

멀티 인터페이스 기반 무선 메쉬 네트워킹 기술 연구 동향

이성희 | 김민수 | 고영배
아주대학교

요약

무선 메쉬 네트워크(Wireless Mesh Network)는 무선으로 연결된 메쉬 라우터(Mesh Router)들 간에 멀티 홉 통신을 통해 다수의 사용자 단말에게 인터넷 접속 등의 서비스를 제공할 수 있는 망 기술로써, 네트워크 확장과 유지, 보수가 쉬운 장점이 있다. 무선 메쉬 네트워크를 통해 보다 많은 사용자와 트래픽을 처리하기 위해서는 네트워크의 용량(Capacity) 및 처리량(Throughput)을 높이는 것이 중요하며, 이를 위해 다수의 통신 인터페이스를 하나의 단말에 장비하는 멀티 인터페이스 기술이 각광받고 있다. 본 논문에서는 무선 메쉬 네트워크의 표준화 동향을 소개하고 멀티 인터페이스 기반 메쉬 네트워크 연구 활동 및 테스트 베드 구축 활동에 대해 요약한다.

1. 서론 (Introduction)

무선 메쉬 네트워크(Wireless Mesh Network)는 무선으로 연결된 메쉬 라우터(Mesh Router)들 간에 멀티 홉 통신을 통해 다수의 사용자 단말에게 인터넷 접속 등의 서비스를 제공할 수 있는 망 기술이다[1]. 무선 메쉬 네트워크 기술은 이동 애드 혹 네트워크 (Mobile Ad Hoc Network) 기술을 바

탕으로 하고 있으나 모든 단말이 동등한 자격으로 망을 구성하는 애드 혹 망과는 달리, 하부의 사용자 단말로 구성된 클라이언트 메쉬 계층(Client Mesh Layer)과 이들을 지원하기 위한 상부의 기간 메쉬 계층(Infrastructure Mesh Layer) 망으로 계층적인 구조를 취하고 있는 것이 특징이다. 이러한 메쉬 네트워크는 기지국 중심의 이동통신망이나 Hotspot 중심의 무선랜망과는 달리 메쉬 라우터간에 무선 멀티홉 통신을 통해 데이터를 전달하기 때문에 네트워크 확장이 용이하고 유지, 보수가 쉬운 장점이 있다.

그러나 네트워크 규모가 커지면 커질수록 상위 기간 메쉬 망에서 지원해야 하는 사용자의 수와 트래픽의 양이 기하급수적으로 증가하므로, 이를 해결하기 위해 네트워크의 용량(Capacity) 및 처리량(Throughput)을 높이는 연구가 매우 중요하다. 또한 하나의 무선 자원을 공유하여 사용하는 무선 통신의 특성상, 데이터의 송수신을 동시에 할 수 없으며 (Half-duplex), 한 단말이 통신을 하는 동안 주변에 위치한 다른 단말은 전송이 완료될 때까지 기다려야 한다. 따라서 데이터가 여러 홉을 거쳐 전달되는 경우 지연 시간이 증가하며 End-to-End 처리량이 감소하게 된다[2]. 더구나 망의 규모가 커질수록 중간에 거쳐야 하는 릴레이 홉의 길이가 길어지므로 이러한 문제가 더욱 심화된다. 따라서 메쉬 네트워크의 규모를 확대하고 성능을 보장하기 위해서는 이러한 문제가 해결되어야만 한다.

가장 간단한 해법으로는 단말의 전송률(data rate)을 높이

본 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (R01-2006-000-10556-0), 또한 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-C1090-0603-0015)

는 방법이 있을 수 있다. 하지만 전송률을 높이는 데에는 한계가 있으며, 높은 전송률을 지원하기 위해 장비의 비용이 증가하게 된다. 다른 방법으로는 하나의 단말에 다수의 통신 인터페이스를 장착하여 동시에 송/수신(Full-duplex)을 가능하게 하는 것이다.

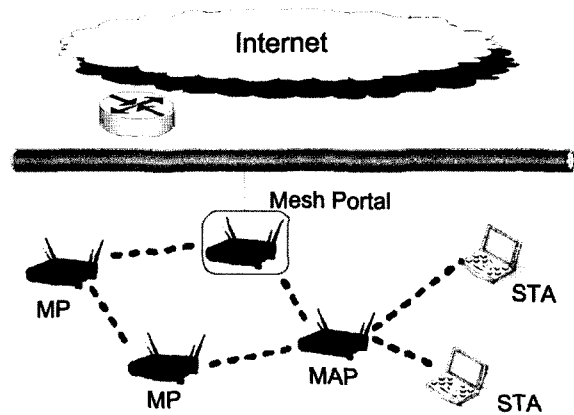
이러한 멀티 인터페이스 네트워킹을 활용하기 위해서는 물리 계층에서부터 네트워크 계층에 이르기까지 다양한 부분에서 구조의 변화가 요구된다. 특히 MAC 계층에서는 멀티 인터페이스 간에 효율적으로 채널을 할당하는 기법과 각각의 인터페이스를 효과적으로 관리하는 기법이 요구된다. 또한 네트워크 계층에서 라우팅을 수행할 때 MAC 계층의 멀티 인터페이스에 대한 정보를 고려할 필요성이 있다. 실제로 현재 진행중인 IEEE 802.11s 표준화[3]에서는 멀티 홉 라우팅 기능을 MAC 계층에 포함시키고 있다.

본 논문에서는 먼저, 무선랜 망에서 메쉬 네트워킹 기능을 도입하고자 표준화를 진행중인 IEEE 802.11s 표준화 활동에 대해 간략히 소개하고, 멀티 인터페이스 기반 메쉬 네트워킹을 위한 MAC 계층 연구 활동으로써 채널 할당 기법, 멀티 인터페이스 관리 기법에 대해 기술한다. 마지막으로 멀티 인터페이스를 사용한 메쉬 네트워크 테스트 베드 구축 동향에 대해 소개한다.

