

다중 무선 에드혹 네트워크에서 불공정 문제를 해결하기 위한 802.11 MAC 프로토콜

남재현*

The IEEE 802.11 MAC Protocol to solve Unfairness Problem in Multihop Wireless Ad Hoc Networks

Jae-Hyun Nam *

요 약

IEEE 802.11 WLANs에서 공유 매체에서 충돌을 경험하는 각 노드들은 또 다른 충돌을 예방하기 위해 임의의 시간동안 백오프를 수행할 필요가 있다. 이러한 시간은 충돌 창(CW)으로부터 선택되고, 이러한 창의 크기는 BEB 알고리즘으로 결정된다. 하지만 BEB 알고리즘은 특정한 노드가 다른 노드들보다 보다 많은 처리율을 얻을 수 있는 공정성 문제와 네트워크상의 트래픽 부하가 많을 경우 낮은 성능을 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.11 DCF 기법에서 공정성 문제를 보완하기 위해 각 플로우에서 충돌이 발생할 경우 백오프 타이머 값을 계산할 때 인접한 노드들 간의 통신에 우선순위를 두어 처리하는 것이 아니라 홉 카운터와 충돌 창을 함께 고려하여 불공정 문제를 해결하였고, 제시된 알고리즘을 ns 시뮬레이터로 성능 분석한 내용을 나타내었다. 성능 분석 결과 FTP 연결을 서로 다른 방향과 동일한 방향으로 트래픽을 전송했을 때 처리율이 각각 300kbps 부근으로 나타나 있다. 이러한 결과는 연결 방향에 따라 처리율의 차이가 많이 나타나는 기존의 기법보다 제안된 알고리즘이 공정성 문제를 많이 완화시킨 것으로 볼 수 있다.

Abstract

In the IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks (WLANs), network nodes experiencing collisions on the shared channel need to backoff for a random period of time, which is uniformly selected from the Contention Window (CW). This contention window is dynamically controlled by the Binary Exponential Backoff (BEB) algorithm. The BEB scheme suffers from a unfairness problem and low throughput under high traffic load. In this paper, I propose a new backoff algorithm for use with the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function.

▶ Keyword : Binary exponential backoff(BEB) algorithm, Hop count, IEEE 802.11 DCF, Multihop wireless ad hoc networks

• 제1저자 : 남재현
• 접수일 : 2007.10.30, 심사일 : 2007.11.10, 심사완료일 : 2007.11.19.
* 신라대학교 IT학과 조교수

I. 서론

IEEE 802.11 무선 LAN (WLAN)은 가장 많이 채택된 무선 기술 중의 하나로, 차세대 무선 통신 네트워크에서 중요한 역할을 수행할 것이다. 802.11 WLAN 기술의 주요 특징들은 단순성(simplicity), 유연성(flexibility), 그리고 가격 효율성(cost effectiveness) 등이 있다. 이러한 기술은 사무시트 병원, 공장, 공항 등 다양한 분야에서 유비쿼터스 통신 환경을 사람들에게 제공한다.

802.11에서 정의된 두 가지 조정(coordination) 기능은 PCF (Point Coordination Function)와 DCF (Distributed Coordination Function) 등이 있다. PCF 메카니즘에서는 각 네트워크 노드들에게 전송할 데이터를 지니고 있는지 질의하기 위해 액세스 포인트(AP)나 베이스 스테이션(BS)에서 폴링 기법을 사용한다. DCF 메카니즘에서는 각 능동 노드(active node)들이 CSMA/CA 기법을 통해 채널의 사용권을 경쟁한다[1].

IEEE 802.11에서의 패킷 충돌 현상은 경쟁 노드들이 분산되어 있는 특성과 각 노드들에 들어오는 트래픽의 버스티(bursty)한 특성 때문에 완전히 제거될 수는 없다. 따라서 802.11 DCF 기법에서는 계속적인 충돌을 피하기 위해 충돌을 초래한 송신측이 즉시 재전송을 하지 않도록 하고 있다. 즉, 채널 사용을 경쟁하는 노드들간에 임의적으로 선택된 백오프(backoff) 시간으로 백오프 타이머를 설정한다. 이러한 백오프 시간 간격은 0에서 충돌 창(Contention Window : CW) 값 사이에서 균등하게 선택된다. 802.11 DCF 기법에서 BEB (Binary Exponential Backoff) 알고리즘이 동적으로 CW 값을 제어한다[1].

