

# 다중 경로 라우팅을 지원하는 IEEE 802.11s기반 메쉬 라우터 구현

정회원 김 정 수\*, 종신회원 정 상 화\*\*°, 정회원 최 희 진\*\*\*

## Implementation of a Mesh Router Supporting Multi-path Routing based on IEEE 802.11s

Jeong-Soo Kim\* *Regular Member*, Sang-Hwa Chung\*\*° *Lifelong Member*,  
Hee-Jin Choi\*\*\* *Regular Member*

### 요 약

본 논문에서는 다중 경로 라우팅을 지원하는 IEEE 802.11s기반 메쉬 라우터를 구현하였다. IEEE 802.11s에는 현재 다중 경로 라우팅 알고리즘이 정의되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 IEEE 802.11s에 정의되어있는 단일 경로 라우팅 알고리즘뿐만 아니라 AOMDV기반 다중 경로 라우팅 알고리즘도 구현하였다. 또한 이 메쉬 라우터는 싱글 채널 싱글인터페이스 사용 시, 홉의 수가 증가함에 따라 송수신 대역폭이 급격히 감소하는 현상을 방지하기 위하여 멀티 채널 멀티 인터페이스를 지원하도록 구현되었다. 우리는 이 메쉬 라우터를 이용하여 테스트베드를 구축하였으며, 이를 통해 이 메쉬 라우터의 대역폭 성능, 실시간 비디오 스트리밍 서비스 성능을 검증하였고, 단일 경로 라우팅과 다중 경로 라우팅의 성능을 비교 검증하였다. 이 메쉬 라우터의 평균 TCP 대역폭은 5홉 기준 23.8Mbps이고, 평균 latency는 2.4ms이다. 이 메쉬 라우터의 평균 지터는 5홉 기준 0.547ms이다. 또한 이 메쉬 라우터는 다중 경로 라우팅을 사용함으로써 평균 12.73%의 경로 복구 시간을 단축하였다.

**Key Words** : 무선 메쉬 네트워크, IEEE 802.11s, 다중 채널 다중 인터페이스, 다중 경로 라우팅

### ABSTRACT

This paper focuses in the implementation of mesh router supporting multi-path routing based on IEEE 802.11s. In HWMP of IEEE 802.11s, the single path routing just was defined. So, in this work, we implemented not only the single path routing defined in IEEE 802.11s, but also a multipath routing based on AOMDV which extended the standard. A multi-channel multi-interface technology that can transmit and receive simultaneously and lower bandwidth reduction caused by interferences than a single-channel single-interface was implemented in our mesh router. We also developed an outdoor test bed with the mesh routers. The bandwidth of the mesh router and a real-time video streaming service were verified using the test bed. And, the single path and multipath routing algorithms are also compared. In this test bed, The average TCP bandwidth was 23.77 Mbps and the latency was 2.4 ms in five hops. The test bed could service real-time streaming with an average jitter of 0.547 ms in five hops. The mesh router that used the multipath routing path reduced the path recovery time by 12.73% on average.

※ “이 논문은 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임” (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

\* 부산대학교 컴퓨터공학과 임베디드네트워크시스템 연구실(mankindy@pusan.ac.kr)

\*\* 부산대학교 컴퓨터공학과(shchung@pusan.ac.kr), (°: 교신저자), \*\*\* 농협중앙회 IT본부분사

논문번호: KICS2010-10-464, 접수일자: 2010년 10월 1일, 최종논문접수일자: 2011년 11월 28일

## I. 서 론

멀티 홉 통신을 사용해 통신하는 무선 메쉬 네트워크는 높은 네트워크 확장성과 경제성을 제공함으로써 차세대 통신망 기술로 주목 받고 있다. IEEE 802.11 (WLAN) 표준<sup>[1]</sup>에 메쉬 네트워킹 기술을 도입하기 위해 IEEE 802.11s 태스크 그룹이 활동 중이며 이에 대한 표준화 작업이 진행 중<sup>[9]</sup>이다. 이러한 WLAN 기반 메쉬 네트워크의 가장 주요한 특징은 메쉬 네트워크 형성에 필요한 기능, 즉 이웃 노드를 찾고, 네트워크 링크를 형성하기 위한 peer link management, 데이터 송수신을 위한 라우팅 경로 생성, 그리고 네트워크 링크의 단절을 인지하고 자동으로 복구하는 self-healing 등의 기능이 MAC layer에서 동작 한다는 것이다. 무선 메쉬 네트워크는 이러한 기능을 지원함으로써 무선 멀티홉 통신의 확장성과 MAC layer 라우팅의 효율성을 동시에 제공한다.

본 논문은 무선 메쉬 네트워크<sup>[1]</sup>를 구축하기 위해 사용되는 무선 메쉬 라우터의 개발을 주요내용으로 한다. 이 메쉬 라우터는 IEEE802.11s<sup>[2]</sup>을 기반으로 구현되었다. IEEE802.11s에 정의된 HWMP(Proactive 방식의 라우팅 알고리즘과 AODV (Ad hoc on-demand distance vector routing)<sup>[7]</sup>에 기반한 on-demand 방식의 라우팅 알고리즘이 정의되어 있다<sup>[5]</sup>. 그러나 IEEE802.11s에는 단일 경로 라우팅 알고리즘만이 정의되어 있다. 따라서 본 논문의 메쉬 라우터에는 IEEE802.11s에 정의된 단일 경로 라우팅 알고리즘뿐만 아니라, 경로 복구 시, 단일 경로 라우팅 알고리즘에 비해 경로 형성 메시지 오버헤드와 경로 복구 시간을 줄일 수 있는 다중 경로 라우팅 알고리즘도 구현하였다<sup>[2]</sup>. 이 다중 경로 라우팅 알고리즘은 AOMDV (Ad hoc on-demand multipath distance vector routing)<sup>[15]</sup>를 기반으로 한다.

