

다중 실험 지원을 위한 IEEE 802.11 무선랜의 가상화

(Virtualizing IEEE 802.11 WLANs for
Multiple Simultaneous Experiments)

함성일[†] 이희진[†] 강영명[†] 임상순[†] 김종권^{**}
(Seong-il Hahm) (Heejin Lee) (Young-myong Kang) (Sangsoon Lim) (Chong-kwon Kim)

요약 무선랜의 가상화를 통해 한정된 무선 자원을 여러 연구자들이 효율적으로 공유할 수 있게 한다. 기본적으로 가상화된 공간에서의 실험이 가상화되지 않은 곳에서의 실험과 일관되어야 하며 두 실험의 결과가 유사할수록 일관성이 좋다고 본다. 본 논문에서는 기존 IEEE 802.11 무선랜의 수정 없이 독립된 실험의 프로토콜 간에 상호작용을 방지하여 일관성이 좋은 가상화 기법을 제안한다. 성능 평가를 통해 일관성은 무선 채널의 특성(도플러 주파수, Ricean 계수 등)과 실험망의 수에 따라 달라짐을 확인하였다. 제안된 기법은 무선 채널의 특성에 따라 최적화되어 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

키워드 : IEEE 802.11 무선랜, 가상화, 도플러 주파수, 페이딩 채널

Abstract WLAN virtualization can make multiple simultaneous experiments, each of which is conducted by a separate researcher, share scarce wireless resources in an IEEE 802.11 WLAN. The experiment performed in a virtualized WLAN should be consistent with that in a non-virtualized WLAN. The more similar these two experimental results, the better the consistency. To this end, we propose a novel virtualization scheme that has good consistency by preventing multiple simultaneous experiments from interacting with one another, without any modifications to the IEEE 802.11 standard. Through an intensive simulation study, we confirm that the consistency depends not only on the number of simultaneous experiments but also on wireless channel characteristics such as Doppler frequency and Ricean factor. According to such dependencies, the proposed scheme is optimized, so that it supports good consistency.

Key words : IEEE 802.11 WLAN, virtualization, Doppler frequency, time-correlated fading

1. 서론

새로운 망 구조 혹은 그 위에서 동작할 새로운 프로

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-(C1090-1011-0004))

[†] 비회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부
siham@popeye.snu.ac.kr
heejin@popeye.snu.ac.kr
ymkang@popeye.snu.ac.kr
slim@popeye.snu.ac.kr

^{**} 종신회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
ckim@popeye.snu.ac.kr

논문접수 : 2009년 4월 16일
심사완료 : 2010년 1월 5일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.
정보과학회논문지: 정보통신 제37권 제2호(2010.4)

토콜(protocol)을 제안하여 성능을 검증하려는 경우 실험망(testbed)을 통한 평가가 선행되어야 한다. 그러나 일반적으로 하나의 독립된 망에서는 하나의 실험만 진행할 수 있는데 실험 마다 별도의 망을 구축하는 것은 그 비용이 비싸기 때문에 한계가 있다. 이런 한계를 극복할 수 있는 방법으로 망 가상화가 제안되었다[1]. 물리적으로 하나의 통신망을 가상화하여 논리적으로는 마치 여러 개의 통신망이 독립적으로 동작하는 것처럼 보이게 하는 기술이 망 가상화의 기본 개념이다. 즉, 물리적으로 하나의 망은 라우터(substrate router)와 링크(substrate link)로 구성되지만 각 라우터와 링크를 가상화하여 메타 라우터(meta router) 및 메타 링크(meta link)로 구성된 독립된 두 개 이상의 망으로 동작하게 할 수 있다. 가상화라는 개념은 최근에 제시된 새로운 개념이 아니며 이미 가상메모리, VLAN과 같이 기존에도 사용하던 것이다. 다만 가상화 범위를 어느 정도로

할 것인지가 관건이다.

