

# 이동 Ad Hoc 네트워크 기술 동향

## Technical Trends on Mobile Ad Hoc Networks

권혜연(H.Y. Kwon)	무선Ad-hoc연구팀 선임연구원
신재욱(J.W. Shin)	무선Ad-hoc연구팀 선임연구원
이병복(B.B. Lee)	무선Ad-hoc연구팀 선임연구원
최지혁(J.H. Choi)	무선Ad-hoc연구팀 연구원
남상우(S.W. Nam)	무선Ad-hoc연구팀 책임연구원, 팀장
임선배(S.B. Lim)	이동통신기반기술연구부 책임연구원, 부장

이동 Ad Hoc 네트워크는 고정적이고 계층적인 인프라스트럭처 네트워크와는 비교되는, 이동 노드만으로 구성된 자율적이고 수평적인 네트워크이다. 이동 Ad Hoc 네트워크의 이동 노드는 중재자의 도움 없이 능동적인 연결 설정이 가능하고 네트워크의 참여 또는 이탈이 자유로우며 에너지원의 공급이 제한되어 빈번하게 네트워크의 토폴로지를 변화시킨다. 이러한 망의 특성상 이동 Ad Hoc 네트워크 기술은 하위 계층의 전파 전파, 전파 간섭 및 전력 제어에서부터 링크 계층의 다중 접속 및 자원 할당, 네트워크 계층의 라우팅, 트랜스포트 계층의 연결 설정 및 유지, 그리고 보안 및 상위 계층 애플리케이션에 이르기까지 다양한 기술적 해결 요구사항을 갖는다. 본 고에서는 이러한 Ad Hoc 네트워크의 특징과 특성을 살펴보고 관련 주요 요소 기술과 과거부터 현재까지 이동 Ad Hoc 네트워크 기술 분야에서 진행되어온 연구 동향을 살펴본다.

## I. 서론

이동 Ad Hoc 네트워크는 고정된 기반 망의 도움 없이 이동 노드들간에 자율적으로 구성되는 망으로서, 네트워크에 자율성과 융통성을 부여한 네트워크이다. 이동 Ad Hoc 네트워크를 구성하는 노드들은 무선 인터페이스를 가지며, 이동 컴퓨팅 기능을 가진 호스트와 라우팅 기능을 가진 라우터를 동시에 만족하는 형상으로 흔히 이동 노드로 불려진다. 이러한 이동 노드는 전파 도달 거리가 제한되므로 중간 노드로서 데이터 전달 기능을 가지며, 배터리를 사용하므로 에너지의 공급이 일정치 않은 특성을 갖는다[1],[2].

한편, 이동 Ad Hoc 네트워크는 기지국(Base

Station, 이하 BS)이나 액세스포인트(Access Point, 이하 AP)와 같은 중재자(centralized coordinator)가 없이 이동 노드들간에 자체적으로 연결이 설정되므로 임시적 또는 즉흥적인 망의 구성이 가능하다. 이는 이동 노드간의 연결성, 전파 상태, 트래픽 및 사용자 이동 패턴에 따라 네트워크 토폴로지가 끊임 없이 변화하므로 네트워크의 구성과 유지가 어렵고 제반 기술의 적용이 용이치 않다.

따라서 이동 Ad Hoc 네트워크 기술은 하위 계층의 전파 전파, 전파 간섭 및 전력 제어에서부터 링크 계층의 다중 접속 및 자원 할당, 네트워크 계층의 라우팅, 트랜스포트 계층의 연결 설정 및 유지, 그리고 보안 및 상위 계층 애플리케이션에 이르기까지 다양한 기술적 해결 요구사항을 갖는다. 또한 기존의 인

터넷이나 이동 통신망 또는 무선랜과의 상호 연동을 위한 IP 이동성이나 주소 관리, 망 관리 기술들도 앞으로 해결해야 할 문제들이다.

본 고에서는 이와 같은 이동 Ad Hoc 네트워크 전반의 요소 기술과 연구 및 개발 동향을 살펴본다. 본 장에 이어 II장에서는 이동 Ad Hoc 네트워크의 일반적인 특성과 특징을 살펴보고, 주요 요소 기술과 응용 분야에 대해 기술한다. III장에서는 II장에서 살펴본 기술들을 토대로 이동 Ad Hoc 네트워크 관련 주요 그룹에서의 연구 및 개발 동향을 살펴보고 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

## II. 이동 Ad Hoc 네트워크 개요

### 1. 특징 및 특성

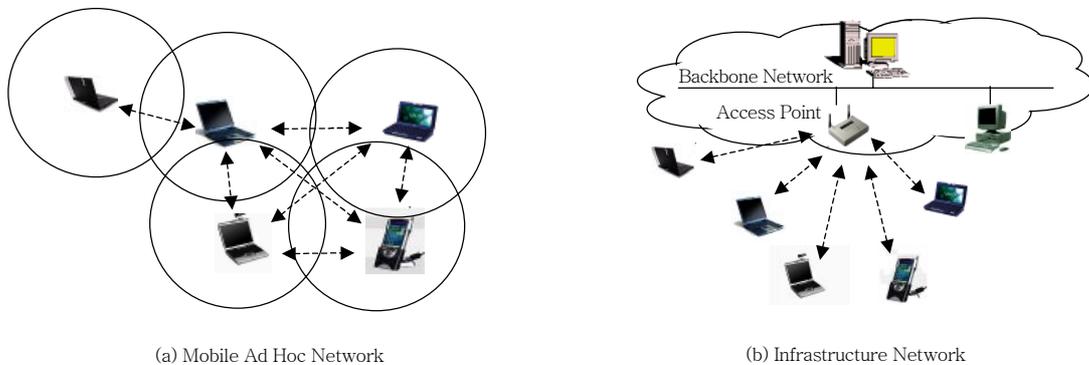
기존의 유무선 네트워크와는 달리 이동 Ad Hoc 네트워크는 (그림 1)의 (a)와 같이 이동 노드 간에 자율적이고 즉흥적인 연결 설정을 갖는다. 이는 (b)와 같이 고정 게이트웨이 또는 AP를 가진 기반 망 (infrastructure network)에서의 계층적이고 수직적인 연결 설정과는 구별된다. 특히, 기반망에서 계층적이고 수동적인 이동 노드는 이동 Ad Hoc 네트워크에서는 대등하고 능동적인 망의 주체가 된다.

이동 Ad Hoc 네트워크가 인터넷 또는 이동 통신망 등의 기반 망과 구별되는 가장 큰 특징은 고정된 중재자의 도움 없이 자율적으로 망의 구성이 가능하

며, 고정된 라우터가 존재하지 않아 이동 노드간의 협력에 의한 라우팅 기능이 제공되며, 특정 서비스 제공자가 없이 단말에서 서비스가 해결되어야 한다는 점이다.

한편, 이동 Ad Hoc 네트워크의 특성을 살펴보면 다음의 네 가지로 요약된다. 첫번째로 이동 Ad Hoc 네트워크의 가장 큰 특성은 네트워크를 구성하는 이동 노드들이다. 이동 노드는 이동 컴퓨팅 기능을 가진 호스트이자 이동 Ad Hoc 라우팅 기능을 가진 라우터로 동작한다. 또한 다른 노드를 대신하여 패킷을 전달하고 애플리케이션들을 실행할 수도 있으며 제한된 배터리로 동작함으로써 기능에 제약 받는다.

두번째로, 이동 Ad Hoc 네트워크는 동적인 네트워크 토폴로지를 갖는다. 이동 Ad Hoc 네트워크는 노드의 일부 또는 전체가 수시로 네트워크에 나타나거나 사라질 수 있다. 이는 사용자의 이동 패턴과 트래픽 종류 또는 배터리를 사용하는 이동 노드의 에너지 잔량 등에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 유동적인 네트워크의 토폴로지의 변화로 경로의 설정과 유지가 어렵고 기존의 라우팅 또는 트랜스포트 프로토콜의 적용이 어렵다. 그럼에도 불구하고 일반적으로 기존 네트워크에서 적용되는 연결 접속 및 트래픽 요구 사항, QoS 등이 이동 Ad Hoc 네트워크에서도 동일하게 요구된다. 이는 이동 Ad Hoc 네트워크 기술의 다양성과 난이도를 어렵게 하는 요인이 된다.



