

에드혹 네트워크에서 다중 데이터율을 고려하는 분산 패킷 스케줄링

준회원 노 권 문*, 진 영 천* 정회원 유 상 조**

A Multi-Rate Aware Distributed Packet Scheduling in Ad-hoc Networks

Kwen-Mun Roh*, Yong-qian Chen* *Associate Members,*
Sang-Jo Yoo** *Regular Member*

요 약

에드혹 네트워크에서 패킷 스케줄링 기법들은 대부분 처리량에 기반한 공정성(throughput-based fairness)를 제공한다. 처리량 기반 공정성을 제공하기 위해 기본적으로 가정하는 것은 채널 용량이 고정되어 있다는 것이다. 그러나 DCF(Distributed Coordination Function)를 제공하여 에드혹 네트워크를 구성하는데 대중적인 방법으로 사용하는 IEEE 802.11b와 802.11g는 채널 상태에 따라 다양한 데이터율을 적용할 수 있기 때문에, 채널 용량이 고정되어 있다는 가정은 실제 환경에서 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 다중 데이터율을 고려하기 위한 플로우별 시간 기반 공정성(time-based fairness)를 정의하고, 정의한 시간 기반 공정성을 달성하는 패킷 스케줄링 기법(MRADPS: Multi-Rate Aware Distributed Packet Scheduling)을 제안한다. 시뮬레이션 결과는 MRADPS가 정의한 시간 기반 공정성을 달성하면서 다중 데이터율을 제공하는 에드혹 네트워크의 전체 처리량을 크게 향상시키는 것을 보여준다.

Key Words : Packet scheduling, Ad-hoc networks, Multi-rate, Time-based

ABSTRACT

In ad-hoc network, the most of existing packet scheduling schemes provides throughput-based fairness. To provide throughput-based fairness, it basically supposes that the channel capacity is fixed. But, the supposing that the channel capacity is fixed is not appropriate because IEEE 802.11b and 802.11g which are normally used for organizing ad-hoc network can provide various data rate according to channel conditions. So, we define time-based fairness for each flow to consider multi-rate and suggest the MRADPS reaching the defined time-based fairness. Simulation result shows that MRADPS improves the total network throughput in ad-hoc network with providing time-based fairness to each flow.

I. 서 론

에드혹 네트워크는 고정된 기반망의 도움 없이

이동 단말기들로만 손쉽게 자율적으로 망을 구성하여 긴급 구조나 전쟁터 등에서 무선 데이터 서비스를 제공할 수 있는 자율성과 융통성을 부여한 무선

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2005-C1090-0502-0030).

* 인하대학교 정보통신대학원 멀티미디어 통신망연구실 (rkm21@naver.com, chen.yongqian@gmail.com),

** 인하대학교 정보통신대학원 교수 (sjyoo@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-03-118, 접수일자 : 2006년 3월 12일, 최종논문접수일자 : 2006년 6월 28일

네트워크이다. 에드혹 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 저전력 구현등의 이유로 도달 거리가 제한되므로 중간 노드로서 데이터 전달 기능을 가지며, 배터리를 사용하므로 에너지의 공급이 일정치 않은 특성을 갖는다.

기존 IEEE 802.11은 하나의 데이터율인 2Mbps를 제공하지만, 상업적인 성공을 거둔 IEEE 802.11b^[1]는 1, 2, 5.5, 11Mbps의 데이터율을 제공하고 IEEE 802.11g^[2]는 6, 9, 12, 18, 24, 36, 54Mbps의 데이터율을 각 표준의 물리 계층에서 제공하고 있다. 이러한 다중 데이터율을 에드혹 네트워크에서 이용하고자 하는 노력은 라우팅 관련 연구^[3]에서 부터 시작되었고, 최근에 다중 데이터율을 제공하는 에드혹 네트워크에서 성능 분석 연구^[4,5]가 이루어졌다. 그러나, 에드혹 네트워크에서의 패킷 스케줄링 연구에 있어서 다중 데이터율을 고려하는 연구는 거의 이루어지지 않았다. 그 이유는, 처리량 기반 공정성 (throughput-based fairness)를 제공하기 위해서 SFQ, WFQ등과 같이 유선에서의 공정 큐잉방식을 에드혹 패킷 스케줄링에 적용했기 때문이다. 이러한 패킷 스케줄링 기법의 기본 가정은 채널 용량이 고정되어 있는 것이다. 따라서, 다중 데이터율이 제공되는 환경에서 채널 용량을 고정시키기가 쉽지 않기에, 에드혹 패킷 스케줄링 연구에서 다중 데이터율을 제공하는 환경을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 라우팅 관련 연구와 같이 다중 데이터율을 에드혹 패킷 스케줄링에 효율적으로 이용할 수 있다면, 자원 사용률과 전체 네트워크의 처리량이 향상될 것이라 예상했고, 다중 데이터율을 고려하기 위하여 새로운 공정성 모델인 플로우별 시간 기반 공정성(time-based fairness)을 정의하였다. 또한 정의한 공정성을 달성하는 패킷 스케줄링 기법인 MRADPS(Multi-Rate Aware Distributed Packet Scheduling)를 제안한다. 이 MRADPS는 대표적인 에드혹 패킷 스케줄링인 EMLM-FQ^[6]를 수정하여 구현되었기 때문에, EMLM-FQ의 특징인 분산된 플로우 정보를 가지고 스케줄링을 결정하는 방법과 공간적 채널 재사용 방법을 제공한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 IEEE 802.11b에서 제공하는 다중 데이터율과 기존 에드혹 패킷 스케줄링 관련 연구를 살펴보고, 제 3장에서 새롭게 제안하는 플로우별 시간 공정성과

다중 데이터율을 고려한 분산 패킷 스케줄링 기법인 MRADPS를 설명한다. 제 4장에서는 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 패킷 스케줄링의 성능을 평가하고, 마지막으로 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1 IEEE 802.11b WLAN과 다중 데이터율 적응 기법

IEEE 802.11 WLAN은 DCF(Distributed Coordination Function) 모드를 제공하고 있기 때문에 에드혹 네트워크를 위한 테스트 베드와 시뮬레이션에 널리 사용하고 있는 무선 LAN의 표준이다. IEEE 802.11은 1Mbps와 2Mbps의 데이터율을 제공하지만, 사용자들의 보다 높은 데이터율의 요구로 인해 IEEE 802.11b가 제정되었다. IEEE 802.11b는 물리계층에서 2.4GHz 대역을 사용하여 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 방식으로 동작하며 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps, 11Mbps과 같이 보다 높은 데이터율을 제공한다. 이러한 다중 데이터율에 관한 명세는 물리계층에 정의되어 있고, 매체 접근 제어(Media Access Control, MAC)계층에서 제어된다^[1].