최근에 저가의 무선 장치들이 개발되고 대규모의 무선 실험망이 구축되면서 새롭게 제안되고 있는 무선 망 관련 프로토콜들의 평가 방법이 모의실험 위주를 탈피하여 실제 환경에서의 실험을 통해 성능을 측정하는 방식으로 변해가고 있다. 최근엔 더욱 무선 자원을 요구하는 연구과제들이 많이 늘어남에 따라 한정된 수의 무선 실험망을 효율적으로 공유할 수 있는 무선망 가상화 기술들이 주목을 받고 있다[2]. 무선망 가상화는 기존의 망 가상화 개념을 무선망으로 확장시킨 것으로 물리적으로 연결된 무선 실험망을 논리적으로 나누어 다수의 사용자가 동시에 무선 실험망을 사용할 수 있도록 제공해주며, 각 사용자들은 서로 다른 사용자의 실험에 영향을 끼치지 않고 독립적으로 동작할 수 있도록 자원을 분리시키는 기술을 말한다. 무선망 가상화 기술을 적용시 다음의 세 가지 사항을 고려하여야 한다.

- 비용과 자원 : 무선망 가상화 기술마다 동시에 이용 가능한 직교 채널의 개수와 동시에 수행 가능한 실험의 개수가 달라진다. 비용과 자원 제약에 동시에 고려하여 시스템에 맞는 적절한 가상화 기술의 선택이 필요하다.
- 효율성 : 가상화 기술을 통해 자원을 공유하게 될 경우 추가적인 오버헤드(overhead)가 발생한다. 제안된 기법은 이 오버헤드를 최소화할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 일관성 : 하나의 물리적인 무선 실험망에서 공존하는 실험들간에 간섭을 최소화하여 실험간의 영향으로 인한 성능 평가의 왜곡이 발생하지 않아야 한다. 즉, 무선망 가상화 기술을 적용시킨 후 얻은 실험 결과가 가상화되지 않은 무선망에서 결과와 동일해야 한다.

본 논문에서 제안된 무선랜 가상화 기법은 위 세 가지 사항을 모두 고려한다. 첫 번째로, 비용과 자원 측면에서 가상화 기법으로 추가 비용이 거의 없는 시간 분할에 기반한 기법을 채택하였다. 이는 무선랜의 CSMA/CA 기법에 쉽게 적용할 수 있기 때문에 구현도 용이하다. 반면 주파수 분할 및 코드 분할 등에 기반한 가상화 기법도 고려할 수 있었지만 무선랜에 적용하기에는 그 비용이 너무 크다. 두 번째로, 시간 분할 가상화 기법을 제안할 때 필연적으로 추가적인 제어 오버헤드가 발생한다. 하지만 0 byte 데이터 프레임용 브로드캐스팅(broadcasting)함으로써 자원 낭비를 최소화하였다. 세 번째로, 일관성은 가상화 기법이 반드시 충족해야 하는 필요조건이다. 일관성을 저해하는 요소로는 다음의 여러 가지가 있다. 먼저, 가상화 기법을 적용하기 위해서 기존 시스템의 구조나 프로토콜을 변경한다면 가상화된 공간과 그렇지 않은 공간에서의 실험 결과가 상이한 것은 당연하다. 또한, 동시에 수행되는 실험 간에 프로토

콜 측면에서 상호작용을 일으키면 당연히 제대로 된 실험을 수행했다고 할 수 없을 것이다. 본 논문에서는 일관성에 초점을 맞춰 가상화 기법을 설계하고 다양한 환경에서 성능 평가를 수행할 것이다.

본 논문의 학문적 성취는 다음의 두 가지이다. 첫째, IEEE 802.11 표준의 수정 없이 간결한 무선랜 가상화 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 쉽게 구현이 가능하며 추가적으로 발생하는 오버헤드도 무시할 수준으로 작다. 둘째, 시간 분할 기법의 한계점인 채널의 불연속성과 그 영향을 밝혔다. 다양한 무선 채널 환경에서 성능 평가를 수행함으로써 가상화로 인해 필연적으로 발생하는 채널의 불연속성이 어떤 환경에서 그리고 어떤 프로토콜에 더 많은 영향을 주는 지 살펴보고 동시에 어떻게 하면 그 영향을 최소화할 수 있는 지도 밝힌다.

이 후 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 유무선 가상화 기법들에 대해서 알아보고 3장은 시간 분할에 기반한 가상화 기법을 제안하고 채널의 불연속성에 대해서 설명한다. 다양한 채널 환경에서 제안된 기법의 일관성에 대한 성능 평가를 4장에서 수행한다. 마지막으로 5장에서 결론으로 본 논문을 맺는다.