II. IEEE 802.11s 표준화 동향 (Standardization of the IEEE 802.11s)

IEEE 802.11s 표준은 기존의 802.11 무선랜 표준을 확장하여 무선 단말 간 멀티 홉 통신을 통한 중·소규모 메쉬 네트워크를 구성하는 것을 목표로 한다.¹⁾ (그림 1)은 802.11s WLAN Mesh 네트워크의 구조를 나타낸다. 그림에서, MP(Mesh Point)는 무선 멀티 홉 데이터 전달 기능이 탑재된 단말을 의미하는데 이들은 다른 망과의 연동을 위한 게이트웨이 기능이 탑재된 MPP(Mesh Portal)를 통해 인터넷에 연결된다. 반면, 기존의 802.11 무선랜 사용자 단말은 AP역할

을 수행하는 MAP(Mesh AP)를 통해 망에 접속한다. 이때 사용자 단말이 보낸 데이터는 MAP를 거쳐 MP간 무선 멀티 홉 데이터 전달을 통해 MPP에 전달되며 최종적으로 인터넷과 연결된다. 따라서 AP가 유선으로 기간망에 연결되는 기존의 WLAN 망에 비해, 무선으로 연결된 MP와 MAP 단말을 이용하여 네트워크 확장이 용이한 장점을 갖는다.



(그림 1) IEEE 802.11s 네트워크 구조

MP 단말들 간에 자율적인 네트워크 형성을 위해서는 통신 망을 구성하는 단말들 간에 사용 가능한 무선링크에 관한 충분한 정보를 가지고 있어야 한다. 이를 위해 각 MP 단말은 수동적 또는 능동적 탐색을 통해 이웃 단말을 찾는 Neighbor Discovery 과정을 수행한다. 수동적 탐색의 경우, 주변 MP 단말이 주기적으로 전송하는 Beacon 메시지를 통해 정보를 수집하는 반면, 능동적 탐색에서는 보다 적극적으로 Probe Request 메시지를 발송하고 임의의 주변 MP로부터 수신하는 Response 메시지를 통해 정보를 수집한다.

Beacon 혹은 Probe Response 메시지는 메쉬 네트워크를 논리적으로 구분하는 목적으로도 활용되는데 이는 이들 메시지에 포함되어 있는 메쉬 ID 정보를 통해 가능하다. 또한 논리적으로 동일한 메쉬 망에 속하는 MP 단말들이 통신을 하기 위해서는 같은 채널을 사용해야 하며 효율적인 채널 할당을 위하여 단순 채널 통합 프로토콜(Simple Channel

01_ 본 논문은 2007년 3월에 발표된 1.02 드래프트에 기반을 두고 작성되었음.

Unification Protocol) 및 채널 변경 프로토콜(Channel Graph Switch Protocol) 이 정의된다.

IEEE 802.11s 표준 그룹에서는 무선 MP 들간의 효율적인 멀티 홉 패킷 전달을 위해 HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)라고 불리는 L2 경로 설정 (Layer-2 Path Selection) 기법을 정의하고 있다. HWMP는 경로 설정시 각 MP 단말들의 MAC 주소를 사용하며, 루트 단말을 중심으로 한 트리 형태의 Proactive 경로 설정 기법을 기본으로 하되 보완적으로, 이동 애드혹 네트워크를 위한 On-Demand 방식의 라우팅 기법으로 잘 알려진 기존 AODV 프로토콜 방식을 결합한 일종의 하이브리드 경로 설정 기법이다. 그밖에 현재 논의되고 있는 IEEE 802.11s 표준안에는 네트워크 성능 향상 및 QoS 지원 강화를 위해 이미 802.11e에 정의된 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 프로토콜을 기본적인 MAC 알고리즘으로 가정하고 있으며, 추가적으로 홉 간 혼잡 제어(Congestion Control) 기법을 제시하고 있다. 또한 MP 단말 간의 계층적 메쉬 보안 기법을 제공한다.

2007년 4월 현재 표준안의 중요한 기능은 대부분 정의된 상태이며, 세부 조율을 거쳐 2008년 후반이나 2009년 초 표준화 제정이 이루어 질것으로 전망된다.

III. 멀티 인터페이스 기반 메쉬 네트워킹 (Mesh Networking with Multi-Interfaces)

메쉬 네트워킹을 구성하는 단말들이 하나 이상의 무선 인터페이스를 탑재하고 이들을 효율적으로 활용할 수 있다면 단말 간 처리량 증대 및 다중 경로를 통한 전송의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 네트워크의 규모가 커지더라도 전송 성능을 보장해 줄 수 있는 확장성을 가지게 될 것이다.

본 장에서는 이러한 멀티 인터페이스를 지원하기 위한 MAC 계층에서의 멀티 채널 할당 기법, 멀티 인터페이스 관리 기법에 대해 기술하고, 현재 진행되고 있는 멀티 인터페이스 기반 무선 메쉬 네트워킹의 테스트 베드 구축 사례에 대해 소개하겠다.

1. 멀티 채널 할당 (Multi-Channel Assignment)

멀티 인터페이스 무선 메쉬 네트워킹에 참여하는 각 노드들은 하나 이상의 인터페이스를 장착하고 있다고 가정한다. 이 모든 인터페이스들에, 한정된 자원인 채널들을 효율적으로 할당하는 문제를 채널 할당 문제라고 한다.

멀티 인터페이스에서의 채널 할당의 목적은 한정된 대역폭 내의 채널들을 사용해 네트워크에 참여하는 노드간의 연결성을 극대화 하는 동시에 동일 채널 간섭(Co-channel interference)과 인접 채널 간섭(Adjacent channel interference)을 최대한 줄이는 것이다. 현재의 IEEE 802.11b/g 표준은 동시에 사용할 수 있는 3개의 간섭 없는 채널(non-overlapping channel)을 그리고 IEEE 802.11a 표준은 12개의 간섭 없는 채널을 제공하고 있다[4]. 따라서 각 단말이 이러한 멀티 채널을 적절하게 나누어 사용한다면 대역폭 효율을 상당히 높일 수 있게 된다.