IEEE 802.11b에서 정의한 다중 데이터율을 이용하는 데이터율 적응 기법(rate adaptation scheme)의 대표적인 방법은 Lucent사의 WaveLan-II 제품의 ARF(Auto Rate Fallback) 기법^[7]과 RBAR(Receiver Based AutoRate) 프로토콜^[8]이 있다. ARF 기법은 송신 노드가 이전 데이터 패킷 전송 시 얻어진 정보를 기반으로 데이터율을 선택하며 데이터 전송의 연속적인 성공 또는 실패 이후에 데이터율을 증가시키거나 감소시켜서 데이터를 전송하는 기법이다. RBAR 프로토콜은 수신 노드가 RTS와 CTS프레임 교환 과정 동안에 데이터 프레임을 전송하기 위한 적절한 데이터율을 선택해서 송신 노드에게 공지하는 방식이다. 송신 노드가 데이터 전송을 위해 RTS 프레임을 수신 노드에게 전송하면 수신 노드는 SNR 값을 측정하고, 데이터 전송을 위한 데이터율을 선택한다. 그리고 수신 노드가 선택한 데이터율을 CTS 프레임 안에 포함하여 전송한다. CTS 프레임을 받은 전송 노드는 CTS 프레임에 명시된 데이터율로 데이터 프레임을 전송한다. RBAR 프로토콜은 수신 노드에서 데이터율을 결정하기 때문에 송신 노드에서 데이터율을 결정하는 ARF 기법보다 급변하는 무선 채널 상태를 잘 반영할 수 있다. 따

라서, ARF 기법보다 정확한 데이터를 결정할 수 있다. 본 논문에서는 다중 데이터를 적응 기법으로 RBAR 프로토콜을 기반으로 한다.

2.2 에드혹 네트워크에서의 패킷 스케줄링

에드혹 네트워크에서 대부분의 패킷 스케줄링 연구^{6, 9-12)}는 처리량에 기반한 공정성을 제공한다. 처리량 기반 공정성을 제공하는 스케줄링 방식은 TDMA 기반 에드혹 네트워크를 위해 제안된 credit-based 공정 스케줄링 기법^{10, 11)}과 timestamp-based 공정 스케줄링 기법^{6, 9)} 두 가지로 나눌 수 있다.

이러한 에드혹 네트워크 환경에서의 패킷 스케줄링을 설계할 때, 다음과 같은 설계상의 쟁점을 고려해야 한다.

- 1) 위치 종속적 경쟁 - 무선 데이터 전송은 지역적으로 브로드캐스팅이기 때문에, 공유하는 채널에 대한 경쟁은 위치 종속적이다. 예를 들어 그림 1의 노드 그래프와 같이 5개의 노드($N_i, i = 0, \dots, 4$)가 있고, 4개의 플로우($F_j, j = 0, \dots, 3$)가 있을 때, 플로우간 경쟁관계를 그림 2과 같이 플로우 경쟁 그래프로 변환할 수 있다. 그림 2에서 각 꼭지점은 플로우를 나타내고, 각 간선은 플로우들 사이의 경쟁 관계를 나타낸다. F_0 는 F_1 과 F_2 와 경쟁 관계에 있지만, F_3 와는 직접적으로 경쟁관계에 있지 않다. 따라서 F_0 와 F_3 는 동시에 서비스 받을 수 있다. 이와 비슷하게 F_1 은 F_0, F_2, F_3 와 경쟁관계에 있다. 이처럼 플로우들 사이에서 경쟁관계에 있는 플로우들의 집합은 플로우의 위치에 따라서 다르다. 또한 F_0 와 F_3 와 같이 직접 경쟁관계에 있지 않는 플로우들은 동시에 서비스 받을 수 있지만, 이는 경쟁관계에 있는 플로우들 사이에서 엄격한 공정성을 제공하기 위해서는 한 순간에 하나의 플로우만 서비스를 받아야 하기 때문에 두 개의 플로우(F_0, F_3)가 직접적으로 경쟁 관계에 있지 않아서 서비스 된다면, 공정성을 훼손하는 문제가 발생한다. 하지만, 동시에 서비스 될 수 있는 플로우들 중 하나만 서비스 한다면, 네트워크의 처리량을 감소시키는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 공간적 채널 재사용 문제라 한다.

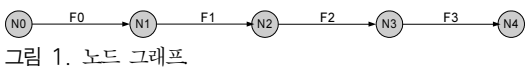


그림 1. 노드 그래프

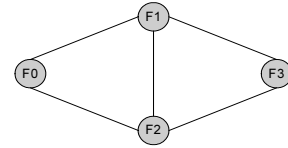


그림 2. 플로우 경쟁 그래프

- 2) 에드혹 스케줄링의 분산된 속성 - 유선 네트워크나 셀룰러 네트워크에서 각 라우터나 스위치, 기지국은 패킷 스케줄링을 결정할 때, 모든 플로우에 대한 정확한 정보를 가지고 있다. 하지만, 에드혹 네트워크에서는 경쟁관계에 있는 플로우가 각 다른 송신 노드에서 발생할 수 있고, 각 송신 노드에서는 다른 송신 노드의 플로우 정보를 직접적으로 접근 할 수 없다. 이는 에드혹 네트워크에서 패킷 스케줄링을 설계할 때, 분산되어 있는 플로우 정보를 이용하여 계산해야 하는 문제를 포함하고 있음을 나타낸다.