본 논문에서 개발한 메쉬 라우터에는 여러 네트워크 인터페이스를 이용하여 데이터 송수신이 동시에 가능하며, 싱글 채널 싱글 인터페이스에 비해 간섭으로 인한 대역폭 감소를 크게 줄일 수 있는 멀티 채널 멀티 인터페이스 기술이 구현되었다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 이 메쉬 라우터의 성능 검증을 위하여 테스트 베드를 만들고 그것의 성능을 검증하였다.

본 논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서는 IEEE802.11s에 관한 설명 그리고 AODV와 AODV 기반 다중 경로 라우팅 프로토콜에 대해 설명하고, 3장에서는 메쉬 라우터의 설계 및 구현에 관해서 설명하며, 4장에서는 테스트 베드에서 실험한 결과를 분석

하고, 5장에서 결론에 대해서 말하겠다.

## II. 관련 연구

IEEE 802.11s는 IEEE 802.11 표준에 메쉬 네트워킹 기술을 도입하기 위한 표준이다. IEEE 802.11s에서는 다중 홉 토폴로지에서의 무선 노드들이 자동으로 네트워크를 구성하기 위한 기능을 가지고 있으며, 브로드캐스트, 멀티캐스트 및 유니캐스트를 지원하도록 정의하고 있다. IEEE 802.11s에서 정의하고 있는 네트워크 구조는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이, IEEE 802.11s에서는 기본적으로 사용되는 무선 노드를 Mesh Point (MP)라고 한다. MP는 다른 MP들과의 무선 통신을 통해 메쉬 네트워크를 구축하고, MAC layer 라우팅 프로토콜을 사용하여 데이터 전송 경로를 설정하고 데이터 통신을 한다. Mesh Portal (MPP)은 유선 네트워크에 연결되어 게이트웨이 역할을 수행하며, 무선 메쉬 네트워크의 데이터를 유선 네트워크로 전달하는 역할을 수행한다. 마지막으로 Mesh AP (MAP)는 WLAN Mesh Network에 클라이언트 노드가 접속할 수 있도록 MP에 AP 기능을 추가한 것이다.

MIT Roofnet<sup>[17]</sup>에서는, 작은 교과서 크기의 PC를 사용하여 각각의 노드를 구성하였다. Roofnet의 모든 노드는 하나의 무선 네트워크 인터페이스와 하나의 전방향 안테나를 가지고 있으며, 스스로 네트워크를 구성할 수 있다. Roofnet을 구성하는 노드는 link quality를 측정하기 위하여 주기적으로 이웃노드와의 링크 상태를 측정한다. Rootnet에서는, Dynamic Source Routing (DSR) 프로토콜의 한 종류인 SRCR routing 프로토콜을 사용하여 다섯 개의 최적 경로를 찾기 위한 기준으로 이 link quality를 사용한다. [18]에서는, 인텔 프로세서를 탑재한 노트북과 ARM 프로

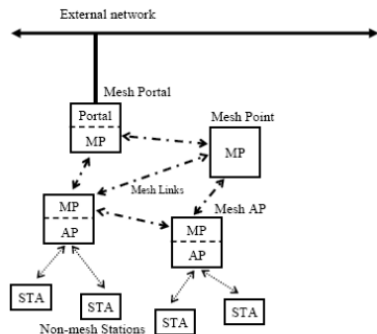


그림 1. IEEE 802.11s에서 정의한 무선랜 메쉬 네트워크 구조

세서 코어기반 임베디드 리눅스 개발 보드를 사용하여 메쉬 라우터를 구현하였다. 모든 노드는 하나의 무선 네트워크 인터페이스와 하나의 전방향 안테나를 가지고 있다. table-driven routing 방식의 라우팅 프로토콜인 Optimized Link State Routing (OLSR)이 라우팅을 위해 사용되었다. 이러한 연구와 달리 산업체 분야에서는, Firetide, Motorola 등과 같은 회사에서 생산된 상용 메쉬라우터가 있다. 이 메쉬 라우터는 멀티 채널 멀티 인터페이스를 지원한다. 그러나, 이러한 메쉬 라우터의 자세한 개발하는 방법에 대해서는 보고된 바가 없다.

기존 연구에서는, 싱글 채널 싱글 인터페이스를 이용한 메쉬 라우터가 개발되었다. 무선 메쉬 네트워크에서 싱글 채널 싱글 인터페이스를 사용하여 통신하는 경우, 메쉬 라우터가 동시에 데이터를 송수신할 수 없는 것과 메쉬 라우터 간의 inter-flow, intra-flow 간섭으로 인하여 대역폭 감소가 발생한다. 따라서, 이러한 대역폭 감소를 줄이기 위하여 메쉬 라우터에 멀티 채널 멀티 인터페이스 기술을 적용하는 것이 필요하다. 본 논문에서는, 우리는 멀티 채널 멀티 인터페이스를 지원하고 다중 경로 라우팅을 지원하는 메쉬 라우터를 구현하였다. 이 메쉬 라우터에 다중 경로 라우팅 프로토콜을 구현하기 위해 AOMDV가 사용되었다.

AODV는 Ad-Hoc 네트워크를 위해 개발된 라우팅 프로토콜로서 데이터 전송이 필요할 때, 라우팅 경로를 생성하는 on-demand 방식이다. AODV는 라우팅 경로를 생성하기 위해 RREQ(Route REQuest), RREP(Route REPLY), RERR(Route ERRor)과 같은 프레임을 사용한다. RERR프레임은 특정경로가 끊겼을 경우 대체 경로를 생성하기 위해 사용된다. AODV는 기본적으로 IP layer에서 동작한다. 그러나 본 논문에서는 AODV기반 MAC layer 라우팅을 하는 단일 경로 라우팅 모듈을 구현하였다.