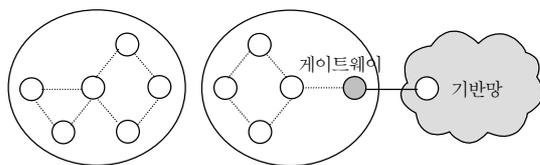
(그림 1) 이동 Ad Hoc 네트워크와 인프라스트럭처 네트워크

세번째로, 이동 Ad Hoc 네트워크는 불안정한 링크 특성을 갖는다. 이동 노드들은 무선 채널을 사용하므로 전송 거리와 전송 대역폭에 제약을 받고, 전파 간섭 및 다중 링크로 인한 보안 문제를 야기한다. 또한, 무선 링크의 높은 비트 에러율이 다중 홉 이동 Ad Hoc 네트워크의 품질에 많은 영향을 끼친다.

네번째로, 이동 Ad Hoc 네트워크는 분산 운영 기능을 갖는다. 이동 Ad Hoc 네트워크 상의 이동 노드들은 보안 및 라우팅 기능 지원 등을 백본 네트워크에 의존할 수가 없다. 따라서 이러한 기능들이 여러 노드간의 협력에 의해 분산 운영된다.

## 2. 존재 형태

이동 Ad Hoc 네트워크는 이동 노드만으로 구성되는 자율적이며 즉흥적인 망으로서 (그림 2)의 (a)와 같이 독립적으로 구성이 가능하다. 그러나 독립적으로 구성된 네트워크에서는 대등한 노드들끼리의 정보 교환이나 수집은 가능하나 기존의 인터넷 등과 같은 기반 망에서 제공되는 다양한 콘텐츠나 서비스를 이용할 수가 없고, 분산 수집된 정보를 특정 서버 또는 데이터베이스로 가져와 이를 가공하거나 정보의 가치를 높이기가 어렵다. 따라서 (b)와 같이 이동 Ad Hoc 네트워크와 다른 기반 망과의 연동을 고려해 볼 수 있다.



(a) 독립적으로 존재하는 경우 (b) 기반망과 연동되는 경우

(그림 2) 이동 Ad Hoc 네트워크의 존재 형태

## 3. 주요 요소 기술

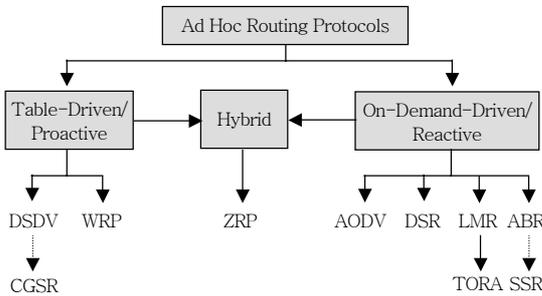
이동 Ad Hoc 네트워크 기술 분야는 매우 다양하나 본 절에서 나타나는 기술적 이슈들이 주로 거론이 되고 다양하게 연구되고 있다.

### 가. Routing

이동 Ad Hoc 네트워크는 이동 노드의 이동 패턴과 트래픽 종류, 링크 품질 또는 전력 여유 등에 따라 토폴로지가 수시로 변하므로 특정 노드를 찾아가기 위한 경로의 설정과 유지가 상당히 어렵다. 특히 이동 노드는 제한된 무선 전송 거리를 가지기 때문에 목적지에 대한 정보는 이웃 노드 또는 데이터 전달 경로상에 있는 중간 노드에 의해 결정된다. 또한, 노드들의 이동 패턴에 따라 직접적인 통신이 가능한 이웃 노드들의 집합 또는 그룹이 함께 변하므로 각 노드는 주기적으로 자신의 존재를 방송하여 직접적인 통신이 가능한 이웃 노드 또는 그룹의 정보를 항상 유지해야 한다.

그러나 기존의 네트워크에서 사용이 되는 RIP (Routing Information Protocol) 또는 OSPF (Open Shortest Path First)와 같은 인터넷 라우팅 프로토콜들이 유동성이 적은 안정된 네트워크 환경에서 주기적인 라우팅 테이블 관리로 동작하므로, 주기적인 메시지의 교환이 요구되어 대역폭의 낭비가 심하고 네트워크의 동적인 변화에 빠르게 대응하지 못하므로 이를 그대로 이동 Ad Hoc 네트워크에 적용하기에는 많은 오버헤드가 따른다. 따라서 기존의 라우팅 프로토콜의 변형 또는 새로운 방식의 라우팅 프로토콜이 요구되고, 이동 Ad Hoc 라우팅 프로토콜에 대한 연구는 이동 Ad Hoc 네트워크의 주된 연구 대상이 되고 있다[1],[2].

현재 이동 Ad Hoc 라우팅 프로토콜은 1997년 7월에 결성이 된 IETF(Internet Engineering Task Force) MANET(Mobile Ad hoc NETWORK)[3] 워킹 그룹의 주도로 표준화 작업이 진행 중이며 AODV(Ad Hoc On-demand Distance Vector)[4], DSR(Dynamic Source Routing)[5], ZRP(Zone Routing Protocol)[6] 그리고 TORA(Temporally-Ordered Routing Algorithm)[7] 등의 프로토콜들이 인터넷 드래프트로서 제안되었다. 이동 Ad Hoc 라우팅 프로토콜은 (그림 3)과 같이 테이블 관리 방식 (Table-driven 또는 Proactive)과 요구 기반 방식



(그림 3) 이동 Ad Hoc 라우팅 프로토콜의 분류

(On-demand 또는 Reactive), 그리고 이를 혼합한 하이브리드 방식으로 크게 나눌 수 있다[2].

테이블 관리 방식은 주기적으로 또는 네트워크 토폴로지가 변화할 때 라우팅 정보를 브로드캐스팅함으로써 모든 노드가 항상 최신의 라우팅 정보를 유지하는 방식이다. 테이블 관리 방식의 라우팅 프로토콜로는 DSDV(Destination Sequenced Distance Vector), WRP(Wireless Routing Protocol), 그리고 CGSR(Clusterhead Gateway Switching Routing) 등의 프로토콜들이 있다. 이러한 테이블 관리 방식 프로토콜들은 항상 최신의 경로 정보를 유지하고 있기 때문에 트래픽 발생 시 경로 탐색의 지연 없이 통신이 가능한 반면에 경로 정보의 관리를 위한 제어 메시지의 브로드캐스팅 오버헤드가 너무 크다는 단점이 있다. 따라서 테이블 관리 방식의 라우팅 프로토콜에서는 제어 메시지의 양을 최소화하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

요구 기반 방식은 트래픽이 발생하는 시점에서 경로를 탐색하는 방식으로 테이블 관리 방식이 가지는 제어 메시지 오버헤드 문제를 해결한다. 앞에서 언급한 AODV 또는 DSR 등의 프로토콜이 여기에 속한다. 이러한 요구 기반 방식의 라우팅 프로토콜에서는 초기 경로 탐색에 따른 지연이 발생하므로 최적의 경로 탐색과 더불어 경로 탐색 지연 시간을 최소화하는 데 초점이 맞추어져 있다.

#### 나. Multicasting

상기 언급한 이동 Ad Hoc 네트워크의 유동적인 토폴로지는 멀티캐스팅 프로토콜에도 영향을 미친다.