2. 관련 연구

무선 테스트베드에 가상화 기법을 도입하면 적은 비용으로 양질의 실험을 할 수 있다. 대표적인 무선 자원의 가상화 기법에는 주파수분할 다중화(frequency division multiplexing, FDM), 시분할 다중화(time division multiplexing, TDM), 주파수 호핑 다중화(frequency hopping multiplexing, FHM), 코드분할 다중화(code division multiplexing, CDM), 공간분할 다중화(space division multiplexing, SDM) 등의 기법들이 사용될 수 있다[3]. FDM를 적용할 경우, 상호 독립된 채널을 할당 받은 실험들이 서로 영향을 주지 않으면서 동시에 수행될 수 있다. 하지만 사용 가능한 채널의 수에 따라 시스템 확장성이 제한되는 단점이 있다. 뿐만 아니라 여러 개의 무선 인터페이스가 필요하게 되어 비용이 크게 증가한다. 따라서 초기의 목적인 저렴한 비용으로 양질의 실험을 하겠다는 목적과 상충된다.

이에 비해 TDM는 하나의 무선 인터페이스만을 이용해 가상화를 구성할 수가 있어 저비용으로 많은 수의 실험을 진행할 수 있는 장점이 있다. 하지만 오랜 난제인 시간 동기화(time synchronization)가 전체 성능을 결정한다는 문제가 있다. 또한 할당되는 단위 시간(time slice)이 끝날 때마다 진행 중인 실험의 문맥(context)을 저장하고 다음 실험의 문맥을 불러들여야 하기 때문에 문맥 교환(context switching) 오버헤드가 발생한다. FDM

와 TDM를 함께 사용할 경우, TDM 방식만 쓸 경우보다 빠른 시간에 그리고 FDM만을 사용한 경우 보다는 실험을 동시에 수행할 수 있으나 FDM와 TDM의 문제를 고스란히 안고 있어 이증고를 겪는 단점이 있다. FHM를 사용할 경우에도 FDM의 문제를 그대로 갖고 있다는 문제가 있으며 CDM를 사용할 경우에도 직교 코드를 할당하는 문제가 있으며 실제 적용하는데 비용이 많이 든다. 물리적인 지역을 나누어 여러 실험을 진행하는 공간분할 방식은 전송 파워의 크기에 따라 실험하는 지역의 크기를 조절하게 되는데, 이때 예측하기 힘든 환경의 특성을 고려해 전송 파워를 적절히 조절해 독립성을 유지해야 하는 문제를 안고 있다.

이 중 무선랜에 적용하기에 가장 적합한 기법은 TDM 방법일 것이다. 그 이유는 추가 비용이 거의 발생하지 않으며 구현도 상대적으로 용이하기 때문이다. 하지만 시간 동기화와 문맥 전환에 따르는 문제를 해결하는 것이 관건이다. [4]는 TDM에 기반한 가상화 기법을 제안하였고 이를 무선 테스트베드인 ORBIT(On top of a 802.11 based wireless grid)에 적용하여 그 결과를 보여주고 있다. 여기서는 중앙 컨트롤러에 마스터를 두고 각 노드의 클라이언트를 제어하는 방식을 쓰는데, 마스터에서 내려진 명령은 마감시간에 따라 각 클라이언트에서 실행되므로 시간 동기화가 성능을 좌우하게 된다. 하나의 노드에서는 커널에 hrtimer(high-resolution timer)를 포팅해 스케줄 단위를 최소화해 오차 범위를 수십 us로 줄일 수 있다. 하지만 노드 간에 사용하는 NTP(network time protocol)는 대략 ms 단위의 오차가 발생하게 되어 문제를 야기할 가능성이 크다. 그 예로 TCP 성능을 실험한 결과를 보면 문맥 전환이 될 때마다 무선 혼잡(congestion)이 사라지는 “clear medium problem”이 발생하는데 이로 인해 전반적으로 실제 TCP 성능보다 가상 환경에서의 TCP 성능이 더 잘나오는 것을 볼 수 있다. 이런 경우 가상화된 망에서 얻은 실험 결과를 신뢰할 수 없으며 더 이상 가상화 망을 실험망으로 사용할 수가 없다. 본 논문은 가상화된 망에서 얻은 결과가 실제 망에서 얻은 결과와 어느 정도 유사한지를 판단할 수 있는 신뢰성을 정의하고 높은 신뢰성을 갖는 가상화 기법을 제안한다.