AODV기반 다중 경로 라우팅 프로토콜은 AODV-BR (Backup Route)<sup>[13]</sup>, AODVM (Ad hoc On-demand Distance Vector Multipath)<sup>[14]</sup>, AOMDV가 있다. AODV-BR은 AODV의 RREP송신과정을 수정하였다. 목적지 노드가 AODV와 같은 과정을 거쳐 RREQ에 대한 응답으로 RREP를 보내면 RREP으로 인해 생성된 주경로 주변의 노드들이 전송되는 RREP을 오버 히어링하여 주경로 주변의 노드들이 주 경로에 대한 보조경로를 자체적으로 형성한다. 만약 주경로가 어떤 노드가 끊어진 링크로 인해 데이터 패킷을 전송할 수 없는 경우, 그 노드는 해당 데이터 패킷을 주변의 모든 노드에게 브로드 캐스팅한다. 이 데

이터 패킷을 받은 노드는 RREP 오버히어링을 통해 생성된 보조 경로로 해당 데이터를 전송한다. 이러한 AODV-BR은 노드가 목적지 노드로의 경로를 하나씩만 가진다는 면에서 다중 경로 라우팅 프로토콜이라 보기 어렵다.

AODVM은 AODV의 RREQ와 RREP송신과정을 수정하였다. 목적지 노드로 RREQ가 전송될 때, 중간 노드는 자신이 받은 모든 RREQ의 정보를 RREQ 테이블에 저장한다. 목적지 노드가 RREQ를 받으면 이전 노드가 다른 RREQ에 해서만 RREP를 보낸다. 이 RREP는 RREQ가 도착한 역경로로를 통해 출발지 노드로 전달된다. 이때, 현재 생성된 주경로 주변의 노드는 주경로의 노드가 RREP를 전송하는 것을 오버 히어링하여 주경로상의 노드에서는 RREQ정보를 RREQ테이블에서 지운다. 이렇게 함으로써 AODVM은 두 번째 RREP가 도착했을 때, 주경로상의 노드가 아닌 다른 노드로 RREP을 전송하여 다중경로를 형성한다. 이러한 AODVM은 경로 생성 과정이 복잡하고 많은 수의 경로는 찾지 못한다는 단점이 있다.

AOMDV는 AODV기반 link-disjoint 다중 경로 라우팅 알고리즘이다. 중간 노드가 소스 노드로부터 RREQ를 받으면, AODV프로토콜이 중복된 RREQ를 받으면 버려버리는 것과 달리, AOMDV 프로토콜은 모든 RREQ를 저장한다. 그래서 각각의 노드는 RREQ내에 소스 노드의 이웃 노드를 나타내는 firsthop이라고 명명된 필드로부터 정보를 얻어 만들어진 firsthop\_list를 관리 한다. 만약 수신된 RREQ의 firsthop이 RREQ를 수신한 노드의 firsthop\_list에 존재하면, 그 RREQ는 버려진다. 그러나, 그 RREQ가 그 노드의 firsthop\_list와 다른 firsthop을 가지면, 그 노드는 다중 경로 형성을 위해 새로운 next-hop을 그 노드의 라우팅 테이블에 저장한다. 목적지 노드는 각각의 수신된 RREQ에 대한 RREP가 전송한다. 각각의 RREQ를 통해 이미 만들어진 역경로로 각각의 RREP이동함에 따라 다중 경로가 형성된다. AODV-BR과 AODVM에 비해, AOMDV는 몇가지 장점을 가지고 있다. AODV-BR은 실제 다중경로 알고리즘이 아니고, AODVM은 다중 경로를 형성하지만, 경로를 형성하는 과정 매우 복잡하다. 반면에, AOMDV는 한번의 경로 형성만으로 다중 경로를 형성할 수 있다. 그러나 현재 AOMDV에 관한 연구는 시뮬레이션 수준에서만 존재한다. 따라서 본 논문에서는, AOMDV를 기반으로 한 다중 경로 라우팅 모듈을 실제 메쉬 라우터의 MAC 레이어에 구현하였다.

### III. 메쉬 라우터의 구현

이장에서는 메쉬 라우터의 구현을 위한 하드웨어 및 소프트웨어, 다중 경로 라우팅 프로토콜의 구현, 그리고 multi-channel multi-interface의 구현에 관하여 설명하겠다.

#### 3.1 하드웨어 및 소프트웨어

본 논문에서는 Gateworks사의 GW2348-4 네트워크 개발 보드<sup>[8]</sup>, 임베디드 리눅스, 그리고 Madwifi 디바이스 드라이버<sup>[9]</sup>를 사용하여 WLAN Mesh Network 라우터를 구현하였다. GW2348-4 네트워크 개발 보드는 Intel XScale IXP425 프로세서를 사용하는 고성능 임베디드 보드이다. 운영체제는 커널 2.6 버전의 임베디드 리눅스를 사용하였다.

라우터간 멀티홉 통신을 위해, Atheros사의 Wifi 칩을 지원하는 리눅스 디바이스 드라이버인 madwifi를 수정하여 WLAN mesh engine을 구현하였다. WLAN Mesh Network는 IP 주소를 기반으로 라우팅을 수행하는 기존의 네트워크 프로토콜과는 달리 MAC 주소를 기반으로 라우팅을 수행한다. 이러한 구현을 위해서는 MAC 계층에 대한 수정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 madwifi 디바이스 드라이버의 MAC 계층을 수정하여 WLAN mesh engine을 구현하였다.

그림 2는 개발한 Mesh Router의 블록다이어그램이다. 이 Mesh Router는 임베디드 리눅스, 네트워크 인터페이스, 그리고 WLAN Mesh Engine 이렇게 크게 3부분으로 구성되어 있다. 먼저 임베디드 보드를 구동하기 위한 운영체제인 임베디드 리눅스가 탑재되어 있고, 4개의 무선 인터페이스와 2개의 유선 인터페이스를 탑재되어 있다. WLAN Mesh Engine은 Peer Link Management 모듈, Self-Healing 모듈, 그리고 Mesh Routing 모듈로 구성되어 있다.