위와 같은 디자인 이슈들을 고려하여 제안된 대표적인 패킷 스케줄링은 [6]의 MLM-FQ(Maximize-Local-Minimum Fair Queueing)과 EMLM-FQ(Enhanced-Maximize-Local-Minimum Fair Queueing)이다. 이 두 기법에서 서비스 태그의 할당 방법으로 가상 시간(virtual time)계산의 편리성을 위해서 SFQ(Start-Time Fair Queueing)를 이용한다. MLM-FQ는 분산된 에드혹 환경에서 경쟁 그래프에 연결된 모든 플로우들 중에서 한 순간에 하나의 플로우만 서비스 되도록 한다. MLM-FQ에서 각 플로우가 받는 최소 서비스의 양은 다음과 도식화 된다.

$$W_f(t_1, t_2) \geq C \frac{r_f}{k \sum_{g \in N} r_g} (t_2 - t_1) - \alpha \quad (1)$$

여기서 $W_f(t_1, t_2)$ 는 플로우 f 가 시간 t_1 부터 t_2 까지 받은 서비스의 양을 나타낸다. C 는 채널 용량이고, r_f 와 r_g 는 각각 플로우 f 와 g 의 가중치이며, N 은 플로우 경쟁 그래프에서 연결된 모든 플로우들의 집합이다. k 와 α 는 위치 종속적 상수이다.

EMLM-FQ는 공간적 채널 재사용 방법을 제공하기 위해서 MLM-FQ에 백오프 값을 설정하는 방법을 추가함으로써, 직접적으로 경쟁관계에 있지 않는 플로우들인 F_0 와 F_3 가 동시에 서비스 될 수 있도록 하는 메커니즘을 제공한다. 따라서 EMLM-FQ는 MLM-FQ보다 높은 네트워크 처리량을 달성한다. EMLM-FQ의 각 플로우가 받는 최소 서비스의 양

은 다음과 같이 도식화 된다.

$$W_f(t_1, t_2) \geq C \frac{r_f}{k \sum_{g \in S} r_g} (t_2 - t_1) - \alpha \quad (2)$$

여기서 S 는 플로우 경쟁 그래프에서 플로우 f 와 직접 연결되어 있는 플로우들의 집합이다.

III. 다중 데이터물을 고려한 분산 패킷 스케줄링

에드혹 네트워크의 IEEE 802.11x 물리 계층에서의 예와 같이 각 단말은 채널 상태에 따라 다중 데이터물을 제공하기 때문에 기존 에드혹 네트워크의 패킷 스케줄링 연구에서 채널 용량이 고정 되어 있다는 기본 가정이 실제 환경에 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 본 논문에서는 먼저 다중 데이터물을 고려하여 플로우별 시간 기반 공정성을 정의하고, 정의한 시간 기반 공정성을 달성하는 새로운 분산된 패킷 스케줄링 기법을 제안한다.

다중 데이터물을 고려한 패킷 스케줄링 기법은 Godfrey Tan과 John Guttag가 처음 제안하였다. 이들이 제안한 패킷 스케줄링 기법인 TBR^[14](Time-Based Regulator)는 다중 데이터물을 제공하는 IEEE 802.11b 무선 네트워크의 인프라스트럭처 모드에서 한 셀 안의 채널을 공유하는 모든 노드들이 채널 점유 시간을 공유한다. 이 TBR 기법은 플로우별 채널 점유 시간에 대한 공정성을 제공하는 것이 아니라, 노드별로 시간 공정성을 제공하고 라운드 로빈(RR: Round Robin) 방식을 이용하여 인프라스트럭처 모드에서 작동하기 때문에, 분산된 에드혹 네트워크 환경에 적합하지 않다. 본 장에서 다중 데이터물을 제공하는 에드혹 네트워크에서 플로우별 시간 공정성을 제공하는 분산된 에드혹 패킷 스케줄링인 MRADPS(Multi-Rate Aware Distributed Packet Scheduling)을 제안한다.

3.1 네트워크 모델

본 논문은 물리계층과 MAC 계층에서 다중 데이터물을 제공하는 환경과 모든 노드들이 동일한 채널을 공유하는 다중 홉의 무선 에드혹 네트워크를 고려한다. 또한, 전송 노드의 전송 범위 안에 있는 노드만이 패킷을 받을 수 있다. 단일 플로우는 단일 전송 노드로부터 단일 수신 노드까지 전송되는 일련의 패킷 스트림으로 정의한다.

본 논문은 MAC 계층으로 CSMA/CA^[1, 15] 패러다임과 다중 데이터물 적응 기법으로 RBAR 프로

토콜^[8]을 따른다. 또한, 본 논문은 관련 연구들^[9-11]과 같이 다음과 같은 3가지 기본 가정을 갖는다.

- 1) 무선 매체는 페이딩, 간섭, 링크 에러, 충돌과 같이 네트워크 사용자에게 영향을 미치는 시간-가변적인 에러를 나타낸다. 본 논문에서는 단지, 충돌에 의해 발생하는 에러만 고려한다.
- 2) 하나의 노드는 동시에 패킷을 전송하거나, 수신할 수 없다.
- 3) 노드의 이동성은 고려하지 않는다.

3.2 시간 기반 공정성(Time-Based Fairness)

기준에 제안된 에드혹 패킷 스케줄링은 플로우들 간에 처리량 기반 공정성을 제공하기 위하여 SFQ(Start-Time Fair Queuing)과 같은 유선에서의 패킷 스케줄링을 기반으로 한다^[6, 9]. 이러한 처리량 기반 공정성은 플로우별 가중치에 따라 각 플로우가 받는 전체 서비스의 양이 동일함을 의미한다. 반면, 시간 기반 공정성(time-based fairness)는 각 플로우가 사용하는 전체 채널 점유 시간이 동등함을 의미한다.