하지만 BEB 기법은 공정성(fairness) 문제를 지니고 있다. 즉, 어떤 특정한 노드가 다른 노드들보다 보다 많은 처리율을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 IEEE 802.11 DCF 기법에서 공정성 문제를 보완할 수 있는 새로운 백오프 알고리즘을 제시하고, 제시된 알고리즘을 ns-2 시뮬레이터로 구현하여 성능 분석한 내용을 제시하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II절에서는 관련 연구를 나타내었고, III 절에서는 IEEE 802.11 DCF 기법에서 사용하는 BEB 알고리즘의 개요와 문제점을 나타내었고, 이를 보완하기 위한 수정된 백오프 알고리즘에 대해서도 제시되었다. IV절에서는 수정된 백오프 알고리즘의 성능 분석을 위해 ns-2로 수행한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 마지막 V절에서는 결론을 제시하였다.

II. 관련연구

BEB 기법은 단순성 때문에 MAC 계층 프로토콜에서 많이 사용되었다. 이 기법은 충돌이 발생하면 각 노드에서 충돌 창(CW) 값을 최대 충돌 창(CWmax)에 도달할 때까지 2배씩 증가시킨다. 충돌이 발생하지 않을 경우, CW 값을 최소값(CWmin)으로 리셋시킨다. CWmin과 CWmax 값은 네트워크의 트래픽 부하와 능동 노드들의 수에 따라 미리 결정된다[2].

하지만 BEB 기법은 가장 최근에 성공한 노드를 선호하는 경향이 있다. 따라서 IEEE 802.11 MAC 계층으로 TCP 트래픽을 전송할 경우 두 개의 연결 간에 심각한 불공정성(unfairness) 문제를 발생시킨다.

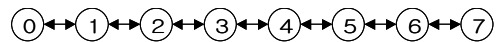


그림 1. 네트워크 토폴로지
Fig 1. Network Topology

그림 1은 멀티 홉 연결성을 조사하기 위해 구성된 8개의 노드 (노드 0 ~ 노드 7)를 지닌 스트링 토폴로지이다. 일반적으로 무선 네트워크에서 통신 영역보다 감지 영역(sensing area)이 훨씬 더 크다. 따라서 각 노드의 감지 영역은 두 개의 노드 반경이라고 가정한다. 이러한 가정은 노드 2와 노드 5가 동시에 데이터를 전송할 경우, 노드 4는 노드 2와 직접적으로 통신을 수행하지 않아도 노드 4에서 충돌을 발생시킨다.

[3]에서 제시된 결과를 보면 두 개의 세션이 열려져 있는 상태에서 하나의 세션 처리율이 거의 0에 가깝게 떨어져 재시작의 기회조차 가지지 못하는 것을 볼 수 있다.

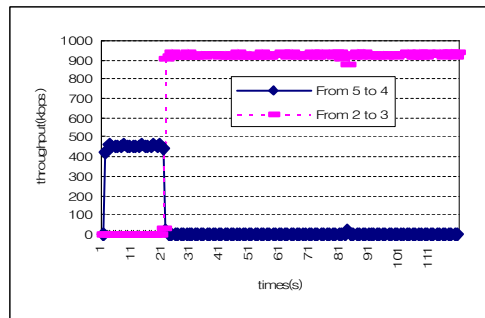


그림 2. 802.11에서 두 개의 TCP 세션의 예
Fig 2. Example of TCP capture with 802.11

그림 2는 서로 다른 방향의 두 개의 TCP 세션이 각각 10초와 30초에 발생할 때 불공정성 문제 때문에 발생하는 처리율을 나타낸 것이다. 첫 번째 세션은 10초 때 5번 노드에서 4번 노드로 발생되고, 두 번째 세션은 30초 때 2번 노드에서 3번 노드로 발생된다.

그림 2에서 보는 바와 같이 각 세션에서 한쪽 연결이 데이터를 전송하면 다른 쪽 연결에서는 거의 데이터를 전송하지 못하는 불공정성 문제가 발생됨을 알 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 다음과 같다.