Peer Link Management 모듈은 네트워크 형성 초기에 주변의 노드로부터 정보를 수집하여 자신과 데

이터 통신이 가능한 노드 쌍을 형성하는 역할을 한다. 메쉬 라우터가 부팅되면, Peer Link Management 모듈은 그것의 이웃 노드들로부터 비콘을 수신하고, 그 정보를 neighbor 테이블에 저장한다. 이 모듈은 각 노드사이의 링크를 형성하기 위하여, 각각의 링크를 구분하기 위한 정보를 교환한다. 이 정보에는 myMAC, peerMAC, Local Link ID, 그리고 peer link ID가 포함되어 있다. myMAC와 peerMAC은 각각 자신과 이웃 노드의 MAC주소를 나타내고, local link ID와 Peer Link ID는 각각 자신과 이웃 노드가 생성한 난수를 나타낸다. 이 모듈은 이러한 정보의 쌍을 서로 교환함으로써 링크를 형성하게 된다.

WLAN 메쉬 네트워크에서는 새로운 노드가 메쉬 네트워크에 추가되거나, 네트워크 내의 어떤 노드가 원래 있던 위치에서 다른 위치로 이동하거나, 또는 통신경로에 있는 특정 노드가 고장나는 경우, 데이터를 송수신하는 경로가 변경될 수 있다. 이러한 경우 self-healing 모듈은 네트워크 변화에 대응하여 데이터를 송수신하기 위한 네트워크 경로를 재생성한다. 어떤 노드의 메쉬 라우팅 모듈이 RREQ와 RREP을 이용하여 목적지까지의 경로를 생성하면, 그 노드의 라우팅 테이블에는 목적지로 가기 위한 next-hop와 precursor node정보가 생성된다. 이 경로에 있는 어떤 링크가 끊어지면, 끊어진 링크를 인지한 라우터는 라우팅 테이블에 저장된 precursor node정보를 이용하여 그 링크를 거쳐서 경로가 생성된 모든 경로의 출발지 노드에게 RERR을 전송한다. 이 RERR에는 라우팅 경로의 어떤 링크가 끊어졌음을 알리는 정보가 포함되어 있다. 따라서 RERR을 수신한 중간 노드는 라우팅 테이블에 저장된 해당 경로에 대한 라우팅 경로 정보를 지우고, precursor node정보를 이용하여 경로상의 이전 노드로 RERR을 전달한다. 이 RERR정보를 수신한 출발지 노드는 목적지까지의 새로운 경로 생성을 요청한다. 이 요청에 따라 새로운 라우팅 경로가 생성되면, self-healing과정이 완료된다.

Mesh Routing 모듈은 IEEE 802.11s표준에 정의된 HWMP의 AODV와 AODV을 다중경로 형성 방식으로 확장한 라우팅 프로토콜인 AOMDV가 구현되어 있다. AODV 프로토콜은 현재 경로가 끊어지면, 새로운 경로를 형성한다. 그러나 AOMDV는 초기에 경로를 생성할 때, 다중 경로를 동시에 생성하기 때문에, 현재 경로가 끊어지면, 미리 생성한 대체 경로를 사용한다. 따라서 새로운 경로를 생성하는 데 필요한 오버헤드를 줄이고, AODV에 비해 빠른 경로 복구가 가능하다. AOMDV는 미리 생성한 경로가 모두 끊어진 경

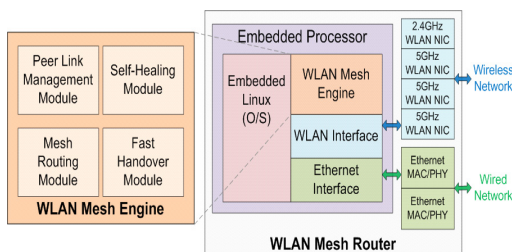


그림 2. 메쉬 라우터의 블록다이어그램

우에만 새로운 경로를 생성한다.

### 3.2 다중 경로 라우팅 프로토콜의 구현

본 논문에서는 단일 경로만을 on-demand 방식으로 생성할 수 있는 AODV 프로토콜과 AODV 프로토콜을 확장하여 다중 경로 형성이 가능한 AOMDV 프로토콜을 모두 메쉬 라우팅 모듈에 구현하였다.

AODV 프로토콜을 사용하는 메쉬 네트워크는 한 노드가 다른 노드와 통신하기 위해서 RREQ, RREP을 사용하여 경로를 생성한다. 어떤 노드A가 노드B와 통신하기 위하여 경로 생성을 요청하는 RREQ을 전송한다. 이때, RREQ은 브로드 캐스팅 방식으로 전송되며, 중간 노드는 이 RREQ을 받아 노드A로 가기 위한 next-hop 정보를 라우팅 테이블에 저장하고, 이 RREQ을 다시 브로드 캐스팅한다. AODV는 전체 경로에 대한 정보를 저장하지 않고, 특정 노드로 가기 위한 next-hop만을 저장함으로써 라우팅 경로를 생성한다. 노드B는 이 RREQ에 대한 응답으로 RREP을 전송한다. 이때 RREP는 이 RREQ가 온 역경로로 전송되며, RREP을 받은 중간 노드는 노드B로 가기 위한 next-hop 정보를 라우팅 테이블에 저장한다. 노드A가 이 RREP을 받으면, 라우팅 경로가 생성된다.

본 논문에서 우리는 AOMDV 기반 다중 경로 라우팅 알고리즘을 구현하였다. 그림 3에서 보는 비와 같이, 어떤 노드가 RREQ을 수신하면, 그 노드는 RREQ의 목적지가 현재 노드인지 아닌지를 확인한다. 만약 목적지가 현재 노드이면, 그 노드는 RREQ가 중복된 것인지 아닌지 확인한다. 만약 RREQ가 중복된 것이 아니면, 그 노드는 자신의 라우팅 테이블에 next-hop 정보를 저장하고 RREQ의 소스 노드로 RREP을 전송한다. 만약 중복된 RREQ이면, 그 노드는 RREQ의 이전 노드를 확인한다. RREQ의 이전 노드가 저장되어 있는 이전 노드와 다르다면, 그 노드는 RREQ의 소스 노드에 대한 next-hop을 자신의 라우팅 테이블에 저

장하고, RREQ의 소스 노드에게 새로운 RREP을 전송한다. 다른 경우에는 RREQ을 버린다.