무선 메쉬 네트워크에서 멀티 채널을 활용하기 위해 다음과 같은 두 가지 방법이 가능하다. 첫째는, 단일 인터페이스, 멀티채널 (Single-Interface, Multi-Channel) 방식으로 채널간 스위칭 기법을 통해 제한적으로 멀티 채널을 활용할 수 있다[5, 6, 7]. 이 방식은 간편하지만 정교한 채널 동기화 과정이 필요하고, 채널 스위칭을 하기 위한 지연시간 (현재 상용 NIC에서는 milli-seconds단위의 지연시간이 요구됨) 및 오버헤드가 발생한다는 문제점이 있다. 또한 동일한 채널 사용을 가정하는 기존 IEEE 802.11 표준에 대한 수정이 필요한 단점이 있다. 둘째 방식은 멀티 인터페이스, 멀티채널 (Multi-Interface, Multi-Channel) 할당 방식이다[8, 9, 10]. 각각의 인터페이스에 서로 다른 채널을 할당하는 방식으로 다시 토폴로지 기반 채널 할당 기법, 트래픽 반영 채널 할당 기법, 그리고 분산 채널 할당 기법의 세가지로 분류된다.

① 토폴로지 기반 채널 할당 기법 (Topology-based Channel Assignment Methods)

토폴로지 기반 채널 할당 기법은 네트워크에 참여하는 모든 노드의 인터페이스들에 최적의 채널을 할당하여, 채널 간 간섭을 최소화 하는 동시에 연결성이 보장되는 네트워크 토폴로지를 형성하는 것이 목적이다. 여기서 채널 할당 기법을 평가할 수 있는 척도는 노드간 연결성과 간섭 정도이다. 이 두 가지 척도는 서로 대비되는 특성을 가지는데, 즉

연결성을 높이기 위해 네트워크 전체에서 사용하는 채널의 개수를 최소화 하게 되면 노드 간 간섭 정도가 증가하게 되고, 반대로 간섭을 최소화 하기 위해 최대한 많은 채널을 사용하게 되면 노드 간 연결성이 감소하게 된다. 따라서 간섭 정도의 최소화 와 노드간 충분한 연결성 보장이라는 두가지 목표 사이에 적절한 균형을 유지할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서, 무선 메쉬 네트워크에서의 채널 할당 문제는 토폴로지 제어 문제라고도 볼 수 있다.

초기 채널 할당은 채널 스위칭 지연 시간에 따라서 동작 방식이 달라질 수 있다. 먼저, 현재의 802.11 하드웨어와 같이 채널 스위칭 지연 시간이 긴 경우에는 초기의 채널 할당에 의해 설정된 채널이 계속 사용 되며, 또는 경우에 따라서 적응적 라우팅[11], 다중경로 라우팅[12]을 사용하는 형태로 동적인 네트워크 상태 변화에 대한 지원을 할 수 있다. 반면, 채널 스위칭 지연 시간이 비교적 짧은 경우에는 동적인 채널 할당 변경 방식이 더 적합하다고 할 수 있다. 동적인 채널 할당 변경은 두 가지 방식으로 나뉜다.

첫째, 초기 채널 할당을 통해 모든 인터페이스들에 채널이 할당 되고, 이를 기반으로 하여 차후 네트워크의 토폴로지 변화에 따라 동적으로 채널을 변경 할 수 있다. 둘째, 각 노드의 일부 인터페이스에만 초기 채널 할당을 하여 이들에게 설정된 채널은 변경하지 않고 이 기반 채널을 사용하여 노드의 나머지 인터페이스에 동적으로 채널을 할당하는 방식이다.

CLICA[8]는 무선 메쉬 네트워크에서 효율적이고 유연한 채널 할당을 위해 제안된 초기 채널 할당 방식이다. CLICA가 제안 하는 초기 채널 할당 방식은 처음에 언급한 정적인 채널 할당 방식에 포함 된다. 즉, 초기에 할당된 채널이 계속 유지된다. CLICA에서는 초기 채널 할당 문제를 네트워크 전체의 간섭을 최소화 하고 동시에 연결성을 보장해주는 것을 목적으로 하는 토폴로지 최적화 문제로 공식화하였고, 이 공식이 NP-complete²⁾이라고 증명하였다.

또한, 초기 채널 할당을 위한 Heuristic Greedy 알고리즘 [13]을 제안하여 연결성이 보장되고 간섭이 적은 토폴로지를 찾는 방법을 제시한다.

② 트래픽 인식 채널 할당 기법 (Traffic-aware Channel Assignment Methods)

토폴로지 기반 채널 할당 방식은 네트워크의 모든 링크에 균등한 트래픽 부하가 발생한다는 가정을 바탕으로 한다. 그러나 실제 상황에서는 네트워크의 각 링크에 부과되는 트래픽 부하가 다르기 때문에 이에 비례하여 채널의 대역폭을 할당하는 것이 합당하다. 각 링크에 실리는 트래픽 부하는 라우팅 프로토콜에 의해 결정되기 때문에 채널 할당은 라우팅 프로토콜과 밀접하게 연관된다. 그러나 네트워크 전체의 토폴로지 정보와 트래픽 정보를 완전하게 알고 있다 하더라도, 최적의 채널 할당은 NP-hard³⁾의 영역에 속한다.