먼저 노드 2가 데이터를 전송할 경우를 살펴보자. 노드 2는 노드 3으로부터 데이터를 송신할 경우 노드 2는 채널을 요청하기 위해 RTS(Request To Send)를 전송한다. 노드 2와 노드 3은 하나의 홉으로 연결되어 있기 때문에, 노드 3이 RTS를 수신하면 노드 2로 CTS(Clear To Send)를 응답한 후 패킷 전송을 시작한다. 하지만 노드 5는 노드 3의 전송을 감지할 경우, 노드 5는 노드 3의 전송이 완료될 때까지 연결 시도를 중지한다. 노드 3의 전송이 완료된 후 노드 5는 연결을 시도하기 위해 RTS 패킷을 전송한다. 이것은 "hidden node problem"을 해결하기 위해 필요하다.

노드 2에서 노드 3으로 전송되는 데이터 패킷은 제어 패킷보다 훨씬 크다. 만약 노드 5가 임의의 시간 이후에 다시 노드 4로의 채널 확보를 위해 RTS를 전송할 경우, RTS 제어 패킷은 노드 4에서 다시 충돌이 발생하게 되고 심각한 지연을 겪게 된다. 따라서 노드 5가 노드 4로의 채널 확보를 위해서는 노드 2가 RTS를 전송하기 전에 노드 5가 RTS를 전송하는 경우뿐이다.

하지만 MAC 계층의 BEB 기법은 최근에 성공한 노드를 항상 선호하기 때문에, 채널을 확보하기 위해 노드 5에게 할당된 윈도우 시간은 너무 작다. 따라서 노드 5는 경쟁에서 이길 가능성이 거의 없다. 노드 5는 노드 4로 7번 접촉을 시도한 후 계속 연결이 실패될 경우, MAC 계층은 "링크가 끊어졌다(link breakage)"라고 간주하여 상위 계층으로 링크 상태 정보를 전달한다.

이러한 문제는 hidden & exposed terminal 문제, 전송 영역 보다 더 큰 간섭 영역(interference range), 그리고 802.11에서 사용하는 BEB 알고리즘이 가장 최근에 전송을 성공한 노드를 선호하는 특성 때문에 발생된다.

이러한 BEB 알고리즘에서의 문제를 해결하기 위해 MACAW 기법에서 MILD(Multiplicative Increase and Linear Decrease) 알고리즘을 제시했다[4]. MILD 기법에서는 충돌된 노드는 자신의 CW 값을 1.5배 증가시키고, 전송이 성공한 경우에는 CW 값을 RTS 패킷 전송 길이만큼 감소시킨

다. 하지만 이 기법은 CW 값이 서로 매칭이 되지 않는 서로 다른 경쟁 레벨을 지닌 영역으로 CW 값의 이주가 쉽지 않다.

[5]에서 IEEE 802.11 DCF 기법의 성능을 예측하기 위한 분석 모델(analytical model)을 제시하였다. 하지만 제시된 모델에서의 성능은 RTS/CTS 메커니즘이 채택되었을 때 시스템 매개변수(최소 충돌 창, 능동적인 노드들의 수 등)에 최소한적으로 의존한다.

III. 수정된 Binary Exponential Backoff (BEB) 알고리즘

IEEE 802.11 DCF는 BEB 알고리즘을 채택했다. 데이터 전송을 시도하려고 하는 노드는 공유 매체의 상태를 결정하기 위해 물리적 캐리어 센스 기능과 가상적인 캐리어 센스 기능을 사용한다. 만약 매체가 DIFS (Distributed InterFrame Space) 이상의 기간 동안 사용되지 않고 유휴 상태로 있으면, 노드는 자신의 전송을 진행한다. 하지만 매체가 사용 중인 상태로 있으면, 전송은 현재 진행 중인 전송이 완료될 때까지 연기된다. 백오프 기간(backoff interval)이라는 임의의 기간이 선택되어 백오프 타이머를 초기화하는데 사용된다. 백오프 타이머는 채널이 유휴상태로 있으면 계속 감소되다가 채널상의 전송이 감지되면 멈춘다. 이후 하나의 DIFS 이상 시간동안 채널이 유휴 상태로 감지되면 다시 활동한다. 노드는 백오프 타이머가 0이 되면 전송을 시작한다. 이러한 과정은 경쟁 기간동안 발생될 수 있는 충돌의 확률을 줄일 수 있다. 백오프 시간(backoff time)은 다음과 같이 계산되어진다.