반면에, 현재 노드가 RREQ의 목적지 노드가 아니고, RREQ의 firsthop이 자신의 firsthop\_list에 있으면, RREQ을 버린다. 각각의 노드는 수신한 RREQ내에 firsthop이라고 불리는 추가된 데이터 필드로부터 정보를 얻어 firsthop\_list를 관리한다. 이 firsthop은 RREQ 소스 노드의 이웃 노드를 지칭한다. 반면에, RREQ가 새로운 firsthop를 가졌으면, 그 노드는 다중 경로 라우팅을 위해 자신의 라우팅 테이블에 새로운 next-hop을 저장하고, 자신의 firsthop\_list에 새로운 firsthop을 저장한다. 그런 다음, 그 노드는 RREQ가 중복인지 아닌지 확인한다. 만약 중복이면 그 RREQ를 버리고, 아니면 다른 노드로 RREQ를 브로드캐스팅한다. 이러한 방법으로 노드들은 RREQ 소스 노드에 대한 다중 경로를 생성한다.

그림 4와 같이, 어떤 노드가 RREP을 수신하면, 그 노드는 자신이 RREP의 목적지 노드인지 확인한다. 만약 자신이 RREP의 목적지 노드가 아니면, 그 노드는 수신한 RREP가 중복인지 아닌지 확인한다. RREP가 중복된 것이 아니면, 그 노드는 RREP의 소스 노드에 대한 next-hop을 자신의 라우팅 테이블에 저장하고, RREP의 목적지로 RREP을 전달한다. 만약 RREP가 중복된 것이면, RREP의 thtmdp에 대한 next-hop과 다른 next-hop이 자신의 라우팅 테이블에 있는지 확인한다. 만약 다른 next-hop이 있으면, 그 노드는 RREP의 소스 노드에 대한 새로운 next-hop을 라우팅 테이블에 저장하고, RREP의 목적지에 대한 다른 next-hop을 이용하여 RREP을 그것의 목적지로 전달하며, 그렇지 않은 경우에는 RREP을 버린다. 반면에, RREP의 목적지가 현재 노드이면, 그 노드는 next-hop을 자신의 라우팅 테이블에 저장한다. 이러한

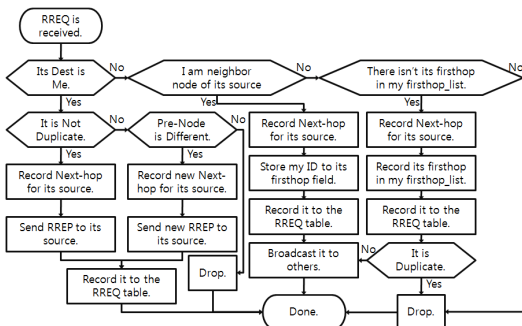


그림 3. AOMDV의 RREQ 처리를 위한 Flowchart

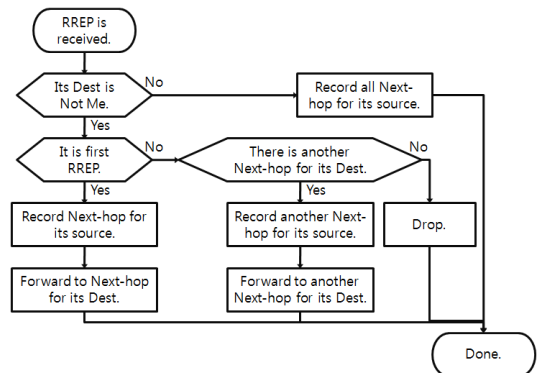


그림 4. AOMDV의 RREP 처리를 위한 Flowchart



과정을 거쳐 노드들은 RREP의 소스 노드에 대한 다중 경로를 생성한다.

이와 같이 RREQ처리 시, AOMDV는 중복된 RREQ를 모두 버려버리는 AODV와 달리, 다른 이전 노드를 가지거나 다른 firsthop을 가진 각 RREQ의 소스 노드에 대한 next-hop을 자신의 라우팅 테이블에 저장한다. 또한 RREP처리 시, AOMDV는 모든 RREQ에 대하여 하나의 RREP만을 보내는 AODV와 달리, 다른 이전 노드를 가진 각 RREQ에 대하여 다수의 RREP를 전송한다. 따라서, AOMDV는 한번의 경로 탐색으로 다중 경로를 생성할 수 있다.

### 3.3 멀티 채널 멀티 인터페이스의 구현

멀티 홉 환경에서 메쉬 라우터가 싱글 채널 싱글 인터페이스로 통신하는 경우, 송수신을 동시에 할 수 없고, 같은 채널을 사용하는 노드간의 간섭이 발생한다. 이러한 원인으로 인해, 데이터 전송경로의 홉 수가 증가함에 따라 심한 대역폭 감소현상이 발생한다. 이러한 대역폭 감소 현상을 방지하기 위하여 멀티 채널 멀티 인터페이스 기술을 메쉬 라우터에 적용하는 것이 필요하다. 그림 5는 메쉬 라우터에 멀티 채널 멀티 인터페이스 기술을 적용하기 위한 소프트웨어 구조를 보여준다.

그림 5에서 보는 바와 같이, 임베디드 리눅스 상에서 동작하는 리눅스 DHCP 서버는 AP 인터페이스를 통해 연결된 클라이언트에게 자동으로 IP주소를 할당한다. 그 클라이언트는 리눅스 DHCP 서버로부터 할당된 사설 IP 주소를 사용하여 다른 노드와 통신할 수 있다. AP 인터페이스는 madwifi내에 구현되어 있는 AP 소프트웨어를 사용하였으며, 그것은 MAP에 접속하는 클라이언트에 대한 접속제어와 승인된 클라이언트만 접속할 수 있도록 해주는 승인 제어 기능을 한다.