Joint Channel Assignment and Routing 기법[9]에서는 이러한 트래픽 반영 채널 할당 문제에 대한 근사 알고리즘인 Joint Routing, Channel Assignment and Link Scheduling (RCL) 알고리즘을 제안하고 있다. 본 알고리즘은 채널할당 문제와 라우팅 문제를 함께 해결하기 위한 LP(Linear Program: 선형 계획법)계산식을 만들고 이 계산식의 솔루션을 통해 토폴로지(=Flow Graph)상에 채널(즉, Flow)이 설정 된다. 다음으로 각 링크에 부과되는 트래픽 부하에 비례하도록 채널의 대역폭을 할당한다. 또한 최적의 채널 할당을 위해 토폴로지상의 각 flow에 대한 조정 작업을 한다. 이 조정 작업을 통해 각 채널 간의 간섭을 줄이고 처리량을 최대화 한다.

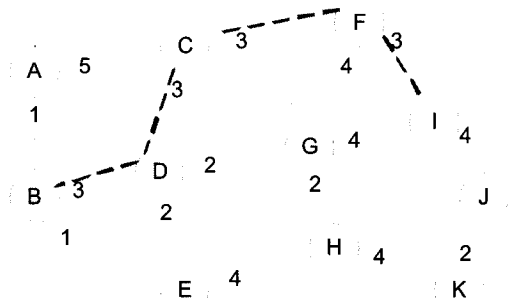
③ 분산 채널 할당 기법 (Distributed Channel Assignment Methods)

앞에서 소개한 토폴로지 기반 채널 할당과 트래픽 반영 채널 할당 방법은 모두 중앙집중식 채널 할당 기법에 해당한다. 하지만 이 방식들은 무선 메쉬 네트워크에서 주로 사용되는 분산 MAC 프로토콜인 IEEE 802.11 DCF[4]에서는 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 분산 방식의 채널 할당에 대한 연구가 진행 중에 있으나 아직 초기 단계이다. [10]에서는 멀티 채널 무선 메쉬 네트워킹의 채널 할당과 라우팅을 위한 시스템 구조(Hyacinth)를 제안하였다. Hyacinth 는 동적인 채널 할당과 패킷 라우팅을 위한 분산 알고리즘을 사용하는

02_ NP-complete : NP(Non-deterministic Polynomial time)중에서 가장 어려운 문제, NP에 속하면서 동시에 NP-hard에 속하는 경우

03_ NP-hard : 모든 경우의 수를 전부 확인해보는 방법 외에는 답을 구할 수 있는 방법이 없는 문제들의 집합

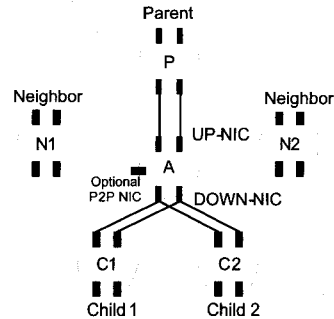
데, 노드의 트래픽 부하 정보만을 이용하여 채널 할당에 대한 결정을 함으로써 분산적인 채널 할당이 가능하게 한다. Hyacinth는 단지 시스템 소프트웨어의 변경만으로 상용 802.11 기반 인터페이스들과 호환 가능하게 설계되었다.



(그림 2) 채널 간 의존관계

분산 채널 할당 방식에 있어서 중요한 문제는 다른 노드가 사용하는 채널과의 의존관계이다. 예를 들어 (그림 2)와 같은 토폴로지에서 만약 노드 B와 D 간의 링크에 할당된 채널이 변경 되면 의존 관계에 있던 주위 노드의 동일 채널들이 연쇄적으로 변경되어야 한다. 즉 B-D의 채널 변경은 D-C, C-F, F-I 링크의 연쇄적인 채널 변경으로 이어진다. 노드들 사이의 이러한 채널 의존 관계는, 각 노드가 자신의 채널 할당 변경이 전체 네트워크에 주는 영향을 예측하기 어렵게 한다. 채널 할당 변경에 대한 의존 문제를 해결 하기 위해 Hyacinth는 트리 형태의 네트워크 토폴로지를 도입하고, 네트워크에 참여하는 각 노드들이 장착하고 있는 무선 인터페이스들을 두 가지 그룹으로 구분한다 ((그림 3) 참조). 이중 자신의 부모 노드와 통신하는 인터페이스를 UP-NICs라고 하고, 자신의 자식 노드와 통신하는 인터페이스를 DOWN-NICs라고 정의 한다.

각 노드들은 자신의 DOWN-NICs에 대한 채널 할당만을 책임진다. 각 노드들의 UP-NICs은 자신의 부모 노드의 DOWN-NICs과 연관되어 링크를 형성하므로 부모 노드가 자신의DOWN-NICs에 할당하는 채널과 같은 채널을 사용한다. 이러한 기법을 통해 채널 의존 관계가 하나의 부모 노드로부터 그것의 자식 노드로 전파되는 것을 효과적으로 방지한다. 따라서 각 노드는 채널 의존 문제 없이 자신의



(그림 3) UP-NICs과 DOWN-NICs

DOWN-NICs에 대한 채널을 변경할 수 있다.

각 노드가 자신의 DOWN-NICs에 채널을 할당하기 전에, 먼저 자신의 간섭 범위 내의 모든 채널에 대한 사용 상태를 측정한다. 이를 위해 각 노드는 주기적으로 k+1홉 이웃 노드 범위 내에서 자신의 채널 사용 상태 정보(CHNL_USAGE)를 주고 받는다. 이때 k값은 노드의 간섭 범위(Interference Range)와 통신 가능 범위(Communication Range)의 비율이다. 한 노드 A의 부모 노드와 자식 노드는 그들의 k홉 범위의 이웃 노드들과 간섭을 일으킬 수 있으므로, 노드 A의 통신에 잠정적으로 간섭을 일으킬 수 있는 범위의 노드들은 k+1홉 범위 내의 이웃 노드들이 된다. 특정 채널의 트래픽 부하는 이 채널을 사용하려고 하는 간섭 범위 내의 이웃 노드들에 의한 트래픽 부하를 합한 것으로 계산된다. 각 채널 당 총 부하 정도에 대한 정보를 기반으로 각 노드는 가능한 채널 집합 중에 최근에 가장 덜 사용된 채널을 선택한다. 트래픽 패턴과 채널 부하가 시간이 지남에 따라 변하기 때문에 인터페이스에 대한 채널의 매핑은 주기적으로 조정되어야 한다. 각 노드는 이웃 노드들에게 받은 채널 사용 상태 정보(CHNL_USAGE)를 기반으로 현재 할당된 채널을 평가하고 만약 이보다 더 적은 부하의 채널을 발견한다면 채널 할당을 변경한다.

