS에서는 노드들의 동시전송을 가능케 하기 위한 12개의 코드를 지정한다. 802.11에서 각 노드는 RTS와 CTS로부터 다음 채널이 사용 가능해지는 시간을 나타내는 NAV (Network allocation vector)를 얻을 수 있다. 또한 이 표준은 미디엄의 사용 가능 여부를 판단하기 위한 채널 감지 기능을 제공한다. 노드들 간의 공평성 문제와 긴 지연을 해결하기 위해 802.11에서는 RTS를 보내기 전에 임의의 대기 시간 (random back-off time)만큼 기다리는 Contention Window를 도입한다. 모든 노드는 각각 이 시간 동안 대기 상태에 놓이게 되고 다른 노드의 타이머가 만료되어 전송을 감지하게 되면 타이머는 다음 back-off 기간까지 멈추게 된다. 이러한 방법으로 오래 동안 기다린 노드에 우선순위를 줌으로써 공평성 문제를 해결한다.

SDMA 공간분할 다중화 방법 (Space Division Multiple Access)은 스펙트럼의 효율을 높이기 위한 방법 중의 하나인 방향성 안테나를 사용하는 프로토콜이다. 대표적인 프로토콜로는 MMAC^[19]이 있다. MMAC에서 각 노드는 모든 주변 노드의 방향을 기억하면서 해당 방향으로 신호를 전송한다.

Hybrid 프로토콜 Hybrid 방식은 위의 방식들 중

두 가지 이상을 결합한 방법으로 Bluetooth와 HIPERLAN (High Performance Local Area Network)이 대표적이다. TDMA와 FDMA를 모두 사용하는 Packet Reservation Multiple Access (PRMA)는 시간 프레임을 예약된 구간과 예약되지 않은 구간으로 나누어 음성 트래픽과 데이터 트래픽에 대해 효율적으로 채널을 할당하는 프로토콜이다. HIPERLAN은 5개 구간의 주파수 채널을 각 노드들이 경쟁하는 또다른 형태의 TDMA/FDMA 결합 방식이다. HRMA (Hop Reservation Multiple Access)^[20]는 특정 시간 슬롯에 모든 노드들이 같은 주파수의 채널을 감지하며 다음 시간 슬롯에서는 모든 노드들이 다른 주파수로 이동한다. 노드가 만약 보낼 데이터가 있다면 Hop Reservation (HR) 메시지를 현재 주파수 채널에 보내고, 수신자로부터 CTS를 받은 후 해당 채널에서 데이터 전송이 이루어진다. CDMA와 TDMA를 결합한 Pseudo Base Station (PBS)에서는 노드 사이에 파워, 동기화, 코드할당을 담당하는 베이스 스테이션 역할을 담당하는 노드를 임시로 선출하는 방법을 사용한다. 피코셀 단위의 주파수 hopping 방식을 사용하는 Bluetooth 또한 CDMA와 TDMA의 결합방식이다.

나) 다중 홉, Clustered 프로토콜

무선 환경에서의 토폴로지는 노드 사이의 관계나 홉의갯수와 같은 것을 의미한다. 빈번한 이동성 때문에 무선 환경에서는 네트워크의 구조가 자주 바뀐다는 특성을 가진다. 따라서 프로토콜은 다양한 토폴로지에 잘 적응할 수 있어야 하고 그에 따라 성능과 전력 소모에 있어서도 효율적이어야 한다. 네트워크 구조는 크게 Centralized, Clustered, Flat 토폴로지로 구분할 수 있는데 초기에 개발된 프로토콜은 주로

Centralized 혹은 단일 홉/Flat구조를 가정하고 만들어졌지만 이들의 제한성을 극복하기 위해서 다중 홉/Flat 혹은 Clustered구조의 프로토콜이 제안되었다.

Centralized 토폴로지는 하나의 노드나 베이스 스테이션이 네트워크의 다른 모든 노드를 컨트롤하는 방식으로, 인프라가 없는 Ad-hoc과는 잘 맞지 않을 수도 있다. BTMA, MACAW, PRMA가 여기에 해당한다. 그러나 이들 프로토콜은 Busy Tone이나 time slot 등 Ad-hoc환경에 적용할 수 있는 새로운 아이디어를 제공하였다.

단일홉 Flat 토폴로지는 모든 노드의 성능이 비슷하다는 점에서 Flat이고 노드가 relaying에 관여하지 않는다는 점에서 단일 홉이다. 상위 계층에서 릴레이를 담당하거나 노드가 전체적으로 다른 노드를 모두 파악하여야 한다. 초기에 개발된 CSMA, MACA, FAMA, MACA-BI 등의 많은 프로토콜이 이 범주에 속하는데 이 범주에 속하는 프로토콜은 확장성과 많은 에너지 소비 등의 문제가 있다. 따라서 작은 단위의 PAN이나 LAN에 적합하다. RIMA-SP, IEEE 802.11, Markowski, HRMA, RICH-DP, DPRMA 등도 이 범주에 속한다.

다중 홉 Flat 토폴로지는 확장성 등을 개선하기 위하여 제안된 개념으로 주변이 아니더라도 모든 노드끼리 릴레이를 통해서 통신이 가능하다. 따라서 단일 홉보다 확장성이 크고 일반화되었다. 대표적인 프로토콜로 PAMAS, MCSMA, FPRP, SRMA/PA, CATA, ADAPT, DCA-PC, DCP/ALP, MMAC, MARCH, DBTMA 등이 있다. 예를 들어 MARCH의 경우는 하나의 RTS로 최종 목적지까지 전체 경로를 예약할 수 있다.