$$BackoffTime = \lfloor (CW * Random(0,1)) * SlotTime \rfloor$$

백오프 시간은 전송을 시작하기 전에 반드시 전송을 미루어야 되는 시간이다. $Random(0,1)$ 은 0과 1사이의 임의의 값이다. CW는 CW_{min} 과 CW_{max} 사이의 정수 값이다. $SlotTime$ 은 슬롯 시간 간격(slot time duration)으로, 물리계층에 따라 값이 달라진다. CW는 먼저 CW_{min} 으로 초기화된다. 이후 충돌로 인해 전송이 실패할 때마다 값이 CW_{max} 에 도달할 때까지 2의 배수로 증가된다. CW_{max} 에 도달하면 CW 값이 리셋될 때까지 계속 CW_{max} 로 유지된다. 전송 시도가 성공할 때마다 CW 값은 CW_{min} 으로 리셋된다. 따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 노드 5가 노드 4로의 전송이 실패하여 CW 값이 증가된 상태에서 노드 2의 전송이 성공할 경우, 노드 5는 계속적으로 노드 4로의 전송이 실패하게 될 것이다. 이는 노드 2의

CW 값은 전송 성공으로 인해 최소값으로 리셋되는 반면, 노드 5는 계속적인 전송 실패로 CW 값이 증가되기 때문이다.

이러한 불공정 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 홉 카운터(Hop count)를 이용한 새로운 백오프 알고리즘을 사용한다(6). 홉 카운터를 이용한 백오프 알고리즘에서의 백오프 시간 계산은 다음과 같다.

$$Backoff\ Time = \lfloor ((CW * Random(0,1)) / HopCount) * Slot\ Time \rfloor$$

각 노드에는 현재 활동 중인 이웃들의 리스트(active neighbor list)를 유지한다. 각 노드는 "overheard" MAC 패킷(RTS, DATA)을 통해 현재 자신의 주위에서 활동 중인 이웃들의 수를 수동적으로 구한다. 이러한 리스트를 이용하여 홉 카운터를 계산한다. 또한 1 바이트의 현재 활동 중인 이웃 정보를 전달하기 위해, 그림 3에서 보는 바와 같이 IEEE 802.11 프레임 제어 필드 중 타입(Type) 필드 값에 홉 카운터 값을 추가하여 모든 이웃들에게 방송한다. 각 노드들은 자신의 이웃들로부터 받은 정보를 이용하여 현재 활동 중인 이웃들의 수를 유지한다.

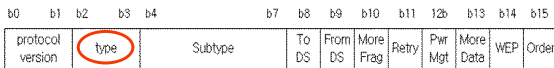


그림 3. IEEE 802.11 프레임 제어 필드
Fig 3. The IEEE 802.11 Frame Control Field

송수신측간의 연결을 의미하는 플로우(flow)에는 세 가지 상태가 존재한다.

각 슬롯의 시작에서 모든 플로우는 NO_CONTENTD 상태를 유지한다. 이후 특정한 슬롯에서 채널을 얻기 위해 두 가지 단계가 진행된다. 첫 번째는 하나의 슬롯에서 하나의 플로우가 경쟁을 하고 있는 상태(NO_CONTENTD → CONTENTD)이고, 다른 하나는 경쟁을 하고 있다면 채널을 얻기 위해 시도하는 상태(CONTEND → ACQUIRE)이다. 수정된 BEB 알고리즘은 그림 4에 나타나 있다.

```

Modified_BEB( ) {
  for each slot
    State ← NO_CONTENTD;
    if rand(0,1) ≤ xi
      State ← CONTENTD;
      Bi = (CWi*rand(0, 1))/Hop_Count;
      wait(Bi);
      if carrier_sense() == FREE
        acquire_channel();
        if acquire_status() == COLLISION
          CWi = CWi * 2;
        else State ← ACQUIRE;
}
    
```