리눅스 커널에 있는 메쉬 본딩 모듈은 하나 이상의 메쉬 인터페이스들이 하나의 IP주소만을 이용하여 데

이터 통신이 가능하도록 해준다. 또한 이 모듈은 AP 인터페이스와 메쉬 인터페이스 사이의 데이터 통신이 가능하도록 해주며, 다른 메쉬 라우터에 연결된 클라이언트와의 통신도 가능하게 해준다. 메쉬 본딩 모듈은 NAT로부터 온 패킷의 목적지 노드에 대한 라우팅 경로를 가진 메쉬 인터페이스가 있으면 해당 인터페이스로 그 패킷을 전달하고, 라우팅 경로를 가진 메쉬 인터페이스가 없으면, 그 패킷의 목적지 노드에 대한 경로를 생성하기 위하여 모든 메쉬 인터페이스로 경로 생성을 위한 명령을 전달한다. 그 후 경로가 생성되면, 해당 인터페이스로 그 패킷을 전달한다. 또한 메쉬 인터페이스로부터 온 패킷을 NAT로 전달한다.

리눅스 커널에 구현된 NAT 모듈은 메쉬 본딩 모듈, AP인터페이스, 그리고 리눅스 TCP/IP 스택을 연결하고 상호간의 데이터 교환 기능을 한다. NAT 모듈은 리눅스 NAT 모듈을 그대로 사용하였다. NAT 모듈의 첫 번째 기능은 AP 인터페이스로부터 온 패킷의 목적지를 결정하는 것이다. 이 모듈은 해당 패킷의 목적지가 자신이면, 리눅스 TCP/IP 스택으로 패킷을 전달하고, 그렇지 않으면, 그 패킷에 포함되어 있는 소스 IP정보와 메쉬 네트워크 내부의 노드와 외부 노드 사이의 전송 계층 연결정보를 NAT\_table에 저장하고, 메쉬 본딩 모듈로 패킷을 전달한다. 다음으로 이 모듈은 본딩 모듈로부터 온 패킷에 대한 목적지를 정보를 NAT\_table에 저장된 정보를 이용하여 얻어오고, 해당 패킷의 목적지가 자신이면, 리눅스 TCP/IP 스택으로 패킷을 전달하고, 이 패킷의 목적지가 AP인터페이스면, NAT\_table에 저장된 정보를 이용하여 이 패킷의 목적지 IP주소를 변경하고, 패킷을 AP 인터페이스로 전달한다. 마지막으로 이 모듈은 리눅스 TCP/IP 스택으로부터 온 패킷의 목적지를 결정하고, 이 패킷을 해당 목적지로 가기 위한 모듈로 전달한다.

메쉬 인터페이스는 패킷을 수신하면, 그 패킷의 목적지 MAC주소를 확인한다. 만약, 목적지 MAC주소가 자신의 MAC주소이면, 이 패킷의 정보를 메쉬 본딩 모듈로 전달하고, 그렇지 않으면, MAC 라우팅 테이블을 확인하여 다른 메쉬 인터페이스로 패킷을 전달한다.

이러한 모듈을 이용하여 메쉬 라우터는 멀티 채널 멀티 인터페이스 통신을 지원한다. 또한 메쉬 라우터는 클라이언트간의 데이터 통신도 지원한다. 클라이언트간의 통신을 지원하기 위하여 메쉬 라우터는 리눅스 커널에서 제공하는 포트 포워딩 기능을 사용한다. 그러나, 포트 포워딩을 사용하는 경우 클라이언트간의 양방향 데이터 통신을 위해 클라이언트가 접속된 모

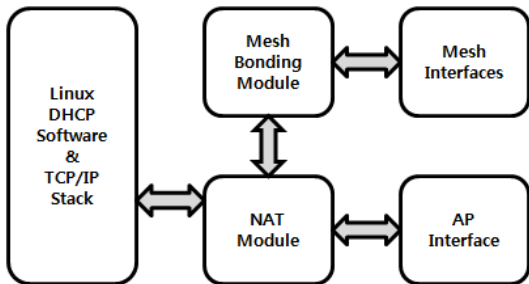


그림 5. 멀티 채널 멀티 인터페이스를 구현하기 위한 메쉬 라우터의 소프트웨어 구조

든 메쉬 라우터에 포트 포워딩 설정을 해야 하는 불편함이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 Mesh 망과 AP망을 하나의 서브넷으로 묶는 Global DHCP가 필요하며, 이에 대한 연구는 현재 진행 중이다.

#### IV. 메쉬 라우터의 성능 평가

본 논문과 관련된 모든 실험은 부산대학교에 있는 대운동장 테스트베드에서 진행하였다. 네트워크 성능 검증 실험과 다중 경로 라우팅 성능 검증 실험을 위해 본 논문에서 개발한 메쉬 라우터를 사용하여 대운동장에 테스트 베드를 구축하였다. 테스트 베드에는 그림 6에서 보는 바와 같이 총 12대의 mesh router가 사용되며, 각각 54Mbps 대역폭을 가지는 4개의 무선 인터페이스를 탑재하고 있다. 4개의 무선 인터페이스 중 3개는 5GHz 주파수대역을 사용하며, mesh network을 이용한 라우터들간의 통신에 사용된다. 나머지 하나의 무선 인터페이스는 2.4GHz 주파수대역을 사용하며, 클라이언트를 위한 AP 서비스를 제공한다. 각각의 메쉬 라우터는 지향성 안테나 또는 전 방향 안테나를 사용하여 서로 통신을 한다. 게이트웨이 노드는 100Mbps 유선 네트워크 인터페이스를 가지고 있으며, 인터넷 서비스를 위한 모든 데이터는 이 노드를 통해 외부 망으로 전송된다. 이 노드는 과기동(Research Center)에 설치 되어있다. 지향성 안테나를 사용하는 라우터들간의 최대거리리는 약 140m정도이다.