Clustered 토폴로지는 Centralized와 Distributed의 중간 형태라고 생각할 수 있다. 분산시스템의

경우 콘트롤하기 힘들다는 단점이 있는데 이를 극복하기 위해서 소그룹을 만들고 그 소그룹에 한 노드를 Virtual Base Station (VBS)^[21]로 만들거나 WCA (Weighted Clustering Algorithm)^[22]에서의 cluster head로 만들어서 중심 역할을 하게 하는 구조이다. 콘트롤 오버헤드를 줄이고 신호 충돌을 최소화할 수 있는 장점이 있는 반면, 콘트롤을 담당하는 노드에 부하가 집중될 수 있다는 단점이 있다.

다) 에너지 소모 최소화 프로토콜

무선 모바일 네트워크의 MAC 프로토콜을 디자인할 때 고려하는 중요한 사항 중의 하나는 간단말 노드와 네트워크 전체의 에너지 소모이다. 이동성을 갖는 노드는 모두 제한된 배터리 파워를 가지고 있기 때문에 효과적인 파워 콘트롤이 필요하다. 특히 센서 네트워크의 응용처럼 오랫동안 충전없이도 지속되어야 하는 경우에 에너지 소모의 최소화는 중요한 문제이다. 이를 위해 전송파워 조절, 슬립 모드, 배터리 레벨에 따른 조절, 콘트롤 오버헤드를 감소시키는 기법 등이 제안되었다.

전송 파워 제어는 셀룰라 망에서의 간섭을 줄이기 위한 기법으로 연구가 시작되었는데 Ad-hoc 네트워크에 에너지 소비를 줄이기 위해 적용되기 시작했다. 기존 802.11 MAC의 경우는 항상 고정된 파워로 송신을 하는데^[28,29]는 RTS와 CTS는 최대파워로 전송을 하고 데이터는 거리에 따라 상대적인 파워로 전송하는 방법을 제안하였다.^[23]에서는 위의 방법이 파워 레벨이 지나치게 낮아지는 경우에 collision이 생길 수 있는 문제를 조금씩 파워 레벨을 올려주는 방법으로 해결하였다. DCA-PC^[24]에서는 처음에는 최대 파워로 전송을 하고 그로부터 적절한 파워를 계

산한다. 반대로 DPC/ALP^[25]는 처음에 최소파워로 전송하고 송신자가 인지할 수 있을 때까지 점차 파워를 증가시켜나가는 프로토콜이다. Lal^[26]과 MMAC^[27]에서는 방향성 안테나를 사용하여 파워를 줄이는 방법을 제안하였다.

Sleep 모드는 자신과 상관없는 신호를 받을 때 소모되는 전력을 줄이는 방법이다. PAMAS는 RTS/CTS 콘트롤 메시지를 주고받은 후 관련이 없는 신호에 대해서 콘트롤 메시지에 지정된 시간동안 transceiver의 동작을 중지시킨다. HIPERLAN에서는 p-supporter라는 특정 노드는 주변 노드에 sleep 시간을 알려주는 방법을 사용한다. 단점은 p-supporter 노드가 많은 양의 버퍼 공간과 배터리를 빼앗길 수 있다는 것이다. Bluetooth에도 비슷한 슬립모드 개념이 있어서 각 노드가 파워조절을 한다. 하지만 Sleep 모드의 단점은 추가적인 콘트롤 오버헤드가 Sleep모드로 얻을 수 있는 파워소모 감소보다 많을 수 있다는 것이다.

배터리 레벨에 따른 제어가 몇몇 프로토콜에서 발견된다. 예를 들어 DPC/ALP는 배터리 레벨을 high power(HP), low power(LP)로 나누어, LP노드에게 더 높은 전송 우선순위를 준다. 이러한 프로토콜들은 모두 노드가 노트북, PDA, 휴대폰과 같이 보유 파워량이 다양한 경우를 고려하고 있다.

콘트롤 오버헤드 감소도 중요한 에너지 절약 수단이다. MARCH는 N홉을 거쳐야 하는 데이터에 대해서 하나의 RTS와 N개의 CTS를 사용함으로 콘트롤 오버헤드를 감소시킨다.

2. Routing 연구 동향

무선 Ad-hoc 네트워크상에서의 라우팅은 데이

터망의 라우팅과 비교하여 노드의 이동성, 에너지 제약, 신뢰성 등에서 많은 차이가 있다. 이 절에서는 Unicast, Multicast, 저전력 그리고 다중경로 라우팅의 연구경향을 살펴본다.

가) Unicast 라우팅

Flooding은 단순함과 신뢰성 때문에 무선 Ad-hoc 네트워크에서 데이터 및 콘트롤 패킷을 전달하는 경우에 많이 쓰이지만 많은 패킷을 발생 시킴으로써 네트워크에 과부하가 발생할 수 있다. Flooding에 관한 연구는 주로 이 과부하를 감소시키는 방법에 관하여 진행되었다. 확률적 브로드캐스팅법^[30] 혹은 브로드캐스트 지연법^[31]은 패킷의 수를 확률적으로 줄이거나 조금 천천히 보냄으로써 중복을 줄이는 방법들이다. 이 중복을 줄이는 문제는 그래프 이론에서 NP-hard로 알려진 Minimum Connected Dominating Set (MCSD)의 문제로 많은 주변의 정보만을 이용하는 휴리스틱들이 개발되었다^[32,33]. Multipoint Relaying^[33] 방법은 그러한 휴리스틱 중의 하나로 2-hop 주위 정보만 이용한다.