그림 3의 노드 그래프에 대해 그림 4와 같이 네트워크의 모든 플로우가 직접적인 경쟁 관계에 있을 때, 그림 5은 처리량 기반 공정성을 제공하는 EMLM-FQ^[6]와 본 논문에서 제안하는 시간 기반 공정성을 제공하는 패킷 스케줄링 기법에 대한 각 플로우의 서비스 순서와 채널 점유 시간을 나타낸다. 각 플로우가 갖는 패킷 사이즈와 가중치가 동일하다고 가정하고, 각 플로우의 초기 서비스 태그는 $F_0 < F_1 < F_2$ 이다. 그림 4와 같이 모든 플로우가 직접적인 경쟁관계에 있으면, EMLM-FQ는 F_0, F_1, F_2 순서대로 각 플로우의 패킷을 서비스한다. 시간 기반 공정성을 제공하는 경우 각 플로우가 점유하

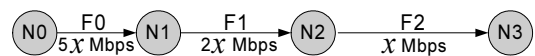


그림 3. 다중 데이터물을 제공하는 노드 그래프

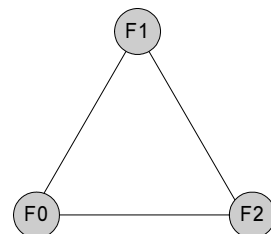


그림 4. 플로우 경쟁 그래프

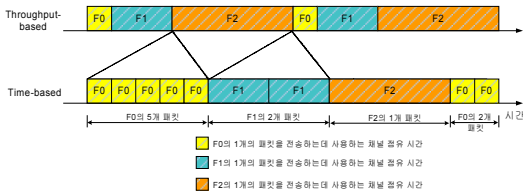


그림 5. 처리량 기반 공정성과 시간 기반 공정성에 대한 각 플로우의 서비스 순서와 채널 점유 시간 비교

는 채널 시간이 공정해야 함으로, 데이터률이 가장 낮은 F2가 하나의 패킷을 전송할 때 사용하는 채널 점유 시간을 기준으로 각 플로우가 동일한 채널 점유 시간을 갖도록 한다. 그림 5와 같이 처리량 기반 공정성을 제공할 때, 6개의 패킷이 서비스 되는 시간 동안에 시간 기반 공정성을 제공할 때는 10개의 패킷을 서비스 할 수 있다. 즉, 네트워크 처리량이 약 40% 향상된다.

하지만, 실제로 하나의 패킷을 전송하는데 제어 프레임(RTS,CTS,DS,ACK)을 전송하는데 걸리는 시간과 충돌이 발생했을 때, 재전송에 사용되는 시간 등의 이유로 채널 점유 시간은 각 플로우의 데이터률에 따라 정확히 비례하지 않는다. 본 논문에서는 계산의 단순함을 위해서, 각 플로우가 보장 받아야 하는 채널 점유 시간을 플로우의 데이터률에 따라 계산하고, 시뮬레이션을 통해 각 플로우의 실제 채널 점유 시간을 측정하고 비교한다. 채널 점유 시간 계산 방법은 다음 장에서 설명한다. 본 논문에서는 다중 데이터물을 제공하는 환경에서 패킷 스케줄링 기법이 처리량 기반 공정성과 시간 기반 공정성 사이에서 어떤 공정성을 제공하는 것이 옳다고 주장하는 것이 아니라, 처리량 기반 공정성을 기반으로 하는 패킷 스케줄링 기법에서 전체 네트워크 처리량이 시간 기반 공정성을 제공할 때 보다 현저하게 떨어지는 비효율성을 개선하는 방법을 제안한다.

각 플로우 f 의 채널 점유시간($T(f)$)은 다음과 같이 정의한다.

$$T(f) = \frac{s_f}{\sum_{i \in F} \frac{s_i}{d_i}} \quad (3)$$

F 는 플로우 경쟁 그래프에 존재하는 모든 플로우들의 집합이고, s_f 는 플로우 f 의 패킷 사이즈, d_f 는 플로우 f 의 데이터률이다. $T(f)$ 는 F 의 모든 플로우가 하나의 패킷을 서비스 하는데 사용하는 채널 점유 시간에서 f 가 하나의 패킷을 서비스 하는



그림 6. EMLM-FQ(xMbps)와 시간 기반 공정성에 대한 각 플로우의 서비스 순서와 채널 점유 시간 비교

데 사용하는 채널 점유 시간이 차지하는 비율을 나타낸다. 채널이 항상 이용 중이라고 가정하면, 플로우의 전체 채널 점유 시간은 다음과 같이 정의한다.

$$\sum_{f \in F} T(f) = 1, 0 \leq T(f) \leq 1 \quad (4)$$

경쟁하는 플로우들의 가중치가 동일하다고 가정하면, 시간 기반 공정성에 입각해서 각 플로우가 보장 받아야 하는 채널 점유 시간($GT(f)$, Guaranteed Time)는 다음과 같이 정의 한다. d_{\min} 은 플로우 경쟁 그래프에서 연결된 플로우들 중 가장 낮은 데이터률을 갖는 플로우의 데이터률이다.

$$GT(f) = \frac{\frac{s_f}{d_{\min}}}{\sum_{i \in F} \frac{s_i}{d_{\min}}} \quad (5)$$

경쟁 그래프의 모든 플로우의 패킷 사이즈가 동일하다고 가정하면 $GT(f)$ 는 다음과 도식화 된다.

$$GT(f) = \frac{1}{\frac{d_{\min}}{N}} = \frac{1}{N} \quad (6)$$

N 은 경쟁 그래프에서 연결되어 있는 전체 플로우의 수이다. $T(f) \geq GT(f)$ 이면, 플로우 f 는 보장 받을 시간이 존재하지 않고, $T(f) < GT(f)$ 이면, 플로우 f 는 보장 받을 시간이 존재한다. 경쟁 그래프에서 연결된 각 플로우가 보장 받아야 하는 시간은 경쟁 관계에 있는 플로우들 중 가장 낮은 데이터률(d_{\min})을 가진 플로우가 하나의 패킷을 서비스 할 때, 그 플로우가 보내야 되는 패킷의 수로 나타낼 수 있다. 보장 받아야 하는 시간이 존재하는 플로우 f 는 시간 기반 공정성을 달성하기 위해서 f 가 전송해야 하는 패킷 수($P(f)$)는 다음과 같이 정의된다.

$$P(f) = \frac{d_f}{d_{\min}} \quad (7)$$

따라서, 그림 3의 F0는 d_{\min} 을 갖는 F2와 비교하여 시간 기반 공정성을 달성하기 위해서 5개의 패킷을 전송해야 한다. 시간 기반 공정성(TF, Time-Based Fairness)은 다음과 같이 정의 한다.