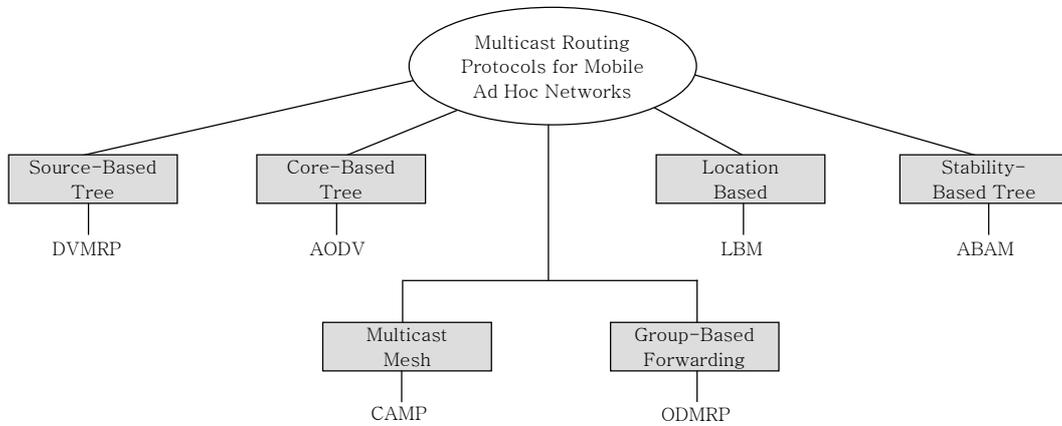
기존의 인터넷 등에서 사용되는 Mbone(IP Multicast backbone on the Internet) 기반의 DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) 또는 MOSPF(Multicast Open Shortest Path First)와 같은 멀티캐스트 프로토콜들은 모든 멀티캐스트 그룹에 “Source-Based Shortest Path Spanning Tree”를 만들어 브로드캐스팅하는 방법을 사용하는데 이는 노드의 빠른 이동성을 감지할 방법이 없고 제어 메시지에 따른 오버헤드가 크다. 또한, CBT (Core Based Trees) 또는 PIM-DM(Protocol Independent Multicast Sparse Mode) 등의 “Single Shared Tree” 형태의 멀티캐스트 프로토콜은 제어 메시지의 오버헤드는 적으나 최적의 경로를 찾기가 어려운 근본적인 문제가 있어 이동 Ad Hoc 네트워크에 적용이 어렵다[2].

이동 Ad Hoc 네트워크에서의 멀티캐스트 프로토콜은 네트워크의 이동성을 고려하여 요구기반 방식을 사용하고, 이동 노드가 멀티캐스트 그룹에 “Join/Leave” 동작에 의해 수시로 참여하거나 떠날 수 있도록 하며, 중간 노드를 경유하여 멀티캐스트 그룹의 멤버에게 멀티캐스팅 패킷을 전달할 수 있는 Multicast Delivery 구조를 갖는다.

이동 Ad Hoc 멀티캐스팅 프로토콜은 (그림 4)와 같이 분류된다. Flooding은 멀티캐스트 패킷이 전체 네트워크의 모든 노드에게 브로드캐스팅되는 것으로 가장 간단하고 이동성 적응에는 좋으나 모든 패킷이 전체 네트워크에 전파됨으로써 오버헤드가 많고 중복 데이터의 발생으로 대역폭을 낭비하며 네트워크의 부하를 유발한다.

SBT(Source-Based Multicast Tree)는 각각의 멀티캐스트 그룹에 멀티캐스트 소스 노드를 선출하여 각각의 멀티캐스트 그룹 멤버에게 멀티캐스트 소스를 통해 패킷을 전달하는 방법이다. 앞에서 언급한 DVMRP 또는 MOSPF, PIM 형태의 변형된 프로토콜이 여기에 속한다.

CBT는 전체 멀티캐스트 그룹 멤버에게 하나의 공유된 소스 노드를 선출하는 방식으로 하나의 노드에 모든 정보가 집중됨으로 인한 congestion 문제



(그림 4) 멀티캐스트 라우팅 프로토콜의 분류

와 최적의 경로가 선정되지 않는 문제를 갖는다. AODV 또는 CBT 등의 프로토콜이 여기에 속한다.

Multicast Mesh는 하나의 노드에 트래픽이 집중되는 트리 구조 대신에 멀티캐스트 그룹 멤버들간의 다중 접속을 허용하는 방식으로 CAMP(Core Assisted Mesh Protocol)가 여기에 속한다.

Group-Based Multicast Forwarding 방식은 각각의 멀티캐스트 그룹을 위해 다수의 멀티캐스트 포워딩 그룹을 두어 멀티캐스트 패킷이 멀티캐스트 포워딩 그룹을 통해서만 전달될 수 있는 방식으로 ODMRP(On Demand Multicasting Routing Protocol) 등이 있다.

Stability-Based Tree는 이웃 노드와의 Association Stability를 측정하여 “Source Based Shared Tree”를 구성하는 방식으로 ABAM(Associativity-Based Ad Hoc Multicast) 프로토콜이 여기에 속한다.

Location Based 방식은 GPS 수신기를 사용하여 멀티캐스트 영역과 포워딩 영역을 결정하여 멀티캐스트 패킷을 전달하는 방식으로 LBM(Location Based Multicast) 프로토콜이 있다.

#### 다. Radio Technology

이동 Ad Hoc 네트워크를 구성하는 데 있어 물리적 접속 규격인 무선 기술은 노드간의 peer-to-peer 통신을 지원하며 노드간에 동일한 송·수신 주

파수를 사용하고, 다수의 노드가 동일한 채널을 공유하며 적절한 무선 전송거리 및 전송속도를 유지하도록 요구된다. 또한 무엇보다 Ad Hoc 네트워크의 구성 및 유지가 용이하여야 한다[9].

이와 같은 요구사항을 완벽하게 만족하는 이동 Ad Hoc 네트워크용 무선 접속 기술은 현재로서는 존재하지 않는다. 다만 상용 무선 기술 표준인 하이퍼랜(HiperLAN)과 무선랜(Wireless LAN), 블루투스가 전송거리 및 속도와 연결 설정이 다른 무선 접속 기술에 비해 유리하기 때문에 이동 Ad Hoc 네트워크의 구성에 적용이 가능하고 현재 많이 사용되고 있다. 그러나 이들 상용 무선 접속 기술들을 다중 홉 이동 Ad Hoc 네트워크에 적용할 경우 여러 가지 문제점이 존재한다. 특히 다중 접속으로 인한 전파 장애와 2.4GHz 대역에서의 상호 간섭 문제, 사용자간 채널 사용에 있어서의 불평등 문제 및 TCP 불안정 문제 등이 많이 거론된다. 따라서 이들 기술들이 적용이 용이함에 비해 최적의 해결책이 될 수가 없다. 또한 서로 다른 표준을 가진 다중 접속 방식간의 상호 간섭과 네트워크 용량 증대, 노드의 타입 및 전력 상황을 고려한 전력 제어 기법 개발이 현실적으로 물리 계층에서 가장 필요한 연구 대상이 된다.

#### 라. Media Access

이동 Ad Hoc 네트워크는 다수의 사용자가 무선

링크를 통해 하나의 채널을 공유하므로 채널의 충돌과 낭비가 없는 효율적인 다중 접속 기법(collision avoidance & congestion control)과 다수의 노드들에 대한 공평한 자원의 분배(fairness), 열악한 무선 링크상에서의 신뢰성 있는 패킷 전송(reliability)이 해결되어야 한다.

또한, 다수의 노드가 동일한 채널을 공유하기 위한 다중 접속 기법 중의 하나인 CSMA(Carrier Sense Multiple Access)를 사용하는 MAC 프로토콜에서는 장애물이나 신호 감쇠에 의한 Hidden-Terminal 문제와 상호 간섭에 의한 Exposed-Terminal 문제가 대두된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 RTS/CTS(Ready To Send/Clear To Send)를 사용하는 MACA(Medium Access Collision Avoidance), MACA를 optional control frame을 사용하여 개량한 MACAW(MACA with Acknowledgement), non-persistent carrier sensing과 RTS/CTS를 함께 사용하는 FAMA(Floor Acquisition Multiple Access), carrier sensing과 RTS/CTS를 지원하는 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)의 802.11 MAC DCF(Distributed Control Function), 그리고 RTS/CTS-based MAC 프로토콜인 DBTMA(Dual Busy Tone Multiple Access) 등의 프로토콜들이 현재 많이 연구되고 있다.