그림 4. 수정된 BEB 알고리즘
Fig 4. Modified Binary Exponential Backoff Algorithm

각 플로우는 x_i 확률을 지닌 하나의 전송을 지닌다. 플로우가 전송할 패킷을 가졌고 캐리어를 감지하지 못했을 경우 확률 x_i로 NO_CONTENTD에서 CONTENTD 상태로 전이된다. 경쟁을 하는 노드 i는 B_i의 대기 시간을 가진다. B_i는 백오프 카운터이다. 수정된 BEB 알고리즘에서 B_i 값은 기존의 CW 값에 따라 변하는 것이 아니라, CW와 홉 카운터를 함께 고려하도록 하였다. 따라서 CW 값이 증가하더라도 홉 카운터가 크면(송수신측간의 거리가 길다) 우선 순위가 높도록 알고리즘을 수정하였다. 임의의 대기 시간 후 플로우는 캐리어를 감지하고 채널이 유휴상태이면 플로우는 채널을 획득하려고 시도한다. 만약 채널이 현재 사용 중이거나 충돌이 발생할 경우, 플로우는 해당 슬롯을 COLLISION으로 선언하고 CW 값을 2배 증가시켜 이후 전송 시도시 대기 시간을 증가시킨다. 만약 플로우가 채널을 성공적으로 획득했을 경우 CONTENTD 상태에서 ACQUIRE 상태로 전이된다.

IV. 성능 평가

본 절에서는 수정된 BEB 알고리즘의 공정성 특성을 기존의 802.11 MAC 프로토콜과의 비교를 수행한 결과를 나타내었다. 802.11 DCF를 시뮬레이션하기 위해 ns-2 시뮬레이터를 사용하였고, 무선 네트워크에 유입되는 트래픽은 FTP를 사용하였다. 라우팅 프로토콜은 정적 라우팅을 사용하였고, 채널 대역폭은 2Mbps이며 전송 반경은 250m이다. 시뮬레이션 환경에서 사용한 매개변수들은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 영역 모델
Table 1. Range models for the simulation

Pathloss	Two-Ray
SNR_Threshold	10
TX_Range	250m
CS_Range	550m
IF_Range	550m

표 1에서 SNR_Threshold는 신호대 잡음 비의 임계치를 의미하고, TX_Range, RX_Range는 각각 전송 영역과 수신 영역을 의미한다. IF_Range는 간섭영역을 의미한다.

그림 5는 시뮬레이션에서 사용된 4개의 노드 (노드 0 ~ 노드 3)를 지닌 스트링 토폴로지이다.

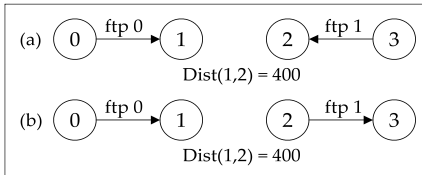


그림 5. 시뮬레이션에서 사용된 노드 토폴로지
Fig 5. Node topology for the simulation

각 세션에서 한쪽 연결이 데이터를 전송하면 다른 쪽 연결에서는 거의 데이터를 전송하지 못하는 불공정성 문제가 발생되기 때문에 이를 시뮬레이션으로 확인하기 위해 그림 5와 같이 (a)와 (b) 두 가지 경우로 나누어서 시뮬레이션을 하였다.

그림 5의 (a)와 같이 서로 다른 방향으로 FTP 연결을 수행하여 트래픽을 전송한 결과와 (b)와 같이 동일한 방향으로 트래픽을 전송했을 때 처리율이 각각 그림 6과 7에 나타나 있다. 각 방향의 연결을 계속 유지하면서 대용량의 데이터를 전송하기 위해 FTP 데이터를 사용하였다.