$$|\alpha_i^t(t_1, t_2) - \alpha_j^t(t_1, t_2)| \quad (8)$$

$\alpha_i^t(t_1, t_2)$ 는 플로우 i 가 시간 t_1 부터 시간 t_2 까지 점유하는 채널 점유 시간이다. 식 (8)의 값이 0에 근접할수록 이상적인 시간 기반 공정성을 제공한다. d_{\min} 을 갖는 플로우 f_{\min} 이 받는 최소 서비스의 양 $W_{f_{\min}}(t_1, t_2)$ 은 EMLM-FQ의 식 (2)에서 정의한 각 플로우가 받는 최소 서비스의 양에서 유도된다. 그 이유는 그림 3에서 모든 플로우의 데이터플이 d_{\min} 이라 가정할 때, EMLM-FQ에서 제공하는 각 플로우의 최소 서비스 양을 본 논문에서 제안하는 MRADPS가 그림 6과 같이 제공하기 때문이다. 예를 들어 MRADPS에서 최소 데이터플을 갖는 F2가 받는 최소 서비스양은 F2의 데이터플이 모든 플로우의 데이터플 일 때, EMLM-FQ에서 F2가 받는 최소 서비스 양과 같다. 따라서 f_{\min} 이 받는 최소 서비스 양($W_{f_{\min}}(t_1, t_2)$)은 다음과 같이 정의 된다.

$$W_{f_{\min}}(t_1, t_2) \geq d_{\min} \frac{r_f}{k \sum_{g \in S} r_g} (t_2 - t_1) - \alpha \quad (9)$$

여기서 r_f 와 r_g 는 각각 플로우 f 와 g 의 가중치이며, S 는 플로우 경쟁 그래프에서 플로우 f 와 직접 연결되어 있는 플로우들의 집합이고 k 와 α 는 각 플로우의 경쟁관계에 따라 정의한 위치 종속적 상수이다. 플로우의 가중치가 동일하다고 가정하면 $W_{f_{\min}}(t_1, t_2)$ 는 다음과 같다. n 은 플로우 경쟁 그래프에서 f 와 직접 연결되어 있는 플로우의 수이다.

$$W_{f_{\min}}(t_1, t_2) \geq d_{\min} \frac{1}{kn} (t_2 - t_1) - \alpha \quad (10)$$

d_{\min} 보다 큰 데이터플을 가진 플로우가 받는 최소 서비스의 양 $W_{f_d}(t_1, t_2)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$W_{f_d}(t_1, t_2) \geq \frac{d_f}{d_{\min}} W_{f_{\min}}(t_1, t_2) \quad (11)$$

3.3 채널 점유 시간의 비교

하나의 패킷 전송하는데 사용되는 채널 점유시간은 IEEE 802.11 MAC 계층에서 하나의 데이터 프

레이플을 전송하는데 요구되는 전체 시간과 같다. 전형적으로 다음과 같은 시간들을 포함한다. 또한, MAC 계층에서는 데이터 프레임의 전송이 실패할 때, 재전송을 시도하기 때문에 채널 점유시간에서 재전송에 걸리는 모든 시간들을 포함해야 한다.

- 1) 데이터 프레임의 전송 시간
- 2) 하나의 데이터 프레임의 성공적인 전송을 끝내기 위해 전송되는 제어 프레임 전송 시간 (RTS, CTS, DS, ACK 전송 시간)
- 3) 데이터 프레임과 제어 프레임(RTS, CTS, DS, ACK)를 전송할 때의 전과 지연 시간
- 4) 전송 노드가 채널에 접근하기 전에 기다리는 프레임 간 유휴 시간(idle time)

3.4 MRADPS의 구현

MRADPS는 각 플로우의 서비스 태그 할당 방법과 서비스 태그 정보에 대한 교환 방법은 EMLM-FQ를 따른다. 하지만, 시간 기반 공정성을 제공하기 위하여 각 플로우의 데이터플에 따라 전송해야 하는 패킷 수를 계산하기 위해서 모든 노드는 인접한 노드들의 플로우에 대한 데이터플 정보를 듣고 자신의 로컬 테이블에 저장하고, 자신의 로컬 테이블에 존재하는 플로우의 데이터플과 비교하여 가장 낮은 데이터플(d_{\min})을 저장하여 데이터 전송 시 제어 프레임(RTS, CTS, DS, ACK)에 포함시켜 전송한다. 만약 로컬 테이블의 d_{\min} 보다 낮은 데이터플에 대한 정보를 듣는다면, 로컬 테이블의 d_{\min} 을 그 데이터플로 저장하고 제어 프레임에 삽입하여 전송한다. 따라서, 경쟁 그래프에 연결된 플로우를 가진 모든 송신 노드는 경쟁하는 플로우 중 가장 낮은 데이터플에 대한 정보를 얻게 된다. 또한, 스케줄링 과정 중에서 d_{\min} 과 송신 노드가 서비스 하려는 플로우의 데이터플과 비교하여 송신 노드가 전송해야 하는 패킷 수($P(f)$, 식(9))를 계산하고, 만약 $P(f)$ 가 1보다 크고, 백로그 된 패킷이 존재 한다면, $P(f)$ 개의 패킷은 동일한 서비스 태그를 갖고 즉시 전송을 시도한다. 즉, $P(f)$ 개의 패킷이 서비스 될 때까지 스케줄링 과정에서 서비스 태그를 업데이트 하지 않는다. $P(f)$ 개의 패킷 중 첫 번째 패킷을 제외한 $P(f)-1$ 개의 패킷들은 전송 시 수신 노드에서 RTS 페기가 이루어 지지 않게 하기 위해서 RTS 프레임의 1bit 구간(NCB: Not Compare Bit)을 1로 설정하여 전송한다. RTS 프레임에 NCB 구간이 1로 설정되어 있으면 수신 노드는 현재 채널이 사용 중이

아니면, CTS로 바로 응답하여 그 플로우가 서비스 되도록 한다.