#### 마. Energy Efficiency

이동 Ad Hoc 네트워크를 구성하는 대부분의 노드는 이동성을 지원하기 위해 제한된 용량의 배터리를 에너지원으로 사용한다. 물론 경우에 따라서 이동 노드가 차량에 탑재되어 일시적으로 안정된 에너지 공급이 가능하거나, 또는 고정된 형태의 장치로서 지속적인 에너지 공급이 가능할 수도 있다. 그러나 일반적으로 노트북 PC나 PDA(Personal Digital Assistant) 또는 센서를 가진 이동 장치 형태를 예상할 수 있는 이동 노드로서는 안정된 에너지의 공급이 어렵고, 이와 같은 에너지의 제약은 라우팅 프

로토콜 설계에도 큰 영향을 준다. 예를 들어, 현재 에너지 수준이 낮은 노드가 많은 트래픽을 라우팅하게 되면 해당 노드의 배터리 잔량이 점점 작아져서 끝내는 이 노드를 경유하는 모든 경로들을 사용할 수 없게 된다. 따라서, 노드들의 에너지 상태를 고려하여 경로를 선택해야 안정적인 데이터 전송이 가능하다. 또한, 이러한 에너지 제약은 링크의 단방향 전송 상태를 발생시키기도 한다. 에너지가 많은 노드의 무선 전송 거리가 에너지가 적은 노드의 무선 전송 거리보다 멀기 때문에 에너지가 많은 노드에서 적은 노드로의 전송은 가능하나 반대인 경우는 불가능할 수도 있다. 따라서 효율적인 에너지 사용 또는 에너지를 절약할 수 있는 메커니즘 등이 영구적인 배터리의 개발 등의 근본적인 문제와 맞물려서 고려되어야 한다.

#### 바. TCP Performance

이동 Ad Hoc 네트워크가 IP 기반 프로토콜 위에서 운용된다고 할 때 대부분의 IP 애플리케이션들은 TCP 상에서 수행된다. 이동 Ad Hoc 네트워크에서는 토폴로지의 동적인 변화로 인하여 트래픽의 지연이나 유실이 유선 네트워크에 비해 크기 때문에 일반 유선 네트워크에 사용되는 TCP를 이동 Ad Hoc 네트워크에 사용할 경우 서비스의 안정적인 제공 및 네트워크 전체의 성능이 저하된다. 특히 무선 링크에서의 높은 BER(Bit Error Rate)과 이동에 따른 잦은 연결 절단(disconnection) 및 핸드오프는 연결 기반 TCP 패킷의 손실과 재전송을 유발하여 네트워크의 부하를 일으키고 TCP의 성능을 떨어뜨린다. 이를 해결하기 위한 방법으로서 I-TCP(Indirect-TCP), Fast Retransmit, TCP Snoop 그리고 M-TCP 등의 wireless TCP를 이용하여 TCP를 개선하는 방법이 많이 연구되고 있으며 무엇보다도 TCP 성능에 영향을 주는 링크 계층의 안정화와 좋은 라우팅 프로토콜의 개발이 선행되어야 한다.

#### 사. Security & Privacy

보안 문제는 일반 유선 네트워크에서도 존재하고

있지만, 이동 Ad Hoc 네트워크는 무선 인터페이스를 사용하기 때문에 유선 네트워크에 비해 훨씬 더 많은 위험에 노출되어 있다. 기본적으로는 Ad Hoc 네트워크의 보안 요구조건은 다른 통신 네트워크에서 요구되는 것과 동일하다. 그러나 이동 Ad Hoc 네트워크에서는 노드의 신분이 서로에게 불확실한 경우가 많으며 멀티 홉 방식에 의해 라우팅을 할 경우 악의적인 중간 노드에 의해 발생될 수 있는 데이터의 무결성 및 기밀성 문제가 존재한다. 특히 매체를 신뢰할 수 없는 상황에서 암호를 사용하므로 암호 키에 크게 의존하게 된다. 따라서 키 사이에 신뢰할 수 있는 관계를 형성하고, 이를 이동 Ad Hoc 네트워크 전반에 분배하는 것이 주요 과제가 된다. 한편으로, 보안 문제가 확실하게 해결되다 보면 컴퓨팅 문제가 발생되어 노드와 네트워크 전체에 심각한 부하를 주게 되므로, 이러한 trade-off를 고려한 이동 Ad Hoc 네트워크에 적합한 알고리즘, 키 분배 및 인증 프로토콜 개발이 현실적으로 가장 필요하다.

#### 아. QoS

이동 Ad Hoc 네트워크에서의 QoS는 기존의 이동통신망이나 무선랜 등과 같은 무선 기술을 기반으로 하는 네트워크 환경과 크게 다를 바 없다. 오히려 노드들만의 분산 운영과 시간 흐름에 따른 에너지 부족이나 유동적인 토폴로지의 변화에 따른 경로 유지 등으로 인해 네트워크의 성능이 떨어지게 되어 그 이상의 QoS 보장도 어렵다. 현재로는 이동 Ad Hoc 네트워크의 기반이 되는 무선 접속 기술과 다중 접속에서의 QoS 메커니즘에 초점이 맞추어져 진행되고 있다.

지금까지 언급한 요소 기술 이외에도 다중 무선 인터페이스를 가진 이동 노드의 경로 설정, 로밍 및 위치 등록, 노드들간의 어드레싱 방법, 서비스 제공자 위치 확인 및 제공 방법, 혼합 다중홉 네트워크간 핸드오프, 노드의 타입 및 전원 에너지 상태에 적합한 토폴로지 구성, 단방향 링크 설정 등을 위한 이동성 대응 기법 등도 이동 Ad Hoc 네트워크에서의 주요 연구 대상에 포함된다.