3. 무선랜 가상화

3.1. 일관성(Consistency)

네트워크 가상화의 궁극적인 목표 중의 하나는 하나의 네트워크 상에서 여러 연구자들에게 각자의 실험을 위한 실험망을 제공하는 것이다. 물론 연구자는 가상화된 실험망의 환경과 일반 실험망의 환경이 동일하기를 기대한다. 이는 같은 실험 결과를 기대하기 때문이다.

만약 그렇지 않다면 네트워크 가상화를 통해 여러 실험자들에게 실험망을 제공하려는 소기의 목적에 위배되기 때문에 무선랜의 가상화 기법을 제안함에 있어서 다음의 두 가지 조건은 반드시 만족되어야 한다. 첫 번째, 가상화를 위해 기존 IEEE 802.11 표준을 수정하거나 새로운 기능을 추가해서는 안 된다. 변형된 무선랜을 이용해서 얻은 결과는 표준 무선랜의 것과는 다를 것이기 때문이다. 두 번째, 서로 다른 실험의 프로토콜 간에 상호작용이 있어서는 안 된다. 예를 들어, 그림 1에서 두 개의 실험망이 서로 다른 실험자에 의해 관리되지만 하나의 AP를 공유하고 있다. 각 실험자는 2개의 노드가 하나의 AP를 공유할 때 업링크(uplink) 성능을 측정 중에 있다고 하자. 하지만 두 실험 간에 분리(isolation)을 보장해주는 가상화 기법이 없다면 실험 결과는 4개의 노드가 AP를 공유할 때의 성능이 측정될 것이다. 무선랜의 BEB(binary exponential backoff)는 경쟁 노드의 수에 따라 그 성능이 크게 좌우되기 때문에 노드가 2개인 경우와 4개인 경우의 실험 결과는 상이하다. 이를 방지하기 위해서는 각 실험망에 속한 노드들이 같은 실험망에 속한 노드들의 전송에만 반응하여 백오프를 수행한다거나 NAV(network allocation vector)를 설정하고 다른 실험망에 속한 노드들의 전송에는 반응하지 않도록 해야 한다. 편의상 이런 분리를 프로토콜 분리(protocol isolation)라고 명한다.

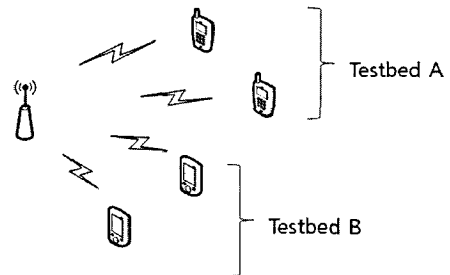


그림 1 하나의 AP를 공유하고 있는 두 개의 실험망

3.2 가상화 기법

위에서 언급한 두 가지의 필요 조건들을 만족하는 가상화 기법을 제안한다. 무선랜의 가상화 기법으로 가장 기본적인 방법론은 하나의 AP가 두 개 이상의 BSSID(basic service set identification)를 사용하는 것이다. 다시 말해 실험망마다 별도의 BSSID를 부여한다. 그리고 각 실험망에 일정 서비스 시간(service time)을 할당하고 모든 실험망들이 번갈아 가면서 AP를 활용토록 한다. 이를 위해 하나의 실험망에 할당된 서비스 시간이 종료되면 AP는 body가 없는 데이터 프레임에 다음에 서비스할 실험망의 BSSID를 적어 브로드캐스팅한다.