4.1 기본적인 메시지 교환

각 패킷 전송은 RTS-CTS-DS-DATA-ACK 핸드셰이크 과정을 따르고 패킷이 전송 될 수 있는 데이터율을 결정하기 위하여 RBAR 프로토콜을 따른다.

송신 노드와 수신 노드의 한 홉 거리에 있는 모든 이웃 노드들에게 플로우의 서비스 태그 정보, 데이터율과 네트워크에서 가장 낮은 데이터율(d_{min})에 대한 정보를 알리기 위해서 제어 프레임(RTS, CTS, DS, ACK)에 서비스 태그와 을 포함하여 전송하고, CTS, DS, ACK 프레임에 플로우의 데이터율을 포함하여 전송한다. 플로우에 대한 업데이트 서비스 태그는 RTS, CTS 프레임에 포함하지 않는다. 그 이유는 RTS와 CTS는 채널 획득을 보장하지 않기 때문이다. RTS-CTS 과정이 성공한 이후에 DS와 ACK 프레임에 플로우에 대한 업데이트 태그를 붙여 주변 노드들에게 공지한다. 이로써, 스케줄링을 위한 정확한 플로우의 서비스 태그 정보가 전달된다.

4.2 테이블 정보 교환

경쟁 그래프에서 한 홉 거리에 있는 플로우에 대한 정보는 송신 노드와 수신 노드에 분산되어 있을 수 있다. 따라서 송신 노드의 플로우 f 에 대한 백오프 값 설정 방법은 송신 노드와 수신 노드에서 유지 되는 테이블을 고려하여 백오프 값을 설정해야한다.

즉, $B_f = B_f^S + B_f^R$ 이다. B_f 는 플로우 f 의 백오프 값이고, B_f^S 는 송신 노드의 로컬 테이블에 따른 플로우 f 의 백오프 값, B_f^R 은 수신 노드의 로컬 테이블에 따른 플로우 f 의 백오프 값이다. 그러나, 송신 노드에서는 B_f^S 는 정확히 알지만, B_f^R 은 알 수 없다. 따라서, 송신 노드가 B_f^R 을 예측 할 수 있도록, 수신 노드는 ACK 프레임에 두개의 파라미터(M_f, b_f)를 추가하여 전송한다. M_f 는 수신 노드의 로컬 테이블에서 플로우 f 가 서비스하기 전에, 서비스 되어야 하는 플로우들의 바이트 수이다. M_f 는 다음과 같이 계산된다.

$$M_f = \sum_{j \in B} (T_j - T_f)w_j \quad (12)$$

w_j 는 플로우 f 의 가중치이고, T_j 는 수신 노드의 로컬 테이블에서 플로우 f 의 서비스 태그(T_f)보다 작은 플로우의 서비스 태그이다. B 는 수신 노드의

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value
Frequency	2.4 GHz
Transmit Power	15 dBm
11.0 Mbps Sensitivity	-82 dBm
5.5 Mbps Sensitivity	-87 dBm
2.0 Mbps Sensitivity	-91 dBm
Carrier Sense Threshold	-108 dBm
Propagation Model	Two Ray Ground
Maximum transmission range (2/5.5/11 Mbps)	250m, 200m, 100m
Routing Protocol	DSR

로컬 테이블에서 T_f 보다 작은 서비스 태그를 갖는 플로우들의 집합이다. b_f 은 수신 노드의 테이블에서 플로우 f 의 백오프 기간을 나타낸다. 따라서 송신 노드가 M_f, b_f 를 ACK 프레임을 통해 받으면 임의의 시간 t 에서의 \widehat{B}_f^R 은 다음과 같이 계산 할 수 있다. t_j 는 이전에 ACK 프레임을 받은 시간이다.

$$\widehat{B}_f^R \approx b_f \cdot (M_f - d_{min} \cdot (t - t_j)) / M_f \quad (13)$$

4.3 패킷 스케줄링

노드 n 에서 채널이 사용 중이 아닌 것이 감지되면,

- 1) 전송할 플로우 f 가 로컬 테이블 E_n 에서 가장 작은 서비스 태그를 가지고 있다면 즉시, HOL (Head of Line) 패킷을 전송한다. 만약, f 의 데이터율이 d_{min} 보다 크다면, 시간 공정성을 달성하기 위해 전송해야 하는 패킷 수($P(f)$)를 구하고, $P(f)$ 개의 패킷들의 서비스 태그를 업데이트하지 않고 동일한 서비스 태그를 갖는다. $P(f)$ 개의 패킷들은 즉시 전송을 시도하고, $P(f)$ 개의 패킷들이 서비스 된 후 패킷의 서비스 태그를 업데이트한다.
- 2) f 보다 작은 서비스 태그를 갖는 플로우가 자신의 로컬 테이블(E_n)에 존재 하면, f 의 백오프 값 B_f 을 $B_f^S + B_f^R$ 로 설정 하고, 백오프 타이머가 동작을 시작한다.
- 3) f 의 백오프 타이머가 만료되고, 채널이 사용 중이 아니라면 f 의 HOL 패킷을 전송한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안한 에드혹 패킷 스케줄링에 대한 성능을 평가하기 위해서 NS-2¹⁶⁾를 사용했으며, 제안한 MRADPS와 EMLM-FQ를 구현하여 성

표 2. 최소 데이터율과 플로우 데이터율에 따라 전송해야 하는 패킷수

Flow data rate/ Minimum data rate	$P(f)$
2Mbps/2Mbps	1
5.5Mbps/5.5Mbps	1
11Mbps/11Mbps	1
11Mbps/5.5Mbps	2
5.5Mbps/2Mbps	2
11Mbps/2Mbps	5

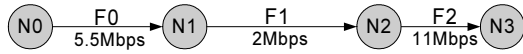


그림 7. 시나리오 I의 노드 그래프

능 평가를 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션 시 적용된 파라미터 값이고 표 3은 본 논문에서 정의하는 하나의 경쟁 그래프가 갖는 각 최소 데이터율을 기준으로 각 플로우의 데이터율에 따라 전송해야 하는 패킷수이다. 다중 데이터를 결정 기준은 Orinoco Card의 Data Sheet를 따랐다¹⁷⁾.