## 4. 주요 응용 분야

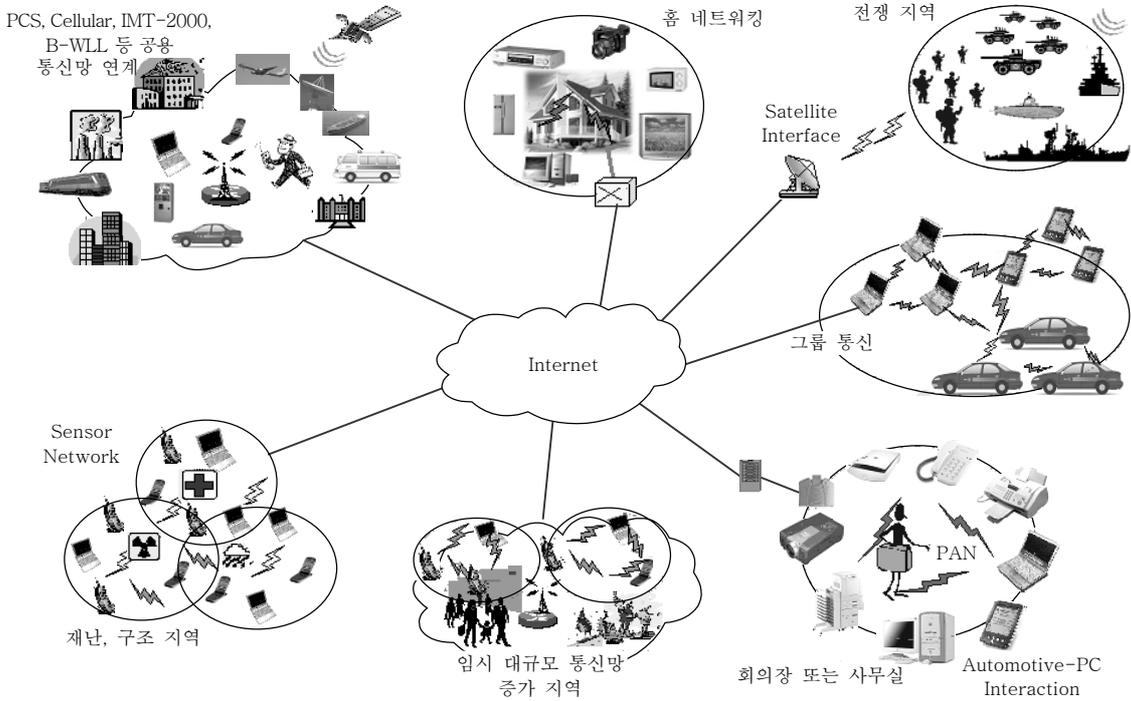
이동 Ad Hoc 네트워크는 그 특성상 재해 및 재난 지역 또는 전쟁터 등의 기반 통신시설이 갖추어져 있지 않거나 설치가 용이하지 않은 지역 또는 시설의 이용이 불가능한 상황에 적합한 것으로 인식되어 주로 군사용이나 긴급 구조, 센서 네트워크 또는 백업용 네트워크로서 진행되어 왔다. 그러나 최근에는 회의장 또는 전시장에서 개인들간의 신속한 정보 공유나 교환 또는 일시적인 망의 구성이 필요할 때, 그룹통신, WPAN, 홈 네트워크 등 실생활에서의 이동 Ad Hoc 네트워크 응용이 많이 연구되고 있다. 이를 종합적으로 나타내면 (그림 5)와 같다. 한편으로, 기존의 인터넷이나 무선랜과 같은 기반망에서의 서비스와는 차별화되는 이동 Ad Hoc 네트워크만의 응용(killer application)의 발굴이 절실히 요구된다.

## 5. Ad Hoc 네트워크와 기존 망과의 연동

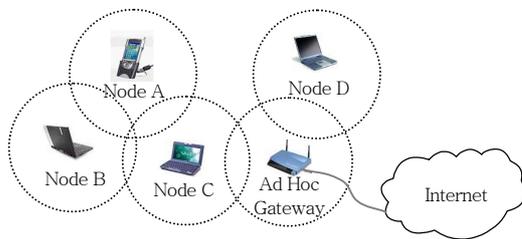
이동 Ad Hoc 네트워크는 독자적이고 즉흥적인 네트워크의 구성이 요구되는 반면에 이동 노드간 상호 통신에 의존하는 서비스의 제한이 있게 된다. 특히, 인터넷 서비스가 요구되거나 재난 구조 및 센서 네트워크로 동작할 때는 상호 수집된 자료나 멀티 홉에 의해 전달된 데이터를 기존의 유무선 네트워크에 연결된 중앙컴퓨터로 보내거나 지시를 받게 되는 요구가 있게 된다. 따라서 이동 Ad Hoc 네트워크와 기존의 인터넷, 무선랜 또는 이동 통신 망과의 상호 연동도 활발히 연구되고 있다. 이와 더불어 IP 이동성을 위한 이동 IP의 지원이나 IPv6 망으로의 전환도 요구된다.

#### 가. 인터넷 또는 무선랜과의 연동

상기에서 언급한 인터넷과의 연동은 (그림 6)과 같이 이동 Ad Hoc 네트워크와 인터넷과의 경계면에 이동 Ad Hoc 라우팅 프로토콜을 가지면서 인터넷 라우터와 연결되는 Ad Hoc 게이트웨이를 두어 실현할 수 있다.



(그림 5) 이동 Ad Hoc 네트워크 응용



(그림 6) 인터넷과의 연동

Ad Hoc 게이트웨이와 이동 Ad Hoc 노드간의 인터페이스는 이동 Ad Hoc 노드와 동일한 무선 인터페이스를 가지며, Ad Hoc 게이트웨이와 유선 인터넷 라우터간의 인터페이스는 이더넷 인터페이스 등을 따른다. Ad Hoc 게이트웨이가 인터넷 라우팅 기능을 가진 일체형의 장비인 경우, 인터넷 라우터와 동일한 라우팅 프로토콜을 부가적으로 탑재한다.

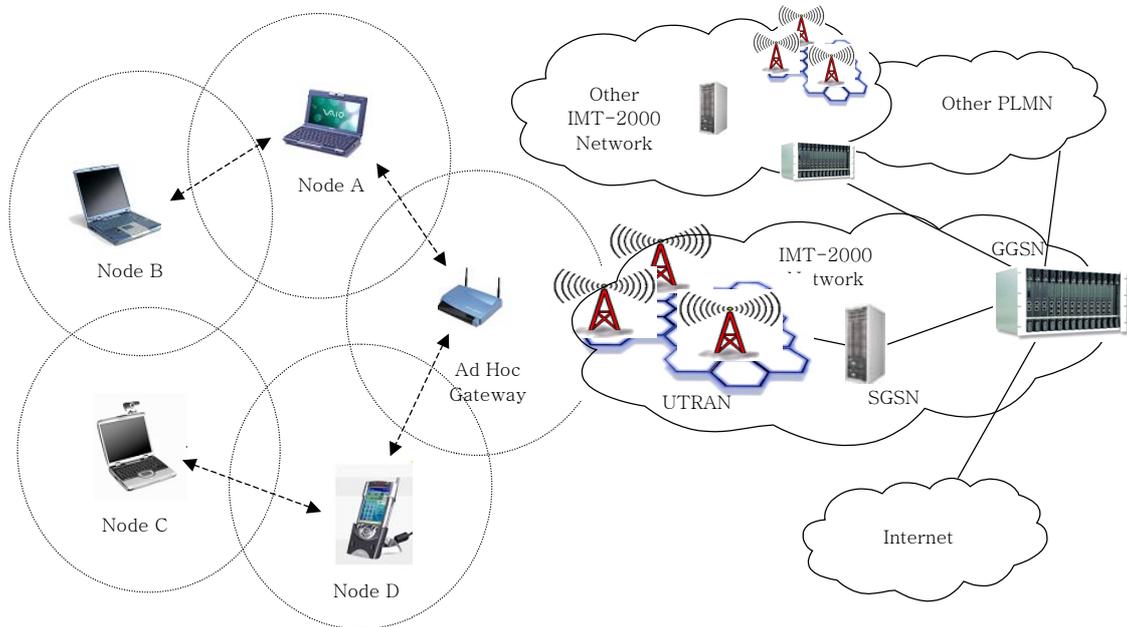
한편, 이동 Ad Hoc 네트워크와 무선랜과의 연동에도 Ad Hoc 게이트웨이의 응용이 가능한데, Ad Hoc 게이트웨이와 무선랜의 AP간에 무선랜 인터페이스 규격을 따르거나 Ad Hoc 게이트웨이와 AP의

일체형 구성도 가능하다.

#### 나. 이동통신망과의 연동

Ad Hoc 네트워크 개념을 이동통신 셀룰러망에 적용하고자 하는 연구가 다수 진행되어 오고 있으며 그 중에 대표적인 것으로 iCAR[10]와 A-GSM[11], Multihop Cellular Network(MCN)[12]이 있다. iCAR(an integrated Cellular and Ad-hoc Relay)는 밀집지역(hot spot)의 셀의 과부하를 로드 밸런싱으로 풀기 위해 ARS(Ad-hoc Relay Station)라는 제 3의 중계 노드(relay node)를 제안하고 있다. ARS는 망 사업자에 의해 필요한 곳에 놓여 기지국과 단말 사이의 통신을 중계하는 역할을 하게 된다. ARS는 혼잡한 지역의 트래픽 분산을 위해 사용될 뿐만 아니라 통신 영역의 확장을 위해 사용될 수 있다.