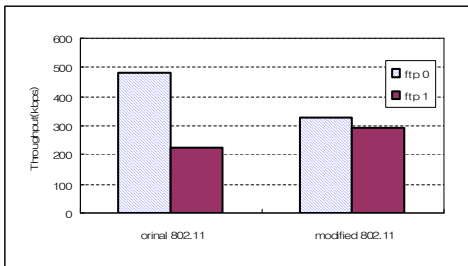


그림 6. FTP 연결이 다른 방향일 경우 처리율
Fig 6. FTP connections are in opposite direction

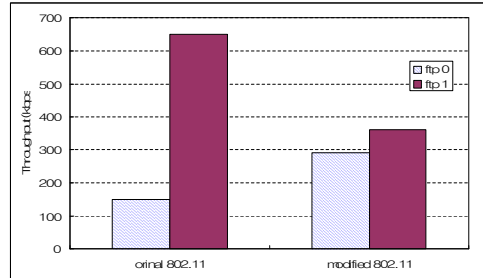


그림 7. FTP 연결이 동일한 방향일 경우 처리율
Fig 7. FTP connections are in same direction

그림 6과 7에서 보는 바와 같이 FTP 연결 방향에 상관없이 수정된 802.11 MAC 프로토콜이 기존의 802.11 프로토콜보다 더 나은 공정성 문제 해결책을 보여 주고 있다. 이러한 결과는 수정된 백오프 타이머 값이 홉 카운터 값을 고려함에 따라, 인접한 노드들 간의 통신에 우선순위를 두어 처리하는 것이 아니라 각 플로우에서 충돌 시 백오프 시간을 계산할 때 홉 카운터와 충돌 창을 함께 고려했기 때문이다.

V. 결론 및 향후 과제

IEEE 802.11에서의 패킷 충돌 현상은 경쟁 노드들이 분산되어 있는 특성과 각 노드들에 들어오는 트래픽의 버스티한 특성 때문에 완전히 제거될 수는 없다. 따라서 802.11 DCF 기법에서는 지속적인 충돌을 피하기 위해 충돌을 초래한 송신 측이 즉시 재전송을 하지 않도록 하기 위해 BEB 알고리즘을 사용한다.

하지만 BEB 알고리즘은 공정성 문제를 지니고 있다. 이러한 문제는 hidden & exposed terminal 문제, 전송 영역보다 더 큰 간섭 영역, 그리고 802.11에서 사용하는 BEB 알고리즘이 가장 최근에 전송을 성공한 노드를 선호하는 특성 때문에 발생된다.

본 논문에서는 IEEE 802.11 DCF 기법에서 공정성 문제를 보완하기 위해 backoff 시간을 계산할 때 기존의 충돌 창 (CW) 값 뿐만 아니라 홉 카운터 값을 함께 고려하는 새로운 백오프 알고리즘을 제시하였다. 또한 제시된 알고리즘의 성능 분석을 위해 ns 시뮬레이터로 구현하여 성능 분석을 하였고, 성능 분석 결과 본 논문에서 제시된 수정된 802.11 MAC 프로토콜이 기존의 802.11 프로토콜보다 공정성 문제에서 더 나은 결과를 보여 주었다.

본 논문에서는 성능을 분석하기 위해 스트링 토폴로지를 구성하여 사용하였다. 향후에는 링 토폴로지, 크로스 토폴로

지, 그리드 토폴로지(grid topology) 등 다양한 환경에서의 성능 평가가 필요하다.

참고문헌

- [1] IEEE Std. 802.11, "Wireless LAN Media Access
- [2] J. Hastad, T. Leighton, and B. Rogoff, "Analysis of backoff protocols for multiple access channels", SIAM Journal on Computing, vol. 25, no. 1, pp. 740-774, August 1996.
- [3] S. Xu and T. Saadawi, "Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks", IEEE Communications Magazine, pp. 130-137, June 2001
- [4] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's", in Proc. of the conference on Communications architectures, protocols and applications., 1994, pp. 212-225, ACM Press.
- [5] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, pp. 535-547, March 2000
- [6] J. H. Nam, "A new backoff algorithm considering hop count for the IEEE 802.11 distribution coordination function", International Journal of Maritime Information and Communication Sciences, vol. 5, no. 3, September 2007

저 자 소 개



남 재 현

1989년 부산대학교 컴퓨터공학과 (공학사)

1992년 부산대학교 컴퓨터공학과 석사

2002년 부산대학교 컴퓨터공학과 박사

1993년 3월 ~2002년 10월 동주대학교 조교수

2002년 11월 ~ 현재 신라대학교 IT학과 조교수

관심분야 : 센서네트워크, MANET, VoIP