Proactive Routing기법은 OSPF 혹은 RIP처럼 유선망에서 사용하는 기법으로 Routing정보를 미리 교환하여 Routing 경로를 유지하고 있다. 대표적인 방법으로 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)^[34], WRP (Wireless Routing Protocol)^[35], OLSR (Optimized Link State Routing)^[36], 그리고 TBRPF (Topology Broadcast based on Reverse Path Forwarding)^[37] 등이 있다. DSDV, WRP는 distance vector 프로토콜이고 다른 두 가지는 Link State프로토콜이다.

Reactive Routing 혹은 On-demand 기법은 Ad-hoc의 잦은 토폴로지 변화때문에 제안된 방법으로 필요한 경로만을 기억함으로써 Proactive방법

의 오버헤드를 줄이자는 것이다. 단점으로는 지연 시간이 길어진다는 것이 있다. DSR (Dynamic Source Routing)^[38], AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)^[39] 그리고 TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)^[40] 가 여기에 속한다. DSR은 패킷헤더에 경로 정보를 실어서 보내는 source routing방법을 쓰고 AODV는 routing table을 이용하여 경로 정보를 유지한다. TORA는 link reversal^[41]이라는 개념에 근거한 방법으로 중복되지 않는 다중 경로를 찾을 수 있다.

Hybrid 접근법은 위의 두 가지 기법을 합한 방법으로 ZRP (Zone Routing Protocol)^[42]가 있다. 한 노드의 주변을 zone이라 하고 zone 내부에서는 proactive방법 그리고 zone간에서는 reactive한 방법을 사용한다. HSLS (Hazy Sighted Link State)^[43] 정보 전달을 제한하는 기법을 사용하는 link state기법이다. LANMAR protocol은 link state와 distance vector을 혼합해놓은 방법으로 그룹 안에서는 link state, 그룹간에는 distance vector를 사용한다.

Proactive 혹은 Reactive 어느 하나가 더 좋다고 말하기는 힘들다. [44]에서는 다양한 환경에서 시뮬레이션을 통하여 두 가지를 비교했는데 Reactive Routing이 Proactive Routing보다 약간 나은 결과가 나올 뿐, 확연하게 우수하다고 단언할 수는 없다는 결과가 도출되었다. Proactive Routing의 경우는 콘트롤 오버헤드가 고정된 반면 Reactive의 경우는 로드가 커질수록 커진다. 즉 로드가 큰 경우는 Reactive가 더 우수하다고 할 수 없다.

Location based Routing은 GPS 등을 사용하여 자신의 위치와 상대방의 정보를 얻는데 이는 앞의 Proactive, Reactive 등의 방법은 각각의 노드는 메시지를 공유함으로써 route을 찾는다는 점에서 구별된다. LAR (Location aided routing)^[45]

대표적인 Location based Routing 기법으로 flooding의 오버헤드를 줄이기 위하여 목적지의 예측치를 사용한다. DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)^[46] (DREAM)은 location service를 사용한 프로토콜이다.

나) Multicast 라우팅

멀티캐스팅 기법에는 트리기반 프로토콜과 메쉬기반 프로토콜이 있다. 트리기반 프로토콜은 최소경로 트리를 구성하므로 데이터 전송 면에서는 유리하지만 하나의 경로만을 유지하므로 이동성이 높은 경우 경로가 없어질 수 있다. 반면에 Mesh 기반 구조는 여러 개의 경로이므로 신뢰성은 높지만 오버헤드가 높아져서 신뢰성이 떨어질 수 있다. 대표적인 트리기반 프로토콜로는 Ad-hoc Multicast Routing (AMRoute)^[47], AMRIS (Ad-hoc Multicast Routing protocol utilizing Increasing id numberS)^[48] 등이 있고 메쉬기반 프로토콜로는 ODMRP (On demand Multicast Routing Protocol)^[49], CAMP (Core Assisted Mesh Protocol)^[50] 등이 있다. 시뮬레이션 결과에 따르면 일반적으로 이동성이 많은 경우 메쉬기반 라우팅이 트리기반 라우팅보다 우수한 성능을 가진다. 멀티캐스팅에 관한 다양한 참고 문헌은^[51]의 내용을 참조하면 된다.

GeoCasting은 동시에 여러 노드에게 보낸다는 점에서는 멀티캐스팅과 같지만 지정학적 위치에 따라서 그룹 멤버쉽이 정해진다는 점에서 다르다. 이는 지역적인 정보를 전송할 수 있는 방법으로 제안되었고 GeoTORA^[52], geoGRID 등이 있다.

다) 저전력, 다중경로 라우팅

저전력 라우팅은 라우팅을 통해서 전력소모를

최소화하는 개념이다. MAC에서와 마찬가지로 라우팅에서도 저전력 연구가 진행되고 있다. 첫째로 단위 패킷당 전력소모량을 최소화하는 경로를 찾는 연구, 즉 최소 전력 경로를 찾는 라우팅 연구가 진행되고 있다. Power Aware Routing^[53]은 그 예이다. 두 번째로는 전체 네트워크 입장에서 네트워크의 수명을 최소화하는 경로를 찾으려는 연구가 최적화의 관점에서 진행되고 있다^[54]. 하지만 그 구현 단계까지는 여전히 연구가 필요하다.