A-GSM(Ad hoc GSM)은 GSM과 Ad Hoc 프로토콜 스택을 모두 가진 듀얼 모드 GSM 단말기를 이용하여 다중 홉 접속에 의한 relaying 기능으로 음영지역이나 망 또는 링크 단절에 대한 GSM의 통화



(그림 7) IMT-2000 망과의 연동

영역을 넓히고자 한다.

MCN은 배타적으로 멀리 떨어져 있는 기지국에 접속하기 위하여 브리징 프로토콜을 추가한 이동 단말기를 통해 다중 홉 통신을 함으로써 기지국의 수와 단말 또는 기지국의 송신 범위를 줄이고자 한다.

한편으로, 상기 인터넷과의 연동에서 고려하였던 Ad Hoc 게이트웨이에 IMT-2000 무선 모듈을 장착하여 (그림 7)과 같은 IMT-2000 이동통신망과의 연동을 고려해 볼 수 있다. 물론 기존의 셀룰러나 PCS 등과 같은 이동 통신망과의 상호 연동도 가능하다.

#### 다. IP Mobility

이동 Ad Hoc 네트워크가 기존의 IP 기반에서 동작하는 경우 IP 이동성 문제가 발생한다. 특히, 이동 노드가 움직여서 다른 지역으로 이동하였을 때, 이동 노드가 처음에 위치하던 서브넷이 달라지면서 통신이 불가능해지므로 새로운 위치에서 IP 주소를 새로 획득하거나 사용자가 새로 설정해 주어야 한다. 이러한 IP 이동성 문제를 해결하기 위하여 IETF에

서 제안된 것이 이동 IP이다. 이동 IP는 서브넷이 달라지는 다른 위치에서도 자신의 고유 IP 주소를 가지고 서비스를 지속하기 위하여 변경된 위치에서의 IP 주소 식별과 해당 접속점으로서의 라우팅을 위한 메커니즘을 가진다. 그러나 기존의 이동 IP 규격은 이동 노드와 외부 에이전트(Foreign Agent, 이하 FA)가 직접적인 연결을 갖는 싱글 홉 통신을 전제로 하므로 이동 Ad Hoc 네트워크에서의 다중 홉 통신에 그대로 적용하기가 어렵다. 이에 대한 대표적인 연구로는 MIPMANET[13]이나 Mobile IP/AODV[14],[15] 등이 있다. MIPMANET은 이동 Ad Hoc 네트워크와 기존의 IP 망간에 FA를 두어 다중홉 통신과 인터넷 접속을 가능토록 하고, 계층간 상호 독립적인 네트워크를 구성한다. Mobile IP/AODV는 에이전트 발견 절차와 등록 절차와 같은 기존의 이동 IP 절차를 수행하면서 요구 기반 방식의 Ad Hoc 라우팅 프로토콜에 의한 다중 홉 라우팅을 수행한다.

또한 최근에는 IPv6와 MIPv6를 적용하여 IPv6 망과 연동하면서 IP 이동성을 부여하는 방안이 꾸준히 논의되고 있다.

### III. 연구 및 개발 동향

#### 1. 주요 그룹 연구활동

##### 가. GloMo Project

이동 Ad Hoc 네트워크 연구는 1973년부터 시작된 미국 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)[16]의 PRNet(Packet Radio Network)에서 군사목적의 통신 시스템 개발을 위해 처음 시작되었다. 이 연구는 주로 매체 접속 및 다중 접속 제어와 노드의 이동성 대응 등이 중점적으로 연구되었으며 에러 및 흐름 제어, 라우팅에 이르기까지 다양한 기반 기술의 연구가 진행되었다. DARPA에서 진행이 된 군사 통신용 프로젝트는 SURAN(Survivable Adaptive Networks)[17]을 거쳐 1994년부터 GloMo(Global Mobile)[18] 프로젝트로 이어지고 있다.

GloMo 프로젝트는 산·학·연의 다양한 연구조직을 활용하여 군사 목적의 이동 정보 시스템의 활용과 광범위한 군사적 기술과 상업적 기술의 공존을 목표로 한다. 또한, 군 통신망에서 신속 전개, 제한적이고 선택적인 접근 허용, 동적 대역 할당과 약조건에서의 최대 정보 전송률, 보안과 생존을 위한 고도의 동적이며 진보된 서비스를 요구한다. 이러한 목표와 요구 사항에 따라 GloMo 프로젝트는 무선망 구축에서부터 프로토콜, 알고리즘 개발, 저비용과 저전력의 고성능 이동 노드의 개발, 이질망간의 연동, 그리고 개발 환경 및 툴의 설계에 이르기까지 다양한 영역에서 연구를 진행하고 있다.

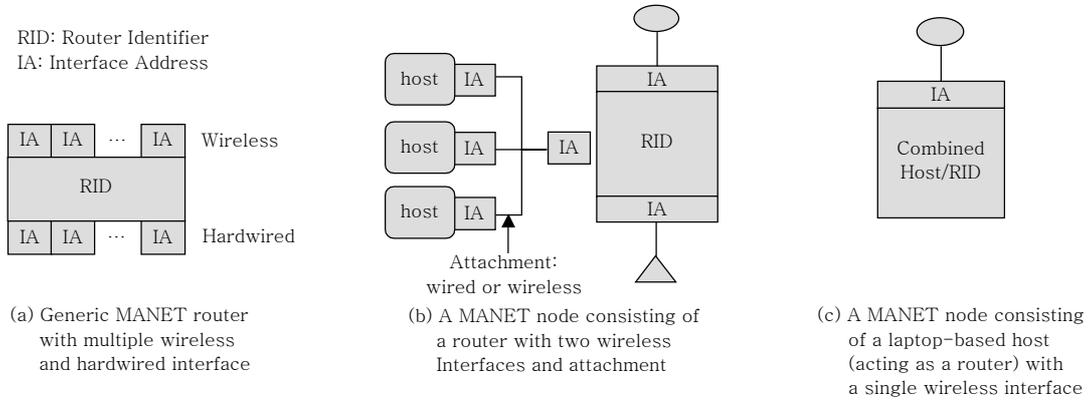
##### 나. IETF MANET

MANET(Mobile Ad hoc Network)[19] 표준화 그룹은 공인된 IETF(Internet Engineering Task Force) 표준화 워킹 그룹으로서 이동 Ad Hoc 네트워크에서의 IP 지원 및 효과적인 라우팅 지원 방안을 표준화하고 있다. MANET WG에서 정의하는 MANET[3]은 이동 노드로만 이루어진 자율적인(autonomous) 시스템으로 독립적(isolation)으로 운