기본적으로 브로드캐스트 프레임의 경우 ACK 프레임이 따라오지 않기 때문에 프레임의 duration 필드 값이 '0' 이지만 여기선 가상화를 위해 서비스 시간(T_s)으로 설정한다. IEEE 802.11 표준 문서를 참조하면 브로드캐스트 프레임이 수신된 경우 해당 프레임이 같은 BSS 내에서 전송되었는지를 체크한다[5]. 즉, 수신된 브로드캐스트 프레임에 기록된 BSSID와 자신이 속한 BSS의 ID를 비교하여 같은 경우 정상적으로 수신을 하지만 같지 않은 경우 수신하지 않으며 대신에 NAV를 설정하도록 되어있다. 이런 무선랜의 동작으로 인해 브로드캐스트 프레임에 적힌 BSSID의 실험망을 제외하고 나머지 실험망들에 속한 모든 노드들은 NAV를 설정하여 T_s 시간만큼 경쟁에 참여하지 않게 된다. 따라서 각 실험망은 새로운 서비스를 받기 전에 다음의 시간만큼 기다려야만 한다.

$$T_{wait} = (N-1) \cdot T_s + N \cdot T_c. \quad (1)$$

여기서 N 은 실험망의 수이고 T_c 는 0 byte 데이터 프레임을 브로드캐스팅할 때 소요되는 시간으로 802.11a에서 64 us이다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 NAV 설정을 통해 백오프 상태가 동결되는 시간을 그리고 두 번째 항은 제어 오버헤드를 의미한다.

그림 2는 가상화된 무선랜이 두 개의 실험망을 지원하는 예를 보여주고 있다. AP가 실험망 A에 할당된 BSSID_A가 적힌 데이터 프레임을 브로드캐스팅한다. 이 프레임을 수신한 실험망 B의 노드들은 BSSID를 체크한 후 자신의 그룹에게 온 프레임이 아니므로 T_s 시간만큼 NAV 설정한다. 따라서 실험망 B의 노드들로부터의 방해 없이 실험망 A에 속한 노드들만이 AP와 통신한다. 실험망 A의 서비스 시간이 종료되는 시점에서 다시 AP는 BSSID_B가 적힌 데이터 프레임을 브로드캐스팅함으로써 이번에는 실험망 B에게 T_s 시간만큼 기회를 주게 된다. 하지만 실험망 A의 서비스 시간이 종료되었음에도 불구하고 실험망 A에 속한 노드가 데이터 전송 중일 수 있다. 이런 경우 실험망 A에게 정해진 시간 T_s 보다 더 긴 시간이 주어지게 되는데 이를 보완하기 위해 다음 번 서비스 시간에서 초과된 시간만큼 공제한다. 이렇으로써 장기적으로 시간 할당 측면에서 공평성을 추구한다.

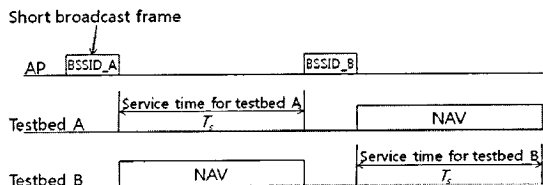


그림 2 두 개의 실험망을 지원하는 제안된 가상화 기법의 동작 예

3.3 시간 분할을 이용한 가상화의 한계

시간 분할을 통해 이론 가상화는 필연적으로 TCP와 같은 지연에 민감한(delay-sensitive) 프로토콜의 성능 평가에 한계가 있다. 각 실험망은 T_s 만큼의 시간 동안 AP를 활용하기 위해서는 T_{wait} 만큼의 시간을 기다려야 하기 때문에 TCP 타임아웃이 빈번하게 발생할 수 있다. 또한, T_{wait} 동안 버퍼에 쌓인 데이터가 T_s 동안에 한꺼번에 전송됨으로써 라우터에서 버퍼 오버플로우(buffer overflow)가 발생할 수 있고 이로 인한 패킷 손실이 데이터 흐름(data flow)의 속도를 바꿀 수도 있다.

지연에 민감한 프로토콜을 위한 가상화 방법으로는 주파수 분할, 코드 분할 등의 방법들이 있다. 이들 방법은 각 실험망에게 새로운 채널을 할당하는 기법들이므로 상호작용뿐만 아니라 추가적으로 발생하는 시간 지연도 없다. 하지만 새로운 무선 자원을 할당하는데 발생하는 추가 비용이 크기 때문에 추가 비용 없이 기존 자원을 나누어서 사용하는 시간 분할 기반 가상화 기법은 도입 목적 자체가 다르다. 따라서 제안된 기법은 지연에 민감하지 않은 UDP 프로토콜을 채택한 실험망에 제한하며 지연에 민감한 TCP 프로토콜을 위한 확장은 차후과제로 남겨놓는다.