다중경로 라우팅은 이동성이 많은 Ad-hoc 환경에서 중복성을 줌으로써 신뢰도를 높일 수 있는 방법이다. 하나의 경로가 없어져도 다른 경로를 선택할 수 있다는 점에서 경로의 재설정 지연 시간을 감소시키는 효과가 있다. 하지만 이러한 경로가 겹칠 수도 있기 때문에, 겹치지 않는 경로를 어떻게 만들 것인지 그리고 각 경로간에 load balancing을 어떻게 해주어야 하는지를 해결해야 한다. 최근 Ganjali 등은 다중경로가 반드시 단일경로보다 좋지만은 않다는 재미있는 결과를 보여주었다^[55]. 다중경로를 어떻게 형성하고 어떻게 균형을 잡을 것인지는 좀 더 연구가 필요하다.

3. Transport 연구 동향

무선 Ad-hoc 네트워크에서의 Transport의 대표적인 프로토콜인 TCP는 높은 손실률, MAC 계층과의 상호작용, 잦은 경로변화, 다중경로로 인한 out-of-order 패킷 발생 등의 문제로 성능수준이 현저히 저하된다. 이는 유선망에 기반한 TCP의 근원적인 태생의 문제인데 해결을 위해 많은 연구가 진행되었다.

무선망에서의 전송률 향상을 위한 방법들은

크게 다음의 두 가지 방법으로 구분할 수 있다⁵⁶⁾. 첫째, Link Layer의 도움을 받는 방법으로 FEC/ARQ 등이 이에 속한다. 둘째, 네트워크의 피드백에 기반한 방법들이다. 피드백은 ECN (Explicit Congestion Notification)⁵⁷⁾처럼 명시적으로 받는 피드백과 지연 시간, 손실률처럼 implicit하게 받는 피드백 두 종류가 있다. 이러한 피드백을 이용하여 무선망에 의한 손실과 혼잡에 의한 손실을 구분하여 성능을 향상시키는 방법이 제안되었다.

무선 Ad-hoc 망에서도 비슷한 방법들이 적용 가능하다. TCP-Feedback⁵⁸⁾은 피드백을 통하여 가변적인 route의 정보를 알려준다. ELFN (Explicit Link Failure Notification)⁵⁹⁾도 비슷한 방법이다. 하지만 Ad-hoc 통신망은 다중 홉, 다중 경로가 가능하다는 점에서 셀룰라 망과 구별된다.

홉의 수가 늘어날수록 TCP의 성능은 현저하게 떨어진다. 이는 MAC과 연관성이 있는데 다중 홉에서 이 문제에 대한 특별한 해법은 아직 나와 있지 않다. 다중 경로는 route의 신뢰성을 향상시키지만 out-of-order 패킷을 생성한다는 점에서 TCP에 치명적이다. 이는 TCP가 out-of-order 패킷을 혼잡의 신호로 간주하기 때문에 발생한다. RR-TCP (Reordering Robust)⁶⁰⁾와 TCP-PR (Persistent Reordering)⁶¹⁾은 out-of-order 문제를 해결하기 위하여 제안되었다. 그 외에 A-TCP (Ad-hoc)⁶²⁾, TCP-Bus⁶³⁾ 등이 있다.

4. 보안 (Security Issues) 연구동향

무선 Ad-hoc망의 보안 문제는 최근 들어 관심이 높아지는 분야이다. Ad-hoc 통신망의 다음과 같은 특성 때문에 기존의 security 해법들을 그대로 적용하기에는 제한이 많다. P2P에 기반한 공

개 구조, 브로드캐스팅에 기반한 무선 채널의 특성, 전력, 계산능력, 대역폭등의 제약, 그리고 많은 이동성에 기반한 가변적인 토폴로지 등은 무선 Ad-hoc망의 보안문제를 어렵게 만든다.

무선 Ad-hoc 망에서의 연구는 크게 네트워크 계층의 보안과 링크 계층의 보안으로 구분된다. 링크 계층의 보안은 단일 홉에서의 보안이고 네트워크 계층의 보안은 주로 멀티 홉에서의 보안인데 라우팅과 포와딩 두 측면으로 구분된다.

Link 계층의 보안 802.11망은 Exponential Backoff나 NAV vector를 이용한 DoS (Denial of Service) 공격이 가능하다. [64]에서는 시뮬레이션을 통하여 Exponential backoff를 오용함으로써 정당한 사용자가 서비스를 이용할 수 없게 할 수 있다는 것을 보였고 [65]에서는 이것을 발견하고 해결할 수 있는 방법을 제안하였다. [66]에서는 무선 간섭을 사용하여 이용자의 패킷에 에러를 발생시킴으로써 이용자의 서비스를 제한할 수 있음을 보였다.

802.11에서 사용하는 보안 프로토콜인 WEP (Wired Equivalence Privacy)이 Message privacy 와 integrity 공격, 확률적 cipher key recovery 공격에 취약하다는 사실은 알려져 있다. 최근에 제안된 802.11i/WPA⁶⁷⁾는 이러한 문제를 해결하였다.

Network 계층의 보안은 라우팅 메시지가 제대로 전달이 되는지에 관한 secure 라우팅과 패킷이 제대로 전달되는지에 관한 secure 포와딩으로 구분할 수 있다.

secure 라우팅 문제는 AODV나 DSR같은 프로토콜의 routing 메시지를 어떻게 인증하는가의 문제이다. DSR의 경우는 경로 정보가 메시지에 포함되고 AODV혹은 DSDV는 홉 count처럼 메트릭 정보가 포함이 된다. 메시지에 포함된 이러한 정보를 제3자가 변조하는 것을 확인 할 수 있

어야 하는데 주로 해싱기법에 기반한 one way HMAC key chain 기법이 사용된다. DSR의 Ariadne^[68], DSDV는 SEAD^[69], link State 프로토콜의 SLSP (Secure Link State Protocol)^[70] 등이 secure한 프로토콜이다.