시나리오 I은 그림 7과 같이 4개의 노드와 그림 4의 플로우 경쟁그래프와 같이 직접적으로 경쟁 관계에 있는 3개의 플로우로 구성된 네트워크에서 FIFO를 사용하는 IEEE 802.11b, EMLM-FQ, MRADPS를 각각 적용했을 때, 플로우별 처리량과 채널 점유 시간을 계산하였다. 또한, MRADPS를 적용했을 때, 가장 낮은 데이터율 d_{min} 을 가지는 F1이 받는 최소 서비스 양이 모든 플로우의 데이터율이 d_{min} 일 때, EMLM-FQ에서 받는 최소 서비스양을 보장하는지를 확인하기 위해서 그림 7의 모든 플로우의 데이터율이 2Mbps일 때, EMLM-FQ의 처리량을 측정하였다. 트래픽으로 UDP를 사용하였으며, 패킷 사이즈는 1500바이트이고, 시뮬레이션 시간은 200초이다.

표 3에서 EMLM-FQ는 각 플로우가 공정하게 서비스 되지만, 전체 네트워크의 처리량이 FIFO를 사

표 3. 시나리오 I의 플로우별 처리량(패킷수)과 전체네트워크 처리량

Flow	802.11b +FIFO	EMLM-FQ	MRADPS	EMLM-FQ (2Mbps)
F0	5165	24849	29072	15035
F1	47815	24850	14525	15036
F2	48488	24849	69342	15036
Total Throughput (pkt)	101468 100(%)	74548 73(%)	112939 111(%)	45107

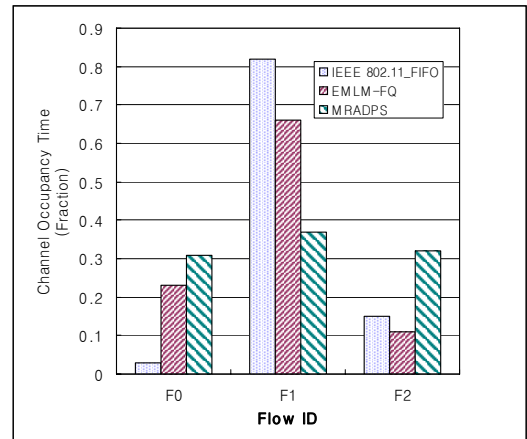


그림 8. 시나리오 I의 각 플로우별 채널 점유시간

용하는 IEEE 802.11b 환경의 전체 네트워크 처리량보다 약 27% 감소한다. 하지만, MRADPS는 IEEE 802.11b보다 네트워크 처리량이 약 11% 향상된다. 또한, MRADPS에서 최소 데이터율을 갖는 플로우 F1의 서비스 양은 모든 플로우의 데이터율이 그림 7의 최소 데이터율인 2Mbps일 때, EMLM-FQ가 각 플로우에게 제공하는 최소 서비스 양과 거의 동일함을 확인 할 수 있고 MRADPS가 각 플로우 데이터율에 따른 전송해야 하는 패킷 수 $P(f)$ 에 거의 비례하여 각 플로우가 받는 서비스 양을 제공하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 시나리오 I의 각 패킷 스케줄링 기법을 적용했을 때, 플로우별 채널 점유 시간을 나타낸다. MRADPS는 3개의 플로우의 채널 점유 시간이 다른 스케줄링 기법보다 공정함을 확인 할 수 있다. 하지만, 정확하게 플로우의 채널 점유 시간이 동일하지는 않다. 그 이유는 표 3에서 전송할 패킷을 계산할 때, 간단히 내림으로 계산을 하였고, 패킷을

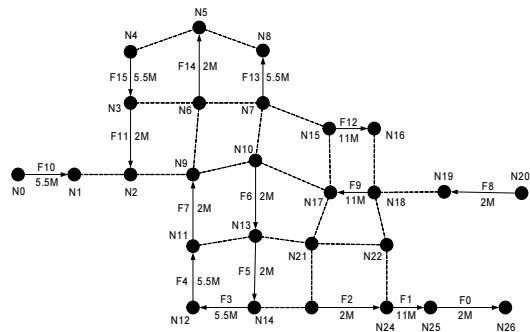


그림 9. 시나리오 II의 플로우 경쟁 그래프

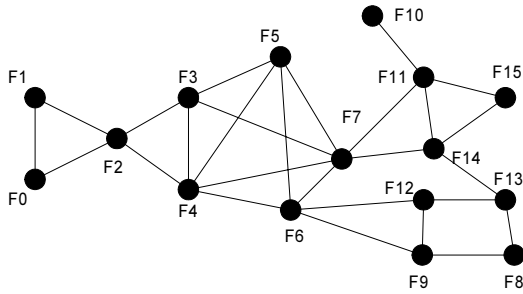


그림 10. 시나리오 II의 플로우 경쟁 그래프

표 4. 시나리오 II의 각 플로우별 처리량(패킷수)과 전체 네트워크 처리량

Flow	802.11b+ FIFO	EMLM-FQ	MRADPS
F0	53327	36622	26167
F1	49939	27281	53327
F2	2375	7630	13514
F3	38448	7515	19703
F4	15316	7323	25432
F5	7260	7462	7304
F6	1412	6171	7370
F7	2953	7465	7210
F8	10737	37156	7672
F9	37335	13932	33182
F10	29459	40242	53858
F11	15157	14106	28770
F12	45716	9877	39119
F13	53318	23484	27190
F14	10316	6790	10878
F15	12291	19163	29201
Total Throughput(pkt)	385359 (100%)	272219 (71%)	389897 (101%)

재전송하는 시간, 백오프 시간등의 추가적인 시간들이 발생하기 때문이다.

시나리오 II는 그림 9와 같이 26개의 노드와 16개의 플로우로 구성된 네트워크에서 IEEE 802.11b, EMLML-FQ, MRADPS를 각각 적용했을 때, 각 플로우별 처리량을 평가하였다. 시나리오 II의 각 플로우의 경쟁 관계는 그림 10과 같다. 트래픽으로 UDP를 사용하였으며, 패킷 사이즈는 1500바이트이고, 시뮬레이션 시간은 200초이다.