3.4 가상화된 무선랜에서의 유효 처리율

실험자는 가상화되지 않은 공간에서의 결과와 가상화된 공간의 결과가 같을 것이라 기대한다. 지연에 민감하지 않은 프로토콜을 실험하는 경우라면 처리율 측면에서의 성능이 주된 관심이 될 것이다. 그 비교를 위해 가상화된 무선랜에서의 i 번째 실험망의 유효 처리율(effective throughput) S_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$S_i = \frac{\text{Number of bits successfully transmitted in testbed } i}{\text{Total time assigned to testbed } i} \quad (2)$$

분모는 각 실험망에 할당된 총 시간을, 분자는 이 시간 동안 전송에 성공한 비트의 수를 의미한다. 분리(isolation)가 잘 된 가상화 기법일수록 실험망의 수에 무관하게 식 (2)의 유효 처리율은 비슷해진다. S_i 가 일정할수록 일관성이 좋거나 신뢰할만한 결과를 얻었다고 말할 수 있다.

3.5 가상화로 인한 무선 채널의 불연속성

비록 프로토콜 측면에서 분리(isolation)를 달성했다고 할지라도 가상화로 인한 무선 채널의 불연속성이 가상화된 무선랜에서의 성능 평가를 왜곡할 수 있다. 그림 3을 통해 그 예를 살펴보자. 도플러 주파수가 1 Hz인 Rayleigh 페이딩[6] 채널에서 가상화되지 않은 무선랜에서 한 노드가 전송할 수 있는 시점을 고려해 보자. 노드의 전송은 랜덤 프로세스에 표현되는 백오프 메커니즘에 의해서 결정되므로 넓은 관점에서 보면 연속적인 시간

위에 어느 곳이든 발생할 수 있다. 왼쪽 그림은 전송 가능한 모든 시점에서의 무선 채널 상태를 보여주는데 어느 시점에서도 전송이 가능하기 때문에 연속적으로 이어진 채널 상태를 보여준다. 하지만 가상화된 무선랜에서는 매 번 서비스를 받기 전에 T_{wait} 만큼의 시간을 기다려야 하고 이 기간 동안에는 NAV가 설정되어 있어서 전송 시도 자체를 할 수가 없다. 이로 인해 오른쪽 그림과 같이 가상화된 무선랜이 두 개의 실험망을 지원할 때 한 노드의 입장에서 전송 가능한 시점의 채널 상태가 중간 중간에 끊어져 표현되었다. 이를 편의상 가상화로 인해 발생한 인위적 채널의 불연속성이라 하자.

도플러 주파수는 시간에 따라 채널 상태가 얼마나 빠르게 변화하는지를 결정하는 파라미터로 도플러 주파수가 클수록 더 빠르게 변한다. 하지만 도플러 주파수 외에도 가상화로 인해 발생한 채널의 불연속성은 노드가 채점하는 채널 변화를 바꾼다. 예를 들어, 데이터 전송에 성공한 한 노드가 바로 이어서 다음 데이터를 전송할 경우 두 번째 데이터를 전송할 때의 채널 상태는 첫 번째 데이터를 전송할 때의 채널 상태와 매우 흡사할 수 있다. 이는 도플러 주파수가 작으면 작을수록 그 가능성은 커진다. 하지만 가상화된 무선랜의 경우에 연속된 두 번의 전송 사이에 T_{wait} 만큼 시간이 끼어들면 비록 한 노드의 입장에서 연속된 전송일지라도 각 전송할 때 경험한 채널 상태는 T_{wait} 만큼 시간이 떨어져 있어서 매우 상이할 가능성이 크다. 즉, 가상화를 하지 않은 무선랜에서는 경험하지 못한 급격한 채널 변화가 가상화된 무선랜에서는 발생하는 것이다. 급격한 채널 변화의 빈도는 T_s 와 N 에 의해서 결정되며 도플러 주파수가 작을수록 그 영향은 커진다. 이는 도플러 주파수가 커질수록 페이딩 현상 자체로 인해 발생하는 채널 상태의 급격한 변화가 발생할 수 있으며 이는 가상화로 인한 채널의 불연속성의 영향을 감소시키기 때문이다.