Secure 패킷 포와딩의 문제는 악의를 가진 중간 노드가 전송을 방해하거나 잘못 전송하는 것을 막는 데 있다. 이를 위해서는 잘못 행동하는 노드의 발견(detection)과 발견 후 처리(reaction)하는 두 가지 방법이 개발되어야 한다. 발견 방법은 ACK 혹은 다른 지역적인 정보를 사용한다^[71,72]. 일단 그러한 노드가 발견되면 다른 노드는 그 잘못된 노드를 네트워크에서 제외하거나^[73] 혹은 그 노드의 등급을 바꾸어서 그 노드로는 패킷 전송이 원활하지 않게 만든다^[72].

현재까지의 보안에 관한 연구는 주로 여러 가지 공격(attack)에 어떻게 대응할 것인가가 주이다. 하지만 이러한 연구는 새로운 공격에 적용할 수 없다는 점에서 제한적이다. 이러한 점을 보완하기 위한 연구가 필요한 시점이다.

5. Ad-hoc 네트워크의 용량 (Capacity)

Gupta와 Kumar는 선도적인 연구에서 Ad-hoc 네트워크의 용량이 노드 수가 n 일 때 $\Theta(\frac{n}{\sqrt{\log n}})$ 에 비례하여 증가한다고 보였다^[74]. 그 이후 용량에 관한 관심이 폭발적인 증가를 보였고 많은 발전이 있었다. Grossglauber와 Tse는 노드의 움직임이 성능 향상에 도움이 됨을 보였다^[75]. 가까운 노드 사이의 relay를 통해서 전송하면 간섭을 줄일 수 있으므로 네트워크의 용량은 노드수에 비례하여 증가함을 보임으로 [74]의 결과보다 발전된 결과를 보였다^[75,76]. 하지만 Grossglauber의 결과는 지연 시간에 대한 고려가 없었고 [77]에서는 지연 시

간과 용량 사이에 존재하는 trade-off에 대해 다루었다. 즉 지연 시간에 관한 제약이 있는 경우엔 [76]에서 말하는 용량을 얻을 수 없다는 것이다.

최근 [78]에서는 UWB환경에서 물리 계층의 rate adaptation을 사용함으로써 간섭을 조절하면 Grossglauber가 얻었던 비슷한 결과를 얻을 수 있음이 밝혀 졌고 이러한 결과는 Ad-hoc 네트워크의 용량이 물리 계층의 특성에 따라서 달라질 수 있음을 보여준다.

III. 기술적 과제 (Open Problems)

Ad-hoc 네트워크의 오랜 역사와 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 Ad-hoc 네트워크가 풀어야 할 문제는 여전히 많다.

QoS 유선망에서도 아직 풀리지 않은 QoS (Quality of Service)문제는 무선망에서는 채널의 다변성 때문에 더욱 어려운 문제로 인식된다. 각각의 계층에서 이 문제를 다루려는 시도, 예를 들자면 QoS 라우팅과 같은 시도가 있었지만 이 문제는 모든 계층에서 다루어져야 한다. 다계층 최적화 (Cross Layer Optimization)기법¹⁾이 하나의 가능성으로 떠오르고 있고 많은 사람들이 이 방법에 관심을 가지고 있다.

보안 문제는 또 하나의 다계층 문제이다. Ad-hoc 통신망에서는 라디오 채널이 공개되어 있어서 외부와 내부의 명확한 구분이 불가능하기 때문에 여러 계층에서의 통합적인 해법이 요구된다. 특히 센서 네트워크에서는 CPU 등의 계산 능력이 제한되어 있어서 많은 계산이 요구되는 해법은 사용할 수 없다는 제한이 있다. 이 분야

1) 물리 계층부터 응용 계층까지의 모든 계층을 수직적으로 통합하여 문제를 해결하려는 기법

의 연구는 이제 초기 단계로 앞으로 많은 연구가 기대된다.

저전력 사용을 위한 연구는 현재 가장 활발한 연구 중의 하나이다. 물리, MAC, 네트워크, 심지어는 트랜스포트 등의 모든 계층에서 전력 사용의 최소화를 위한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 특히 전력의 공급 없이 최대 몇 년간의 수명을 요구하는 센서 네트워크의 경우엔 이 연구가 필수적이다.

물리 계층 기술 스마트 안테나, MIMO (Multiple Input Multiple output), beam forming 등의 새로운 기술들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 새로운 기술과의 Ad-hoc 네트워크를 어떻게 연계시킬 것인가는 연구 과제이다. Rate adaptation을 사용하면 성능이 향상 될 수 있다는 결과⁷⁸⁾가 실제로 Ad-hoc 네트워크에서 어떻게 구현될 수 있을 것인가에 관한 연구가 되어야 할 것이다.

다른 무선망과의 통합 지금까지의 많은 Ad-hoc 망의 연구는 컴퓨터 네트워크의 중심에서 이루어졌다. 하지만 상대적으로 무선망의 관점에서의 연구는 미진한 편이다. 무선 Ad-hoc 네트워크가 2.5G 혹은 3G 무선망에 통합되는 시점에서 무선망의 관점에서 Ad-hoc 망의 기술들을 접목하려는 연구가 되어야 할 것이다.