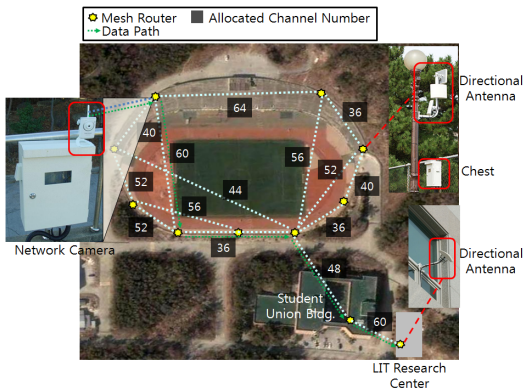


그림 6. 메쉬 네트워크 테스트베드

##### 4.1 대역폭 및 latency

테스트 베드의 성능을 측정하기 위하여 1홉부터 5홉까지의 AP인터페이스를 통한 클라이언트 서비스 대역폭을 측정하였다. 성능 측정 실험을 위한 측정 소프트웨어는 network testing tool인 Iperf<sup>[10]</sup>를 사용하

였다. 그리고 성능 측정을 위한 서버와 클라이언트 컴퓨터는 고성능 노트북을 사용하였다.

표 1은 1홉과 5홉에서의 성능을 비교한 표이다. TCP대역폭을 살펴보면, 1홉에서는 27.7Mbps이고, 5홉에서는 23.8Mbps로 홉의 수가 증가하여 멀티 홉 통신을 함에도 불구하고 대역폭 감소가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 그 이유는 멀티 채널 멀티 인터페이스를 사용함으로써 링크들간의 간섭이 최소화되었기 때문이다. 그리고 latency도 1홉에서 1.5ms, 5홉에서 2.4ms로 매우 작다. 다음으로 UDP 데이터 통신의 경우, 홉이 증가하여도 28Mbps정도의 일정한 대역폭을 보이며, 패킷 손실률 또한 1홉에서 0.0006%, 5홉에서 0.033%로 매우 작다. 또한 데이터 전송 대역폭이 1Mbps에서 8Mbps까지 변할 때의 평균 지터값은 5홉에서 0.547ms로 작다. 따라서 메쉬 네트워크 테스트 베드는 지터 변화에 민감한 실시간 영상 스트리밍 서비스를 지원할 수 있다.

표 1. 1 홉과 5 홉에서의 성능 비교

	1 홉	5 홉
TCP 대역폭 (Mbps)	27.7	23.8
Latency (ms)	1.5	2.4
UDP 대역폭 (Mbps)	28	28
패킷 손실률 (%)	0.0006	0.033

##### 4.2 다중 경로 라우팅 실험

단일 경로 라우팅과 다중 경로 라우팅의 성능은 경로 복구로 인해 발생하는 경로 형성 메시지 오버헤드와 경로 복구 지연 시간으로 비교하였다. 단일 경로 라우팅의 경우, 어떤 노드로의 경로가 끊길 때 마다 새로운 경로를 생성하기 위하여 경로 형성을 위한 메시지를 주고받는다. 그러나 다중 경로 라우팅의 경우, 처음 경로를 생성할 때, 미리 여러 경로를 만들고, 어떤 노드로의 경로가 끊기면, 즉시 예비 경로로 대체한다. 이러한 이유로 단일 경로 라우팅과 다중 경로 라우팅의 경로 형성 메시지 오버헤드 차이가 발생한다.

표 2는 경로가 끊겼을 때, 단일 경로 라우팅과 다중 경로 라우팅 모듈이 전송한 경로 형성 메시지 오버헤드를 비교한 것이다. 경로 형성 메시지의 오버헤드는 초기 경로를 생성할 때부터 총 2번의 경로 단절이 발생할 때까지 전송된 경로 형성 메시지의 개수를 누적하였다.

단일 경로 라우팅은 경로가 끊어질 때마다 새로운 경로를 생성하기 위한 경로 형성 메시지를 전송한다.

표 2. 경로 형성 메시지 오버헤드 비교

	단일 경로 라우팅 알고리즘(패킷 수)	다중 경로 라우팅 알고리즘(패킷 수)
경로 생성 후	18	24
첫 번째 경로 단절 후	33	24
두 번째 경로 단절 후	49	40

따라서 표 1에서 보는 바와 같이, 초기에 경로가 생성된 이후로도 꾸준히 경로 형성 메시지의 수가 증가한다. 반면에 다중 경로 라우팅은 경로가 끊어져도 새로운 경로를 생성하기 위한 경로 형성 메시지를 전송하지 않는다. 따라서 한 번의 경로 단절 이후에도 경로 형성 메시지 개수에 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이와 같이 다중 경로 라우팅을 사용함으로써 경로 단절로 인한 경로 형성 메시지 오버헤드를 줄일 수 있다. 다중경로 라우팅의 경우, 두 번째 경로 단절이 발생하면, 경로 형성 메시지를 전송하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 테스트베드에서 AOMDV가 생성할 수 있는 다중 경로의 개수는 최대 2개이다. 따라서 두 번 이상의 경로 단절이 발생하면, AOMDV는 초기에 형성한 모든 경로가 단절되었으므로 형성 메시지를 전송한다. 그리고 다중 경로 라우팅이 초기 경로 형성을 위한 메시지 수가 조금 더 많은 이유는 단일 경로 라우팅보다 다중 경로를 생성하기 위해 더 많은 RREP를 전송하기 때문이다.