가상화로 인한 무선 채널의 불연속성이 항상 무선랜의 성능에 영향을 미치는 것은 아니다. 전송속도 적응 알고리즘(rate-adaptation algorithm)으로 RBAR(receiver based auto rate)[7]를 사용할 경우 상관시간(coherence time)이 0.001초보다 작지 않다면 RTS/CTS를 활용하여 비교적 정확하게 채널 상태를 측정하고 최적의 전송 속도를 결정할 수 있다[8]. 따라서 가상화 망에서 T_s 가 0.001초 보다 작지 않는 한 가상화로 인한 채널의 불연속성이 RBAR를 채택한 무선랜의 성능에 영향을 주지 않는다. 반면에 ARF(Automatic Rate Fallback)[9]를 속도 적응 알고리즘으로 선택한다면 가상화로 인해 발생하는 인위적 채널의 불연속성의 영향을 많이 받게 된다. 이는 ARF가 RBAR처럼 채널 상태를 측정하는 대신에 연속된 데이터 전송 성공/실패에 따라서 경험적으로 전송 속도를 올리거나/내리거나 하기 때문이다. 이런 경험적인 알고리즘은 채널 상태가 시간에 따라서 어떻게 변화하는지를 전송 성공/실패 횟수를 통해 간접적으로 예측하기 때문에 인위적 채널의 불연속성이 예측을 매우 어렵게 만든다. 이런 어려움으로 인해 가상화로 인해 발생한 무선 채널의 불연속성이 처리율에 미치는 영향을 수학적으로 분석하기가 매우 어렵다. 특히 페이딩 채널이 time-correlation 특성을 지닌 경우엔 더욱 그렇다[10]. 이와 관련한 수학적 분석 모델은 차기 연구로 수행할 계획이다. 따라서 본 논문에서는 수학적 분석 모델 대신 수행 가능한 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능 평가를 수행한다.

4. 성능 평가

성능 평가의 주 척도는 식 (2)의 유효 처리율이다. 실험망의 수에 무관하게 유효 처리율이 일정할수록 가상화로 인한 성능 평가의 왜곡이 적은 것으로 평가한다. 지연에 민감하지 않은 전송 프로토콜을 대상으로 제안

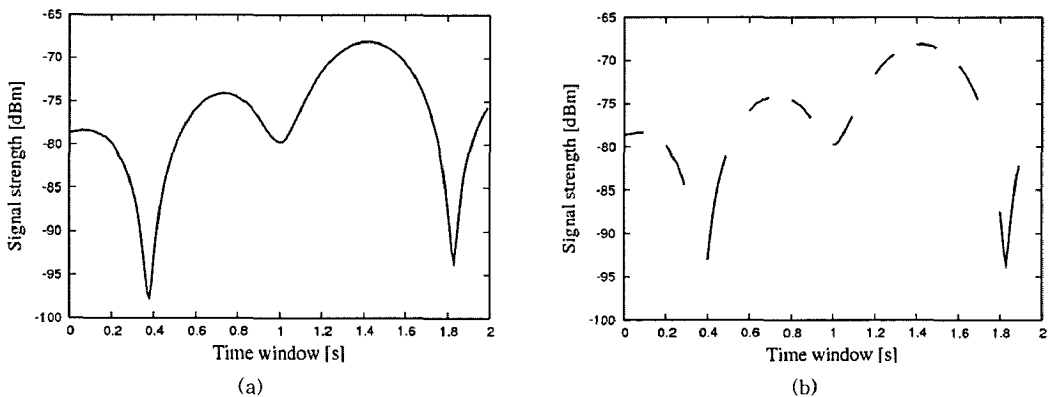


그림 3 노드가 전송 가능한 시점의 채널 상태 (a) 가상화되지 않은 무선랜 (b) T_s 가 0.1초인 가상화된 무선랜

된 가상화 기법이므로 지연에 관련된 성능 평가는 수행하지 않는다. 또한, 실험망 사이에 프로토콜 분리를 달성하기 위해 T_s 시간마다 AP가 0 byte의 데이터 프레임 전송하는데 802.11a의 경우 프레임 헤더 및 프리앰블(preamble)을 포함해 64 us의 시간이 소요된다. 이는 T_s 가 millisecond 단위로 설정되면 무시할 정도의 수준이어서 모의실험에는 반영하였지만 별도로 평가하지는 않는다.