IV. 요약 및 결론

지금까지 무선 Ad-hoc 네트워크의 다양한 계층별 연구 상황에 대하여 살펴보았다. 연구 분야에 관한 정리는 다음과 같다.

- MAC분야는 초기의 CSMA/CA에 기반한 MAC에서 이제는 다중 채널을 가진 MAC, 다중 홉과 clustered 토폴로지에 기반한 MAC, 그리고 저전력 소모를 위한 MAC으

로 연구의 초점이 옮겨가고 있는 추세이다.

- 라우팅 프로토콜은 Proactive, Reactive 그리고 그 중간인 Hybrid형의 프로토콜이 제안되었고 최근에는 GPS등을 이용한 위치 기반 라우팅 기법이 제안되고 있다. 또 저전력을 위한 라우팅과 QoS를 위한 라우팅은 앞으로 많은 연구가 필요한 분야이다.
- 트랜스포트 분야는 기존의 TCP의 한계를 극복하는 연구들이 진행되었고 MAC, 라우팅 계층과 결합하여 저전력과 QoS가 이슈가 될 것이다.
- 보안 분야와 네트워크의 용량에 관한 연구는 이제 결음마 단계인데 이러한 연구들이 실제 시스템에 구현되기 위해서는 더욱 많은 연구가 필요한 실정이다.

이동 Ad-hoc 네트워크의 중요성이 점차 증대하고 있고 앞으로는 더 많은 사람들이 이동 Ad-hoc 통신망에 접근할 것이다. 이의 실현을 위해서는 위에서 언급한 QoS, 저전력 등의 문제들이 해결되어야 할 것이다. 또한 이동 Ad-hoc 기기의 보급과 함께 적합한 응용의 개발, 그리고 이동 Ad-hoc 기기에서 인터넷을 활용할 수 있는 IP 주소 할당, 서비스 자동 검색과 같이 사용자들이 쉽게 이동 Ad-hoc 통신망을 실질적으로 사용하기 위해서 필요한 과제들이 해결되어야 한다.

<감사의 글>

저자는 논문을 쓰는 데 도움되는 토론을 해 준 김성륜 교수님과 도움을 준 객재욱, 김광훈군에게 감사 드립니다.

 참고문헌

- [1] Freebersyser and B. Leiner, "A DoD Perspective on Mobile Ad-hoc Networks," Ad-hoc Networking, ed. C. E. Perkins, Addison-Wesley, 2001, pp. 29-51.
- [2] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," Proc. ACM SIGCOMM 1994.
- [3] D. B. Johnson, "Routing in Ad-hoc Networks of Mobile Hosts," Proc. ACM Mobicom 1994.
- [4] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [5] <http://www.bluetooth.com/>
- [6] J. Schiller, Mobile Communications, Addison-Wesley, 2000, pp. 188-203.
- [7] 조성호, 김종권, "이동 Ad-hoc 통신망 연구개발 동향 및 IETF MANET 워킹그룹의 표준화 동향", 정보과학회 정보통신기술지, 2003년
- [8] C. L. Fullmer and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for Packet-Radio Networks," Proc. IEEE SIGCOMM 1995, pp. 262-73.
- [9] F. Talucci, M. Gerla, and L. Fratta, "MACA-BI (MACA By Invitation): A Receiver-Oriented Access Protocol for Wireless Multihop Networks," PIMRC 1997, vol. 2, pp. 435-39.
- [10] J. J. Garcia-Luna-Aceves and A. Tzamaloukas, "Reversing the Collision-Avoidance Handshake in Wireless Networks," ACM/IEEE Mobicom, 1999.
- [11] F. A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II - The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution," IEEE Trans. Commun., vol. 23(12), 1975, pp. 1417-33.
- [12] Z. J. Haas and J. Deng, "Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA): A Multiple Access Control Scheme for Ad-hoc Networks," IEEE Trans. Commun., vol. 50(6), 2002, pp. 975-85.
- [13] S. Singh and C. S. Raghavendra, "Power-Efficient MAC Protocol for Multihop Radio Networks," 9th IEEE Int'l Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun., vol. 1, 1998.
- [14] Y. C. Tseng et al., "A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad-hoc Networks," Int'l Conf. Distributed Comp. Sys. Wksp., 2001, pp. 419-24.
- [15] Y. C. Tseng et al., "Dynamic Channel Allocation with Location Awareness for Multi-Hop Mobile Ad-hoc Networks," Comp. Commun., vol. 25, 2002, pp. 676-88.
- [16] C. Zhu and M. S. Corson, "A Five-Phase Reservation Protocol (FPRP) for Mobile Ad-hoc Networks," 17th Annual Joint Conf. IEEE Comp. and Commun. Societies, vol. 1, 1998, pp. 322-31.
- [17] Z. Tang and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "A Protocol for Topology-Dependent Transmission Scheduling in Wireless Networks," IEEE WCNC, 1999.
- [18] S. Agrawal et al., "Distributed Power Control in Ad-hoc Wireless Networks," PIMRC, 2001.
- [19] R. R. Choudhury et al., "Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad-hoc Networks," Mobicom, 2002.
- [20] Z. Tang and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Hop Reservation Multiple Access (HRMA) for Multichannel Packet Radio Networks," Int'l Conf. Comp. Commun. and Networks, 1998, pp. 388-95.
- [21] H. Hassanein and A. Safwat, "Virtual Base Stations For Wireless Mobile Ad-hoc Communications: An Infrastructure for the Infrastructure-less," Int'l J. Commun. Sys., vol. 14, 2001, pp. 763-82.
- [22] M. Chatterjee, S. K. Das, and D. Turgut, "WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad-hoc Networks," Cluster Computing, vol. 5, 2002, pp. 193-204.
- [23] J. Monks et al., "A Study of the Energy Saving and