2. 멀티 인터페이스 관리(Multi-Interface Management)

무선 메쉬 네트워크 환경에서 멀티 인터페이스 활용도를 극대화 하기 위해서는 효율적인 채널 할당 기법 외에 특정 트래픽에 적합한 인터페이스를 상위 계층에서 사용할 수 있게 하여야 한다. 현재는 상용 IEEE 802.11기반 인터페이스를

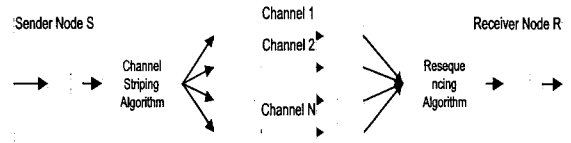
여러 개 장착한다고 하더라도 각각의 응용 계층 트래픽은 이들 멀티 인터페이스들 중 하나의 인터페이스만을 사용하게 된다. 따라서 각 인터페이스들의 채널 상태에 따라 응용 계층의 트래픽을 멀티 인터페이스들에게 적절히 분배해주는 인터페이스 스위칭 메커니즘이 필요하다. 이 기능은 라우팅 계층에서 채널 선택을 경로 선택과 결합하는 방법으로도 가능하다. 하지만 이를 위해서는 네트워크 전역의 모든 링크의 채널과 그 상태에 대한 최적의 고려가 필요한데 이는 NP-hard의 문제이고, 또한 Heuristic한 접근방법을 적용하더라도 장기적인 측면에서의 채널 선택 그리고 인터페이스 선택이 될 수밖에 없다는 한계가 있다. 따라서 좀더 단기적인 측면에서의 네트워크 상태변화에 대한 동적인 대응이 필요하다.

인터페이스 스위칭 메커니즘을 MAC 기능의 한 부분으로써 구현할 수도 있을 것이다. 하지만 이 방법은 기존 IEEE 802.11[4] 표준에 대한 수정을 필요로 하므로 상용 802.11 NIC 디바이스들을 그대로 사용할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 기존의 표준에 호환가능하고 상용 NIC 디바이스들을 그대로 이용하기 위해 인터페이스 관리 기능을 MAC계층이 아닌 MAC과 네트워크계층 사이의 가상 계층(논리적으로 링크계층에 속함)으로 구현하여 단지 이 가상 계층에 대한 모듈만 시스템에 추가하는 방법이 제시 되었다. Multi Radio Unification Protocol[14] 과 WBonding[15]기법은 가상 링크 계층을 사용한 효율적인 멀티 인터페이스 관리 메커니즘을 제공한다. 이러한 링크 계층에서의 접근방법은 현재 단말의 로컬 채널 상태 정보만으로 인터페이스 스위칭을 결정하므로 네트워크 상태 변화에 따른 단기적이고 동적인 대응이 가능해 진다는 장점이 있다.

① Striping

(그림 4)는 전통적인 인터페이스 스위칭 방법인 채널 Striping 기법[16]을 보여준다. 그림에서 송신 노드와 수신 노드 사이에 N개의 채널이 존재한다고 가정했을때, 송신 노드는 채널 Striping 알고리즘을 통해 나가는 트래픽을 N개의 채널로 분산시켜 전송시킴으로써 전체적인 전송 효율을 높일 수 있다. 그러나, N개의 채널로 각각 전송되는 패킷들은 각 채널의 지연시간 차이로 인해 송신 노드가 보낸 순서대로 수신되지 못하는 Packet Out-of-Order 문제를 야기하게

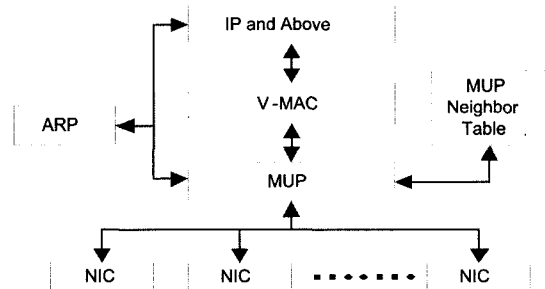
되는데 이러한 문제를 해결하기 위해 수신 노드는 별도의 재정렬 알고리즘을 실행하여야 한다. 또한 각 채널로의 분산 시 채널의 상태를 정확하게 반영할 수 없는 단점이 존재한다.



(그림 4) Channel Striping

② Multi Radio Unification Protocol (MUP) [14]

MUP는 멀티 채널에서 동작하는 멀티 인터페이스를 관리, 조정하는 링크 계층 프로토콜로서, 하위의 NIC과 상위 계층 프로토콜과의 관계는 (그림 5)와 같다. MUP는 하위의 멀티 인터페이스들을 상위 계층들에게 숨기고 대신 하나의 가상 인터페이스를 상위 계층들에 알려준다. 또한 각 멀티 인터페이스의 채널 상태를 주기적으로 검사하고 이 정보를 테이블에 유지한다. 상위 계층에서 내려 받은 패킷을 이웃 노드에게 전송해야 할 경우 MUP는 채널 상태 정보를 기반으로 가장 적합한 인터페이스를 선택해 패킷을 전송하게 된다.



(그림 5) MUP 구조

MUP는 다음의 세 가지 주요한 컴포넌트들로 구성된다.