다음으로 경로 복구 시간 차이는 다음과 같다. 메쉬 라우터가 무선 링크 단절을 인지하는 데 걸리는 시간은 무선 인터페이스의 비콘 주기를 100ms로 했을 때 평균 237ms이다. 경로가 단절 되었을 때, 단일 경로 라우팅이 새로운 경로를 생성하는데 걸리는 시간은 평균 30.3ms이다. 다중 경로 라우팅의 경우 경로가 단절되어도 대체 경로를 즉시 사용한다. 따라서, 단일 경로 라우팅과 다중 경로 라우팅의 경로 생성 시간 차이는 30.3ms이다. 경로 복구 시간은 무선 링크 단절 인지 시간과 대체 경로 생성시간의 합이다. 따라서 다중 경로 라우팅은 단일 경로 라우팅에 비해 경로 복구 시간을 12.73% 개선하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존의 유선 네트워크 인프라를 구축하는 것보다 저비용으로 빠르게 네트워크 인프라를 구축할 수 있는 메쉬 라우터를 개발하였다. 이 메쉬

라우터는 기존의 싱글 채널 싱글 인터페이스 구조가 아닌 멀티 채널 멀티 인터페이스 구조를 구현하였다. 이 메쉬 라우터의 라우팅 모듈에 IEEE 802.11s 표준에 정의 되어 있는 AODV 기반 단일 경로 라우팅 알고리즘을 구현하였다. 그러나, IEEE 802.11s 표준에는 단일 경로 라우팅 알고리즘만이 정의되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 AOMDV 기반 다중 경로 라우팅 알고리즘을 구현함으로써 단일 경로 라우팅 알고리즘에 12.73%의 경로 복구 시간을 단축했다. 이 메쉬 라우터의 TCP 데이터 전송 대역폭 5홉기준 23.8Mbps이며, end-to-end 지연 시간은 2.4ms이다. 또한, UDP 데이터 전송 대역폭은 홉수 증가에 관계없이 평균 28.6Mbps이며, 홉수가 증가함에 따라 UDP 손실률만 증가한다. 이 메쉬 라우터는 전송 대역폭이 1Mbps에서 8Mbps인 경우, 평균 지터가 0.547ms이다. 일반적인 VGA 크기의 실시간 영상 스트리밍 서비스에 대하여 원활한 데이터 전송이 가능하다.

## 참 고 문 헌

- [1] I.F. Akyildiz, X. Wang and W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey," *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol.47, Issue 4, pp.445-487, Mar. 2005.
- [2] IEEE, "Draft amendment for mesh networking," *IEEE 802.11s Draft 1.06*, Jul. 2007.
- [3] Torregoza, J.P.M. and Won-Joo Hwang, "Multi-channel Multi-Transceiver Routing Protocol for Wireless Mesh Network," *Advanced Communication Technology, The 9th International Conference*, Vol.1, 12-14, pp.488, Feb. 2007.
- [4] Shrestha, D.M. and Young-Bae Ko, "Enhanced Topology Formation Protocol for IEEE 802.11 WLAN based Mesh Networks," *Communication Systems Software and Middleware, COMSWARE 2007 2nd International Conference*, 7-12, pp.1-5, Jan. 2007.
- [5] Won-Ju Yoon, Sang-Hwa Chung, Seong-Joon Lee and Yun-Sung Lee, "An Efficient Cooperation of On-demand and Proactive Modes in Hybrid Wireless Mesh Protocol," *The 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp.52-57, Oct. 2008.
- [6] Faccin, S.M., Wijting, C., Kenckt, J. and



Damle, A., "Mesh WLAN networks: concept and system design," *Wireless Communications*, IEEE Vol.13, Issue 2, pp.10-17, April 2006.

[7] C.E. Perkins, E.M. Belding-Royer and S. Das, "Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing," *IETF RFC 3561*, July 2003.

[8] Gateworks GW2348-4 [Online] <http://www.gateworks.com/products/avila/gw2348-4.php>

[9] Madwifi [Online] <http://www.madwifi.org/>

[10] Iperf [Online] <http://sourceforge.net/projects/iperf>

[11] IEEE, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements," *IEEE 802.11*, 2007.

[12] S. Mueller, R. P. Tsang and D. Ghosal, "Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges," *Performance Tools and Applications to Networked Systems*, Vol. 2965 of LNCS, 2004.

[13] S. J. Lee and M. Gerla, "AODV-BR: Backup Routing in Ad hoc Networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, September 2000.

[14] Z. Ye, S. V. Krishnamurthy and S. K. Tripathi, "A Framework for Reliable Routing in Mobile Ad Hoc Networks," *INFOCOM 2003 Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. IEEE, Vol.1, pp.270-280, 2003.

[15] M. K. Marina, S. R. Das, "On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks," *Proceedings of the 9th International Conference on Network Protocols*, pp. 14-23, November 2001.

[16] S. Adibi and S. Erfani, "A Multipath Routing Survey for Mobile Ad-Hoc Networks," *Consumer Communications and Networking Conference*, 2006.

[17] MIT Roofnet [Online] <http://pdos.csail.mit.edu/roofnet/doku.php>

[18] Heecheol Song, Bong Chan Kim, Jae Young Lee and Hwang Soo Lee, "IEEE 802.11-based Wireless Mesh Network Testbed," *IST Mobile*

and *Wireless Communications Summit*, 2007.

[19] IEEE 802.11s [Online] [http://www.ieee802.org/11/Reports/tgs\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgs_update.htm)

김 정 수 (Jeong-Soo Kim)

정회원



2006년 2월 부산대학교 전자전  
기 정보 컴퓨터공학부 졸업  
2008년 2월 부산대학교 컴퓨터  
공학과 석사  
2008년 3월~현재 부산대학교  
컴퓨터 공학과 박사과정  
<관심분야> 임베디드 시스템,  
무선메쉬 네트워크, IEEE 802.11 MAC

정 상 화 (Sang-Hwa Chung)

종신회원

한국통신학회논문지, 제35권, 5호(네트워크 및 서비  
스) 참조

최 희 진 (Hee-Jin Choi)

정회원



2008년 2월 부산대학교 전자전  
기 정보 컴퓨터공학부 졸업  
2010년 2월 부산대학교 컴퓨터  
공학과 석사  
2010년 3월~현재 농협중앙회  
IT본부분사 재직  
<관심분야> 임베디드 시스템,  
무선 메쉬 네트워크