- Capacity Improvement Potential of Power Control in Multi-Hop Wireless Networks," 26th Annual IEEE Conf. Local Computer Net., 2001, pp. 550-59.
- [24] Y. C. Tseng et al., "A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad-hoc Networks," Int'l. Conf. Distributed Comp. Sys. Wksp., 2001, pp. 419-24.
- [25] J. Kim and N. Bambos, "Power-Efficient MAC Scheme using Channel Probing in Multi-rate Wireless Ad-hoc Networks," IEEE Vehic. Tech. Conf., vol. 4, 2002, pp. 2380-84.
- [26] D. Lal et al., "A Novel MAC-Layer Protocol for Space Division Multiple Access in Wireless Ad-hoc Networks," 11th Int'l. Conf. Comp. Commun. and Net., 2002, pp. 614-19.
- [27] C. K. Toh et al., "MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multihop Wireless Ad-hoc Networks," MILCOM 21st Century Military Commun. Conf., vol. 1, 2000, pp. 512-16.
- [28] G. Holland, N. Vaidya, "Analysis of TCP Performance over Mobile Ad-hoc Networks", ACM Mobile Communication Conference, 1999.
- [29] D. Kim, C.-K. Toh, Y. Choi, "TCP-BuS: Improving tcp performance in wireless Ad-hoc networks", in IEEE ICC'00, (New Orleans, LA), Jun. 2000.
- [30] Z. Haas, J. Halpern, and L. Li. "Gossip-based Ad-hoc Routing," Proc. IEEE Infocom, pp. 1707-1716, 2002.
- [31] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu. "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad-hoc Network," Proc. IEEE/ACM MobiCom, pp. 151-162, 1999.
- [32] U. C. Kozat, G. Kondylis, B. Ryu, and M. K. Marina. "Virtual Dynamic Backbone for Mobile Ad-hoc Networks," Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 250-255, 2001.
- [33] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti. "Multipoint Relaying for Flooding Broadcast Messages in Mobile Wireless Networks," Proc. the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3898-3907, 2002.
- [34] C. E. Perkins and P. Bhagwat. "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," Proc. ACM SIGCOMM, pp. 234-244, 1994.
- [35] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves. "An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks," ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 1(2): 183-197, 1996.
- [36] T. Clausen et al. "Optimized Link State Routing Protocol," <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, October, 2003.
- [37] R. Ogier, M. Lewis, and F. Templin, "Topology Dis-semination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)," <http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>, February, 2004.
- [38] D. Johnson and D. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad-hoc Wireless Networks," In T. Imielinski and H. Korth, editors, Mobile computing, chapter 5. Kluwer Academic, 1996.
- [39] C. E. Perkins, E. Belding-Royer, and S. R. Das, "Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, July 2003. RFC 3561.
- [40] V. D. Park and M. S. Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," Proc. IEEE Infocom, pp. 1405-1413, 1997.
- [41] E. Gafni and D. Bertsekas. "Distributed Algorithms for Generating Loop-free Routes in Networks with Frequently Changing Topology," IEEE Transactions on Communications, 29(1):11-18, 1981.
- [42] M. Pearlman and Z. Haas. "Determining the Optimal Configuration for the Zone Routing Protocol," IEEE Journal on Selected Areas in