Neighbor Discovery: 우선, MUP는 <표 1>에서와 같이 이웃 노드들에 대한 정보를 테이블 형태로 유지하는데 이를

MUP Neighbor Table이라 한다. MUP는 이 테이블을 통해 최근 통신한 이웃 노드 정보, MUP 기능이 있는 이웃 노드 정보는 물론, 이웃 노드들이 사용하는 멀티 인터페이스의 MAC 주소 및 이에 대응되는 채널 상태 정보 등을 유지, 관리하게 된다.

〈표 1〉 MUP Neighbor Table

Field	Description
Neighbor	IP address of the neighbor host
Status	Indicates whether N is known to be MUP-capable
MAC list	MAC addresses associated with N
Quality list	Channel quality values for each MAC address of N
Channel	Current preferred channel to communicate with N
Selection time	Last time a channel selection decision was made
Packet time	Last time a packet was sent or received from N
Probe time list	List of times for unacknowledged probe messages

MUP는 이러한 Neighbor Table 을 생성, 유지하기 위해 Neighbor Discovery 과정을 수행하게 된다. 보다 구체적으로는 우선 ARP 프로토콜을 통해, 즉 ARP Request-Response 메시지 교환을 통해 이웃 노드의 MAC 주소 및 해당 노드와의 통신 가능 여부를 판단하게 된다. 이 때 만약 이웃 노드가 멀티 인터페이스를 가지고 있다면 하나 이상의 MAC 주소를 얻게 된다. 다음으로 MUP 프로토콜에서 새로 정의한 CS(Channel Select)-CS ACK 메시지교환을 통해 이웃 노드들 중에 MUP 기능을 가진 노드들에 관한 정보를 수집하게 된다. 이 때 MUP 기능이 없는 일반 노드들은 CS 메시지를 인식하지 못하므로 CS ACK 메시지 응답도 하지 못하게 되지만 이미 ARP 를 통해 MAC 주소를 성공적으로 교환하였다면 MUP 기능을 제외한 다른 동작들은 정상적으로 이루어지게 된다.

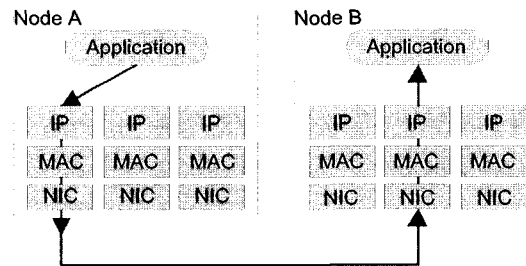
Communication Between MUP capable nodes: 이제 MUP 기능을 가진 노드들은 주기적으로 서로의 채널 상태를 측정하게 된다. 이는 앞서 설명한 CS-CS ACK 메시지 교환 시 발생하는 RTT(Round Trip Time)을 측정하여 채널 상태 평가에 반영함을 의미한다. 물론, 무선 채널의 불안정성을 반영하기 위해 일종의 평균값 개념에 해당하는 Smoothed RTT ($= \alpha \times RTT_{new} + (1-\alpha) \times SRTT$) 값을 반영한다. 이처럼 송수신 노드간 메시지 전송에 따른 RTT 측정값을 해당 채널 평가에 반영하는 기법에서는 수신 노드에서의 Queueing Delay 를 최대한 줄이는 것이 매우 중요하다. MUP에서는

이를 위해 IEEE 802.11e 표준[17]을 활용한다. QoS 지원을 위해 트래픽 우선 순위를 고려한 총 8개의 Queue를 운용하는 IEEE 802.11e 표준과 유사하게, MUP는 CS 메시지를 높은 우선순위로 분류하여 큐잉 지연 시간을 줄이는 것이다.

Channel Selection : 이제 상위 계층으로부터 전송할 패킷을 받았을 때, 가능한 멀티 채널들 중 각 채널의 SRTT 값을 기반으로 최적의 채널을 선택하여 전송하게 된다.

③ WBonding (Wireless Bonding) [15]

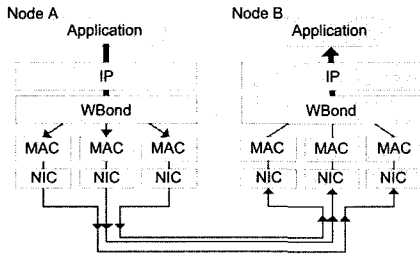
WBonding은 MUP 기법에서 나타날 수 있는 몇 가지 제한점, 가령 주기적인 CS-CS ACK 제어 메시지 전송으로 인한 네트워크 부하 증가나 우선순위 Queue와 같은 추가적인 조건을 요구하는 문제 등을 해결하고 동시에 각 노드가 가진 모든 인터페이스들을 충분히 활용하여 최대 처리량을 증가시키는 것을 목적으로 한다. 이를 통해, 현재의 IP기반 무선 네트워크에서 노드가 멀티 인터페이스를 갖추고 있다고 해도, 상위의 응용 프로그램에서 얻을 수 있는 최대 처리량은 그 중 하나의 인터페이스 최대 처리량에 의해 결정되는 한계를 극복할 수 있다(아래(그림 6) 참조).



(그림 6) 기존 IP-based 무선 네트워크

(그림 7)은 IP 와 MAC 계층 사이에 새로이 인터페이스 추상화 계층이 포함된 WBonding 구조를 나타낸다. 그림에서 WBond 추상화 계층은 IP 계층을 포함한 상위 계층에 하위의 멀티 인터페이스들이 존재한다는 사실을 감추고 단일의 가상 인터페이스 MAC 주소를 알려줌으로써, 궁극적으로는 상위 계층 패킷들이 하위의 여러 인터페이스에 분산되어 전송되는 효과를 가져온다. 즉, (그림 6)의 기존 IP-based 무선 네트워크와 달리 WBonding 구조를 기반으로 하는 무선 망

에서는 상위의 응용 프로그램이 얻을 수 있는 최대 처리량이 각 노드에 탑재되어 있는 무선 인터페이스 개수에 비례적으로 증가하게 된다.