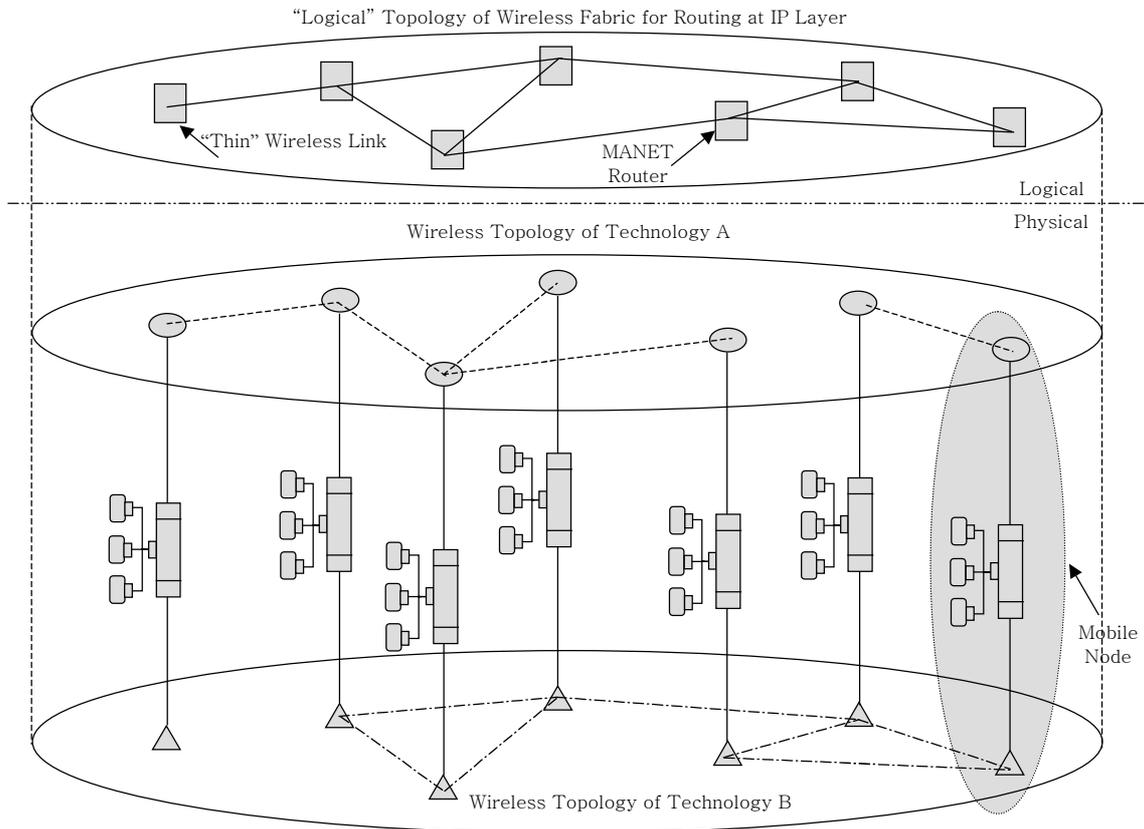
영이 가능하고 고정망과의 인터페이스 또는 고정망으로 연결되는 게이트웨이를 가질 수 있다. MANET의 이동 노드는 논리적으로 하나의 라우터와 하나 이상의 호스트 그리고 하나 이상의 무선 인터페이스 장치(wireless communication devices)를 갖는(그림 8)과 같은 형태의 구조를 가진다. (그림 8)의 (a)는 다수의 무선 인터페이스와 하드웨어 인터페이스를 가지는 일반적인 MANET 라우터를 나타낸다. 이 라우터는 고유의 식별자인 RID(Router Identifier)를 가지며, 각각의 인터페이스 또한 고유의 인터페이스 식별자를 가진다. (b)는 두 개의 무선 인터페이스를 가진 라우터와 다수의 호스트가 연결된 MANET 노드를 나타낸다. (c)는 하나의 무선 인터페이스를 가지고 호스트와 라우터 기능이 통합된 MANET 노드로서 일반적인 노트북 PC(laptop-based host) 형상이다. (그림 9)는 이러한 MANET 노드로 구성된 MANET의 네트워크 토폴로지를 나타낸다. 한편, MANET WG의 장기(long-term)적인 목표는 멀티캐스팅과 QoS 확장이며, 단기(near-term)적인 목표는 기존의 비연결형 IP 서비스를 지원하며 효과적인 라우팅을 유지하면서 토폴로지의 변화와 트래픽 요구에 능률적으로 대응하고 상·하위 계층과의 상호 작용 및 인터페이스, 주소 매핑 및 보안을 제공하는 관련 네트워크 계층 위에서 동작하는 하나 이상의 인트라 도메인 유니캐스트 라우팅 프로토콜을 표준화하는 것이다. 현재 다수의 라우팅 프로토콜이 인터넷 드래프트로 기고되어 있다.

##### 다. NIST WCTG

NIST(National Institute of Standards and Technology)는 다양한 무선 접속기술 및 엔지니어링 과학(engineering sciences)을 연구하는 미국 상무부 기술관리국(U.S. Commerce Department's Technology Administration) 소속 연구기관이다. 이 NIST 산하의 WCTG(Wireless Communications Technologies Group)[20]에서 Ad Hoc 네트워크와 관련한 활동을 하고 있다. WCTG의 역할과 활동은 크게 두 가지로 나누어질 수 있다. 첫째는



(그림 8) MANET 노드의 구조



(그림 9) 무선 MANET 토폴로지

DARPA GloMo 프로젝트에 의해 개발된 SEAMLSS 네트워크 모델링과 시뮬레이션 툴의 verification/validation이다. 두번째는 군사 시나리오에 맞도록 GloMo 프로젝트에서 개발되는 MANET 기술을 평가

하기 위한 방법론 개발과 MANET WG에서 제안된 라우팅 프로토콜의 구현이다. NIST 홈페이지[21]에 가면 AODV 및 DSR 등의 라우팅 알고리즘 관련 시뮬레이션 및 구현된 소스 코드를 구할 수 있다.

라. BAHAMA Project

BAHAMA(Broadband Ad Hoc ATM Anywhere)[22]는 미국의 AT&T Bell Lab에서 수행한 광대역 ATM 무선랜을 위한 프로젝트로서 백본망 또는 기지국이 없이도 이동 호스트 간의 통신이 가능한 ATM 기반의 광대역 무선랜을 구축한다.

마. WWRF

WWRF(Wireless World Research Forum) [23]는 3G 이후의 무선 통신의 비전을 위해 UMTS Forum, ETSI, IETF와 ITU 등의 협력 하에 “Wireless World”의 일관된 견해의 개발 및 유지를 위하여 2000년에 결성되었다. 워킹 그룹으로 WG1, WG2, WG3 그리고 WG4가 있는데, WG1, WG2 및 WG3는 “Wireless World”에 대한 전망과 서비스 구조 및 새로운 통신 환경을 다루고 WG4에서 Ad Hoc 네트워킹과 self-organizing multi-hop wireless systems 관련 연구를 진행하고 있다.

## 2. 관련 기술 표준화 그룹

가. 블루투스 표준 회의

블루투스[24]는 1998년 5개의 블루투스 SIG 멤버에 의해 규격의 개발이 시작되어 1999년 12월에 규격 블루투스 버전 1.0 스펙을 발표하고 현재 새로운 프로파일들을 추가로 정의하고 있다. 블루투스 SIG에는 에릭슨을 포함한 노키아, 모토로라, 도시바, IBM, 인텔, 루슨트, 3COM 등의 업체가 참여하고 있다.

나. IEEE 802.11 표준 회의

IEEE 802.11 WG[25]에서는 1997년 마무리된 IEEE 802.11을 기반으로 1999년에 정의된 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11b 표준 기술을 바탕으로 무선랜을 위한 물리 계층과 미디엄 계층을 정의하고 무선랜과 타 망간의 연동을 보장하기 위한 요소 기술들을 정의하고 있다. 현재 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11b를 비롯하여 IEEE 802.11c와 IEEE 802.

11d 까지 확정된 상태이며, QoS와 보안 그리고 액세스 포인트 상호 운용성 보장 등을 위한 관련 기술 표준화를 진행중이다. 이는 IEEE 802.11 산하의 TG (Tasking Group)에서 각 분야별로 진행된다. TG는 TGa, TGb, TGe, TGf, TGg, TGh 그리고 TGi로 구분되며 현재 TGe, TGg, 그리고 TGh 등이 표준화 마무리중이다.

다. ETSI BRAN

ETSI BRAN(Broadband Radio Access Network)[26]은 유럽 ETSI를 중심으로 일본의 MMAC와 ATM Forum 등에서 주도하며 1991년 HiperLAN/1 규격을 정의하고, 5GHz 대역에서 최대 54Mbps까지 전송이 가능한 무선랜 규격인 HiperLAN/2 규격을 정의하였다. 물리계층과 데이터 링크 계층에 대하여 2000년 4월에 표준화가 완료되었고, Ethernet, IEEE 1394 및 UNI 등과의 인터페이스를 위한 convergence 계층의 규격 표준화를 완료하였으며 현재 convergence 시험 규격과 IEEE 1394 브리지를 위한 부계층의 규격을 진행중이다. 한편으로 현재 이동통신망과 HyperLAN/2의 연동 구조와 프로토콜을 정의하는 기술 규격의 표준화를 진행하고 있다.