- Communications, 17(8):1395-1414, 1999.
- [43] C. Santivanez, R. Ramanathan, and I. Stavrakakis. "Making Link-State Routing Scale for Ad-hoc Networks," Proc. ACM MobiHoc, pp. 22-32, 2001.
- [44] S. R. Das, R. Castaneda, and J. Yan. "Simulation-based Performance Evaluation of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks," ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 5(3):179-189, 2000.
- [45] Y. Ko and N. H. Vaidya, "Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad-hoc Networks," Proc. IEEE/ACM MobiCom, pp. 66-75, 1998.
- [46] S. Basagni, I. Chlamtac, V. R. Syrotiuk, and B. A. Woodward, "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)," Proc. IEEE/ACM MobiCom, pp. 76-84, 1998.
- [47] E. Bommaiah, M. Liu, A. McAuley, R. Talpade, "AMRoute : Ad-hoc Multicast Routing Protocol", IETF Internet-Draft, draft-talpade-manet-amroute-00.txt, Aug. 1998.
- [48] C. Wu, Y. Tay, "AMRIS: A Multicast Protocol for Ad-hoc Wireless Networks", in IEEE Military Communications Conference (MILCOM), November 1999.
- [49] S. J. Lee, W. Su, M. Gerla, "On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) for Ad-hoc Networks", IETF Internet-Draft, draft-ietf-manet-odmrp-01.txt, Jun. 1999.
- [50] J.J. Garcia-Luna-Aceves, E.L. Madruga, "The Core Assisted Mesh Protocol (CAMP)," IEEE JSAC, Special Issue on Ad-hoc Networks, Vol. 17, No. 8, pp. 1380-1394, August 1999.
- [51] S. K. Das, B. S. Manoj, and C. S. R. Murthy, "Dynamic Core Based Multicast Routing Protocol," Proc. ACM Mobihoc 2002, June 2002.
- [52] Y. Ko and N. Vaidya, "GeoTORA: A Protocol for Geocasting in Mobile Ad-hoc Networks," IEEE ICNP, Nov. 2000
- [53] S. Singh, M. Woo and C. Raghavendra, "Power Aware Routing in Mobile Ad-hoc Networks," Proc. ACM/IEEE int. Conf. on Mobile Computing and Networking, pp. 181-190, October 1998.
- [54] R. Jäntti and S.-L. Kim, "Energy-Efficient Routing in Wireless Ad-hoc Networks under Mean Rate Constraints," Proc. 56th IEEE Vehicular Technology Conference Spring, 2003.
- [55] Y. Ganjali, A. Keshavarzian, "Load Balancing in Ad-hoc Networks: Single-path Routing vs. Multi-path Routing," Proc. IEEE INFOCOM 2004
- [56] TCP over Wireless Networks homepage <http://cabernet.icu.ac.kr/~jhmo/tcp-wireless3.html>
- [57] Ramakrishnan, K.K., Floyd, S., and Black, D, "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP," RFC 3168, 2001
- [58] K. Chandran, S. Raghunathan, S. Venkatesan, R. Prakash, "A feedback-based scheme for improving TCP performance in Ad-hoc wireless networks," IEEE Personal Communications Magazine, 8(1):34-39, 2001.
- [59] G. Holland, N. Vaidya, "Analysis of TCP Performance over Mobile Ad-hoc Networks," ACM Mobile Communication Conference, 1999.
- [60] M. Zhang et. al., "RR-TCP: A Reordering-Robust TCP with DSACK," Proc. the Eleventh IEEE International Conference on Networking Protocols (ICNP 2003), Adanta, GA, November, 2003
- [61] S. Bohacek et. al., "TCP-PR: TCP for Persistent Packet Reordering." Proc. IEEE 23rd Int. Conf. on Distributed Computing Systems, pp. 222-231, 2003
- [62] J. Liu, S. Singh, "ATCP: TCP for Mobile Ad-hoc Networks," IEEE JSAC July 2001.
- [63] D. Kim, C.-K. Toh, Y. Choi, "TCP-BuS: Improving tcp performance in wireless Ad-hoc networks", in IEEE ICC '00, 2000.
- [64] V. Gupta, S. Krishnamurthy, and M. Faloutsos, "Denial of Service Attacks at the MAC Layer in Wireless Ad-hoc Networks," IEEE MILCOM, 2002.

- [65] P. Kyasanur, and N. Vaidya, "Detection and Handling of MAC Layer Misbehavior in Wireless Networks," DCC, 2003.
- [66] G. Noubir and G. Lin, "Low-Power DoS Attacks in Data Wireless LANs and Countermeasures," ACM MobiHoc, Poster Session, 2003.
- [67] IEEE Std. 802.11i/D30, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Specification for Enhanced Security," 2002.
- [68] Y. Hu, A. Perrig, and D. Johnson, "Ariadne: A Secure On-demand Routing Protocol for Ad-hoc Networks," ACM MOBICOM, 2002.
- [69] Y. Hu, D. Johnson, and A. Perrig, "Sead: Secure Efficient Distance Vector Routing for Mobile Wireless Ad-hoc Networks," IEEE WMCSA, 2002.
- [70] P. Papadimitratos and Z. Haas, "Secure Link State Routing for Mobile Ad-hoc Networks," IEEE Wksp. Security and Assurance in Ad-hoc Networks, 2003.
- [71] B. Awerbuch et al., "An On-Demand Secure Routing Protocol Resilient to Byzantine Failures," ACM WiSe, 2002.
- [72] S. Marti et al., "Mitigating Routing Misbehavior in Mobile Ad-hoc Networks," ACM MOBICOM, 2000.
- [73] H. Yang, X. Meng, and S. Lu, "Self-Organized Network Layer Security in Mobile Ad-hoc Networks," ACM WiSe, 2002.
- [74] P. Gupta and P. R. Kumar, "Capacity of wireless networks," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 46(2), pp. 338-404, 2000.
- [75] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of Ad-hoc wireless networks," Proc. IEEE Infocom 2001.
- [76] S. Diggavi, M. Grossglauser, and D. N.C. Tse, "Even one-dimensional Mobility Increases Ad-hoc wireless capacity," submitted to the IEEE Transactions on Information Theory, August 2003.
- [77] A. E. Gamal, J. Mammen, B. Prabhakar, D. Shah, "Throughput-Delay Trade-off in wireless Networks," Proc. IEEE Infocom 2004.
- [78] R. Negi, A. Rajeswaran, "Capacity of power constrained Ad-hoc networks," Proc. IEEE Infocom 2004.
- [79] R. Jurdak et. al., A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad-hoc Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorial, Vol. 6(1), 2004
- [80] H. Yang et. al., "Security in Mobile Ad-hoc Networks: Challenges and Solutions," IEEE Wireless Communications, Feb. 2004

저자소개



모 정 훈

1993년 서울대학교 산업공학과 학사
 1995년 서울대학교 산업공학과 석사
 1998년 버클리 소재 캘리포니아 주립대 EECS 석사
 1999년 버클리 소재 캘리포니아 주립대 IEOB 박사
 1999년-2000년 AT&T Labs, NJ, Senior Technical Staff Member
 2000년-2003년 TeraBlaze(현 Agere), CA, Senior Technical Staff Member
 2003년-현 재 한국정보통신대학교 공학부 조교수
 주관심분야 Flow/Congestion Control, Quality of Service, Wireless Ad-hoc Networks, Radio Resource Management, OFDM, Cellular/WLAN Integration, Network Economics