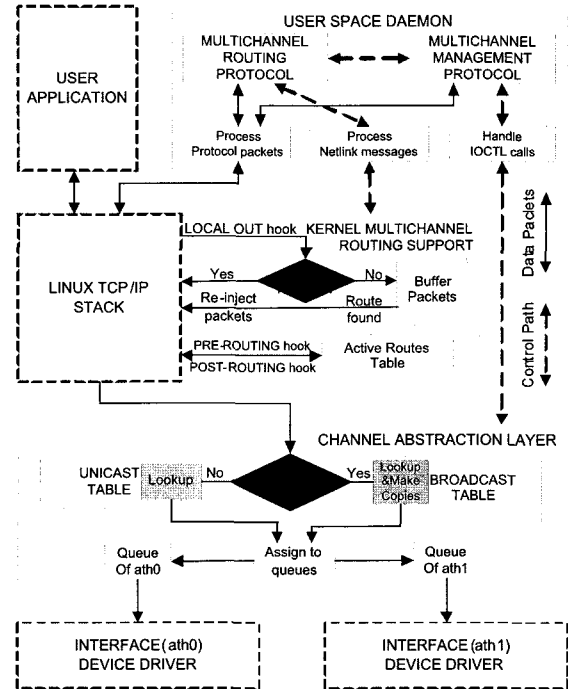
(그림 7) WBonding Architecture

WBond 계층은 크게 Neighbor & Interface 리스트 관리, Channel Quality 관리, 패킷 분배의 세 가지 주요 기능을 수행한다. 이 중, 특히 기존 MUP 기법과 차별성을 보이는 기능이 Channel Quality 관리 기능이다. 즉, 별도의 CS 메시지와 같은 제어 메시지를 사용하여 채널 상태를 측정하는 것이 아니라, 무선 인터페이스의 NIC 자체에서 제공하는 일종의 패킷 수신 에러 통계 정보만을 참고하여 측정한다. 결과적으로 제어 메시지 오버헤드가 상대적으로 적고 채널 상태 측정에 있어서 이웃 노드의 상태에 종속적이지 않게 된다. 또한 RTT기반의 채널 상태 측정 방식과 비교할 때 메시지의 전송 지연, 큐잉 지연 그리고 수신 측에서의 처리 지연이 필요하지 않으므로 훨씬 짧은 시간에 채널 상태 측정이 가능하고 이로 인해 더욱더 짧은 주기의 채널의 상태 변화에 대한 대응이 가능해진다는 장점이 있다.

8. 멀티 인터페이스 기반 테스트 베드 현황 (Real Test-beds with Multi-Interface)

무선 메쉬 네트워크를 위한 테스트 베드 구축 사례들은 다소 존재하지만[18, 19], 본 논문의 주제인 멀티 인터페이스 기반 무선 메쉬 네트워크를 위한 사례는 아직 많지 않은 편이다[20]. 최근 발표된 미국 UIUC Net-X 프로젝트에서는[21, 22] 멀티 채널, 멀티 인터페이스 네트워킹을 지원하기 위한 표준 프로토콜 구조를 제안하고 이를 리눅스 커널 상에 구현하였는데 본 장에서는 이를 간략히 요약하여 소개하고자 한다.

우선, Net-X는 멀티 채널과 인터페이스 스위칭을 위한 프로토콜 구조를 모듈로 구현하여 리눅스 커널 상에 쉽게 추가 가능하게 하였고 이 모듈은 논리적으로 네트워크 계층과 디바이스 드라이버 사이의 가상 링크계층으로서 위치하게 된다. 이 새로운 계층은 멀티 인터페이스들을 추상화하고 하나의 가상 인터페이스만을 네트워크 계층에 알린다. 또한 멀티 인터페이스 관리의 세부적인 사항을 네트워크 계층이 모르게 함으로 기존에 구현되어 있는 리눅스의 네트워크 스택을 수정할 필요가 없다는 장점이 있다. Net-X의 프로토콜 구조도는 (그림 8)과 같다.



(그림 8) Net-X 시스템 구조도

Net-X 시스템은 리눅스 TCP/IP 스택, 무선 인터페이스 디바이스 드라이버와 상호 작용하게 되는 3개의 주요 컴포넌트로 구성된다. 첫째, "Channel Abstraction Layer"는 멀티 채널과 멀티 인터페이스들을 관리하고 빠른 인터페이스 스위칭을 지원해준다. 또한 하위의 여러 인터페이스 디바이스들을 상위계층에게 추상화하여 보여준다. 또한 다른 멀티 채널 프로토콜 지원도 가능하도록 일반화된 방식으로 구현

되어 있으며 리눅스 커널에 기본적으로 포함되어 있는 Bonding 드라이버[23]를 기반으로 구현되어 있다. 둘째, “Kernel Multi-channel Routing Support” 컴포넌트는 On-demand 라우팅을 사용하기 위한 커널의 지원모듈로서 User Space Daemon에게 Route discovery가 시작되었음을 알리고 Route discovery가 진행 중인 동안 패킷들을 버퍼에 저장하는 기능을 담당한다. 마지막으로, “User Space Daemon”은 시간 지연에 민감하지 않은 대부분의 멀티 채널 프로토콜들이 구현될 수 있는데 Net-X에서는 Multi-channel Routing 프로토콜과 Multi-channel Management 프로토콜을 User Space Daemon으로 구현하고 있다.

(그림 9)는 두개의 IEEE 802.11a 무선랜 인터페이스 카드를 장착하고 리눅스 2.4 커널 상에서 구현된 Net-X 기반 멀티 인터페이스 테스트 베드이다.