표 4는 그림 9의 노드 그래프에서 각 패킷 스케줄링 기법을 적용했을 때, 각 플로우의 처리량을 나타낸다. IEEE 802.11b에서 다른 플로우에 비해 서비스의 양이 매우 적은 F2, F6, F7와 같은 플로우를 EMLM-FQ에서는 일정량의 서비스를 받을 수 있도록 보장해 준다. 하지만 IEEE 802.11b의 네트

워크 처리량보다 약 29% 감소한다. MRADPS는 전체 네트워크 처리량이 IEEE 802.11b의 네트워크 처리량과 거의 동일한 처리량을 보여주고, 또한 고립되는 플로우의 최소 서비스 양을 EMLM-FQ가 보장해주는 서비스의 양과 거의 동일하게 서비스한다.

V. 결론

본 논문은 IEEE 802.11x와 같이 물리계층에서 다중 데이터물을 제공하는 에드혹 네트워크 환경에서 “플로우들 간에 공유하는 채널 용량이 고정되어 있다”라는 기존 패킷 스케줄링의 가정이 실제 환경과 적합하지 않는 문제점을 해결하기 위해서 다중 데이터물을 고려한 새로운 공정성 모델인 플로우별 시간 기반 공정성을 정의한다. 또한, 정의한 공정성을 달성하기 위하여 플로우 경쟁 그래프 상의 가장 낮은 데이터물과 각 플로우의 데이터물과 비교하여 전송해야 하는 패킷의 수 $P(f)$ 를 계산하고, 스케줄링 과정에서 $P(f)$ 개의 패킷에 대한 서비스 태그는 업데이트 하지 않고 $P(f)$ 개의 패킷 중 첫 번째 패킷을 제외한 나머지 패킷은 전송 시에 RTS 프레임에 NCB(Not Compare Bit)를 1로 설정하여 수신 노드에서 RTS를 폐기하지 않고 바로 CTS를 보내 서비스 되도록 EMLM-FQ를 수정하여 새로운 스케줄링 기법인 MRADPS를 제안하였다. 시뮬레이션 결과는 MRADPS는 경쟁 그래프에서 가장 낮은 데이터물을 갖는 플로우의 최소 서비스 양을 모든 플로우의 데이터물이 가장 낮은 데이터물을 가질 때, EMLM-FQ의 플로우가 받는 최소 서비스 양만큼 서비스하는 것을 보여주고, 각 플로우가 받는 서비스 양은 $P(f)$ 에 비례함을 보여준다. 또한 MRADPS는 다중 데이터물이 제공되는 환경의 에드혹 네트워크의 전체 네트워크 처리량을 크게 향상시키는 것을 보여준다.

참고 문헌

- [1] IEEE Std 802.11b Part 11b: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, Further Higher Data Rate Extension in 2.4GHz Band, 1999.
- [2] IEEE Std 802.11 Part 11g: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, Further Higher Data Rate Extension in 2.4GHz Band, 2003.

- [3] Y. Seok, J. Park and Y. Choi, "Multi-rate aware routing protocol for mobile ad hoc networks", IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 3, pp. 1749 - 1752, 2003.
- [4] S. Bansal, R. Shorey and A. A. Kherani, "Performance of TCP and UDP Protocols in Multi-Hop Multi-Rate Wireless Networks", IEEE WCNC'04, pp 1237-1249, April 2004.
- [5] G. Ding, X. Wu and B. Bhargava, "A Simulation Study on Multi-Rate Mobile Ad hoc Networks", ACM PE-WASUN' 04, pp. 897-909, October 2004.
- [6] H. Luo, J. Cheng and S. Lu, "A self-coordinating Localized Fair Queueing in Wireless Ad Hoc Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 3, pp.86-98, Jan-Feb 2004
- [7] A. Kamerman and L. Monteban. "WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band", Bell Labs Technical Journal, pp. 118-133, Summer 1997.
- [8] G. Holland, N. Vaidya and P. Bahl, "A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks", in ACM international Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), pp. 236-251, September 2002.
- [9] H. Zhai, J. Wang and Y. Fang, "Distributed Packet Scheduling for Multi-hop Flows in Ad Hoc Networks", IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2004, Vol. 2, pp.1081-1086, March 2004.
- [10] H. L. Chao, W. Liao, "Fair Scheduling With QoS Support in Wireless Ad Hoc Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 3, Issue 6, pp.2119-2128, November 2004.
- [11] H. L. Chao, W. Liao, "Credit-based Fair Scheduling in Ad Hoc Wireless Networks", IEEE Conference on Local Computer Networks, pp.479-567, April 2002.
- [12] N. H. Vaidya and P. Bahl, "Fair scheduling in broadcast environments", Microsoft Research Tech. Rep. MSR-TR-99-61.
- [13] P. Goyal, H. M. Vin, and H. Cheng, "Start-time fair Queueing: A scheduling algorithm for integrated services packet switching networks", IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, pp. 690-704, Oct. 1997.
- [14] Godfrey Tan and John Guttag, "Time-based fairness improves performance in multi-rate WLANs", USENIX Annual Technical Conference, June 2004.
- [15] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A Medium Access Protocol for Wireless LANs", Proc. ACM Ann. Conf. Special Interest Group on Data Comm. (SIGCOMM), pp. 214-225, 1994
- [16] NS2 - www.isi.edu/nsnam/ns/
- [17] Datasheet for ORiNOCO 11Mbit/s Network Interface Cards, 2001.

노 권 문 (Kwen-Mun Roh)

준회원



2004년 8월 인하대학교 컴퓨터공학과, 공학사
 2004년 8월~현재 인하대학교 정보통신 대학원 석사과정
 <관심분야> Cognitive Radio, 휴대인터넷, UWB, WSN

진 영 천 (Yong-qian Chen)

준회원



2001년 2월 DaLian University of Technology, 공학사
 2004년 8월~현재 인하대학교 정보통신 대학원 석사과정
 <관심분야> Ad-hoc, WSN

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)

정회원



1988년 2월 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)
 1990년 3월~2001년 2월 KT 연구개발본부

2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수
 <관심분야> 초고속 통신망, 무선 MAC 프로토콜, 인터넷 QoS, Cross-layer 프로토콜 설계