라. WPAN(IEEE 802.15)

WPAN(Wireless Personal Area Network) [27]은 1997년 IEEE Portable Applications Standards Committee(PASC) Ad Hoc 그룹에서 처음 시작하여 1998년 3월에 IEEE 802.15 WG로 결성되었다. WPAN은 802.15.1, 802.15.2, 802.15.3 그리고 802.15.4의 그룹으로 나누어 2.4GHz ISM 대역에서 블루투스 및 이를 확장한 WPAN 규격 표준을 진행하고 있다.

## 3. 기타 그룹

앞 절에서 언급한 특정 프로젝트 단체나 표준화

그룹 이외에도 Cornell University[28]이나 Rice University[29] 또는 UCLA[30] 등의 많은 대학에서 연구활동이 이루어지고 있으며, 국내의 많은 대학에서도 이동 Ad Hoc 네트워크에 대한 연구를 진행하고 있거나 준비하고 있다.

#### IV. 결론

최근 몇 년 사이에 타고난 유연성으로 이동성 적응 및 네트워크 구성이 용이한 이동 Ad Hoc 네트워크에 대한 관심이 부쩍 증가하였다. 본 고에서는 이동 Ad Hoc 네트워크의 기술적 분석 및 연구 개발 동향을 살펴보았다. 서술한 주요 요소 기술들은 이동 Ad Hoc 네트워크의 특성을 반영하여 가장 먼저 해결해야 할 이슈들을 위주로 정리하였으나 그밖에도 많은 다른 문제들이 산적해 있다. 앞으로 이동 Ad Hoc 네트워크에 대한 관심이 증가하면서 아직까지 노출되지 않은 문제들이 계속 부각되고, 적용되는 응용 분야도 확대될 것으로 예상된다. 또한, 본 고에서 언급된 주요 연구 그룹들 이외에도 현재 활발한 연구를 진행중이거나 개발을 시도하고 있는 많은 연구 그룹들이 존재하고 있다.

한편, 현재까지는 이동 Ad Hoc 네트워크에 대한 연구가 알고리즘을 설계하고 분석하여 이를 모델링하고 시뮬레이션하는 수준으로 진행되고 있다. 따라서 실제 시스템을 구축하거나 응용 서비스를 개발하는 활동은 두드러지게 나타나지 않고 있다. 이는 대부분의 연구 개발이 본 고에서 기술한 바와 같이 군 관련 기관이나 학교 및 연구기관에서 주로 이루어지고 있는 데서 알 수 있다. 사용자 위주의 독립적인 네트워크를 구성하는 이동 Ad Hoc 네트워크의 특성상 사업자나 서비스 제공자가 나타나기 어렵고, 초고속의 안정된 서비스를 제공하는 기반 망과의 차별화가 현재로는 뚜렷이 나타나지 않고 있기 때문에 현재로는 몇몇 중소 업체들을 제외하고는 업체들의 참여가 두드러지지 않고 있다. 그러나 에너지원의 제약이나 분산 운영 등에 따른 이동 노드의 기능에 한계가 있고, 이러한 한계를 극복하고도 다른 여타 망들에서

제공하는 서비스를 능가하는 이동 Ad Hoc 네트워크만의 서비스 즉, Killer Application이 발굴되기 위해서는 업체들의 꾸준한 관심이 요구된다.

이동 Ad Hoc 네트워크는 개인 사용자 입장에서는 사용자간 상호 교환적인 통신 수단으로 사용되거나 동일인의 통신 기기간 원활한 통신 접속에 많이 활용될 것으로 보인다. 또한, 관리자 입장에서는 사무실이나 임시적인 회의장에서의 인프라 구축 비용을 절감하게 될 것이며, 사회적 관점으로 보면 기반망이 파괴되거나 시설이 불가능한 지역, 또는 사람의 근접이 어려운 지역에서의 정보 수집과 통신 수단으로 활용이 용이할 것으로 보인다. 따라서 꾸준한 관심과 연구 개발 노력이 필요하다.

#### 참고 문헌

- [1] Charles E. Perkins, Ad Hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.
- [2] C.K. Toh, Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems, Prentice Hall PTR, 2002.
- [3] M.S. Corson and J.P. Macker, "Mobile Ad hoc Networking(MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," IETF RFC 2501, Jan. 1999.
- [4] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, and Samir R. Das, "Ad Hoc On-demand Distance Vector(AODV) Routing," IETF Internet Draft: draft-ietf-manet-aodv-12.txt, Nov. 2002.
- [5] David B. Johnson et al., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft: draft-ietf-manet-dsr-07.txt, Feb. 2002.
- [6] Z.J. Haas and M.R. Pearlman, "The Zone Routing Protocol(ZRP) for Ad hoc Networks," Internet Draft: draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt, Nov. 1997.
- [7] Vincent D. Park and M. Scott Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," *Proc. of IEEE INFOCOM'97*, Apr. 1997, pp. 1405 - 1413.
- [8] C.C. Chiang, "Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel," *Proc. of IEEE SICOM'97*, Apr. 1997, pp. 197 - 211.
- [9] 신재욱, 권혜연, 남상우, 임선배, "이동 Ad Hoc 네트워크

- 실험을 위한 무선 접속 기술,” *Telecom. Review*, 제12권 3호, 2002, pp. 322 - 335.
- [10] Swades De et al., “Integrated Cellular and Ad Hoc Relay(iCAR) Systems: Pushing the Performance Limits of Conventional Wireless Networks,” *Proc. of IEEE HICSS’02*, Jan. 2002.
- [11] G.N. Aggelou and R. Tafazolli, “On the Relaying Capability of Next Generation GSM Cellular Networks,” *IEEE Personal Comm.*, Vol. 8, Feb. 2001, pp. 40 - 47.
- [12] Y.D. Lin and Y.C. Hsu, “Multihop Cellular: A New Architecture for Wireless Communications,” in *Proc. IEEE INFOCOM’00*, Mar. 2000, pp. 1273 - 1282.
- [13] U. Jonsson et al., “MIPMANET- Mobile IP for Mobile Ad Hoc Networks,” *Proc. of MobiHoc’00*, Jan. 2000.
- [14] Charles E. Perkins, “Mobile IP, Ad-Hoc Networking, and Nomadicity,” *Proc. of COMPSAC’96*, Aug. 1996, pp. 472 - 476.
- [15] Charles E. Perkins, “Mobile IP/AODV Cooperation,” Daedeok IT Forum, Oct. 2002.
- [16] DARPA, Available at <http://www.darpa.mil>
- [17] D.A. Beyer, “Accomplishments of the DARPA SURAN Program,” *MILCOM’90*, 1990, pp. 855 - 862.
- [18] Barry M. Leiner, Robert J. Ruth, and Ambatipudi R. Sastry, “Goals and Challenges of the DARPA GloMo Program,” *IEEE Personal Comm.*, Dec. 1996.
- [19] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [20] <http://w3.antd.nist.gov/wctg/>
- [21] <http://w3.antd.nist.gov/wctg/manet/index.html>
- [22] K.Y. Eng, M.J. Karol, M. Veeraraghavan, E. Ayanoglu, C.B. Woodworth, P. Pancha, and R.A. Valenzuela, “BAHAMA: a Broadband Ad-hoc Wireless ATM Local-area Network Communications,” ICC, Seattle, Vol. 2, 1995, pp. 1216 - 1223.
- [23] <http://www.wireless-world-research.org/>
- [24] <http://www.bluetooth.org/>
- [25] <http://ieee802.org/11>
- [26] <http://portal.etsi.org/bran/Summary.asp>
- [27] <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/index.html>
- [28] <http://wnl.ece.cornell.edu/>
- [29] <http://www.monarch.cs.rice.edu/>
- [30] <http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/>