(그림 9) Net-X Testbeds, Soekris 5421

IV. 결 론 (Conclusion)

무선 인터페이스 기술의 비약적인 발전에도 불구하고 무선 메쉬 네트워킹의 제한된 대역폭은 여전히 많은 과제를 남기고 있다. 대역폭의 문제는 다중 홉 무선 네트워크 환경에서는 더욱 심각해지는데 이는 라우팅 경로상의 간섭뿐만 아니라 이웃 노드 통신으로 인한 주변 간섭 때문에 End-to-End 처리량의 심각한 손실을 초래하기 때문이다. 따라서 기존의 단일 채널, 단일 인터페이스 기반 메쉬 네트워킹으로

는 응용 계층의 증가하는 데이터 처리 수요를 충분히 지원할 수 없게 되었고, 그 대안으로 “멀티 채널, 멀티 인터페이스 기반 무선 메쉬 네트워킹”에 관한 연구 필요성이 새로이 대두되었다.

본 논문에서는 이러한 연구 이슈 중에서 MAC과 링크계층에서의 효율적인 멀티 채널 할당 기법과 멀티 인터페이스 관리 기법에 대한 최근 연구 동향을 살펴보고, 실제 멀티 인터페이스 기반 무선 메쉬 네트워킹 테스트베드 구축 사례로 Net-X 프로젝트에 관해 소개하였다.

- [1] I. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, “Wireless Mesh Networks: A Survey,” *Elsevier Computer Networks*, 2005.
- [2] P. Gupta and P. R. Kumar, “The Capacity of Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, 2000.
- [3] IEEE P802.11s(tm)/D1.02, “Amendment: ESS Mesh Networking,” Mar. 2007.
- [4] IEEE Std. 802.11, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” 1999.
- [5] P. Bahl, R. Chandra, and J. Dunagan, “SSCH: Slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks,” in *IEEE/ACM MobiCom*, 2004.
- [6] J. So and N. Vaidya, “Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver,” in *ACM MobiHoc*, 2004.
- [7] Maheshwari and Das “Extended Receiver Detected Transmission & Local Coordination-based Multichannel MAC,” in *IEEE SECON*, 2006
- [8] M. Marina, S. Das, “A topology control approach for Utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks” in *IEEE Broadnets*, 2005.
- [9] M. Alicherry, R. Bhatia, and L. Li, “Joint Channel

Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-radio Wireless Mesh Networks,” in *ACM MobiCom*, 2005.

[10] A. Raniwala and T. Chiueh, “Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network,” *IEEE Infocom*, 2005.

[11] V. Park, M. Scott, and Corson, “A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks,” in *IEEE INFOCOM*, 1997.

[12] M. Mosko and J. Garcia-Luna-Aceves, “Multipath routing in wireless mesh networks,” in *WIMESH*, 2005.

[13] S. Davis and R. Impagliazzo, “Models of Greedy Algorithms for Graph Problems,” in *ACM-SIAM SODA*, 2004.

[14] A. Adya, P. Bahl, J. Padhye, A. Wolman, and L. Zhou, “A Multi-Radio Unification Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks,” in *BroadNets*, 2004.

[15] S. Kim and Y. Ko, “Wireless Bonding for Maximizing Throughput in Multi-Radio Mesh Networks,” in Third IEEE PerCom on Pervasive Wireless Networking (PWN07) in conjunction with PerCom 2007

[16] H. Adishesu, G. Panikar, and G. Varghese, “A Reliable and Scalable Striping Protocol,” in *SIGCOMM*, 1996.

[17] IEEE Computer Society, “Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements,” IEEE Std 802.11eTM-2005

[18] D. Maltz, J. Broch, and D. Johnson, “Experiences Designing and Building a Multi-Hop Wireless Ad-Hoc Network Testbed,” Tech. Rep. TR99-116, CMU, 1999.

[19] B. A. Chambers, “The Grid Roofnet: A Rooftop Ad Hoc Wireless Network,” M.S. thesis, MIT, 2002.

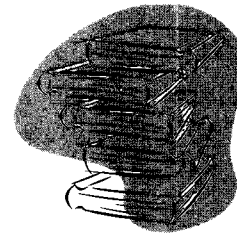
[20] Nicolas Boulicault, Guillaume Chelius, and Eric Fleury, “Experiments of Ana4: An Implementation of a 2,5 Framework for Deploying Real Multi-hop Ad-hoc and Mesh Networks,” in *REALMAN*, 2005.

[21] Pradeep Kyasanur, Chandrakanth Chereddi, and Nitin H. Vaidya, “Net-X: System eXtensions for Supporting Multiple Channels, Multiple Interfaces, and Other

Interface Capabilities”, Technical Report, August 2006

[22] Net-X Project, “<http://www.crhc.uiuc.edu/wireless/netx.html>”

[23] Linux Ethernet Bonding Driver, <http://sourceforge.net/projects/bonding/>



약 력



이 성 희

2004년 아주대학교 정보및컴퓨터공학부 졸업 (공학사)
 2006년 아주대학교 정보통신전문대학원 석사 (공학석사)
 2006년 ~ 현재 아주대학교 정보통신전문대학원 박사과정
 관심분야: WMN, MANET, WiBro 시스템,
 무선 멀티미디어 통신



김 민 수

2007년 아주대학교 정보 및 컴퓨터 공학부 졸업 (공학사)
 2007년 3월 ~ 현재 아주대학교 정보통신전문대학원 석사과정
 관심분야: WMN, WPAN, Radio Technologies



고 영 배

1991년 아주대학교 전자계산학과 졸업 (공학사)
 1995년 아주대학교 경영정보학과 석사 (MBA)
 2000년 텍사스 A&M 대학 컴퓨터공학과 박사 (공학박사)
 2000년 ~ 2002년 미국 IBM T.J. Watson 연구소 전임연구원
 2002년 ~ 현재 아주대학교 정보및컴퓨터공학부 부교수
 관심분야: Ubiquitous Networked Systems, Wireless Ad Hoc/Mesh/Sensor Network, Wireless LAN, WiBro