성능 평가는 IEEE 802.11a 시스템을 이용해서 수행된다. 하나의 AP가 가상화를 통해 여러 실험망들이 공유를 하며 이때 주위의 AP들로부터의 신호 간섭은 없다고 가정한다. 실험망의 수가 1이면 가상화되지 않은 경우이며 2개 이상이면 가상화가 적용된 경우이다. 모의 실험은 기존 ns-2[11]보다는 매트랩[12]에서 수행되었는데 이는 매트랩이 도플러 주파수와 Ricean 계수(Ricean factor) 등을 바꿔가면서 다양한 페이딩 채널을 생성하는데 유리하기 때문이다. 본 저자는 ns-2에서도 동일한 실험을 수행하였는데 아주 유사한 결과를 확인하였다. 별도로 언급하지 않는다면 각 가상화된 실험망에서의 실험 내용은 하나의 노드가 가상화된 AP에 1500 byte의 데이터 프레임을 연속해서 전송하는 것이다. 전송속도 적용 알고리즘으로는 RBAR와 ARF가 사용되었다. ARF의 경우 기본값인 up 임계값으로 10을 down 임계값으로 2를 사용하였다. 임계값을 변경하면서 같은 실험을 반복한 결과 임계값에 대해서 큰 의존상태는 확인되지 않았다.

4.1 실험망의 수(N)에 대한 유효 처리율의 변화

실험망의 수의 증가가 유효 처리율에 어떠한 영향을 주는 지 살펴본다. 먼저, 무선 채널이 도플러 주파수가 1Hz이고 평균 수신 신호세기(received signal strength, RSS)가 -72dBm인 Rayleigh 페이딩을 겪을 때 주어진 서비스 시간에서 실험망의 수를 증가시켰을 때 유효 처리율의 변화량을 살펴본다. 그림 4는 속도 적용 알고리즘이 ARF인 경우이고 그림 6은 RBAR인 경우이다.

ARF인 경우 그림 4의 매트랩 모의실험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 실험망의 수가 증가할수록 유효 처리율에 급격한 변화가 발생한다. 특히 서비스 시간이 5ms 또는 10ms일 때 실험망의 수가 증가할수록 유효 처리율이 큰 폭으로 감소한다. 서비스 시간이 10ms일 때 실험망의 수가 5, 10이 되면 가상화가 되지 않은 경우에 비해 유효 처리율이 각각 19%, 31% 감소한다. 이 이유는 그림 5를 살펴보면 알 수 있다. 여기서 서비스 시간이 10ms이고 실험망의 수가 1, 5, 10일 때 전송속도 별 전송 성공한 횟수를 보여주는데 실험망의 수가 증가할수록 높은 속도의 성공 빈도는 낮아지고 반대로 낮은 속도의 빈도는 증가한다. 다시 말해, 가상화로 인한 채널

의 불연속성이 실험망의 수가 증가할수록 ARF로 하여금 적절한 전송속도를 선택하지 못하도록 방해함을 보여준다.

또 한 가지 흥미로운 것은 서비스 시간이 100ms와 1000ms인 경우 가상화가 이루어지면 일단 유효 처리율이 다소 감소하지만 실험망이 증가할수록 그 감소량은 일정 수준을 유지한다. 이는 채널의 불연속성이 항상 채널의 급격한 변화만 일으키는 것이 아니라 유사한 채널을 경험하게 할 수도 있음을 반증한다. 도플러 주파수에 따라서 다르지만 서비스 시간이 일정 수준 이하가 되면 채널의 불연속성이 채널의 급격한 변화를 일으킬 확률이 크지만 반대로 서비스 시간이 증가하면 유사한 채널을 만날 확률도 점점 증가한다. 서비스 시간이 일정 수준 이상이 되면 두 확률이 비슷해져 실험망의 수가 증가하더라도 더 이상 유효 처리율이 감소하지 않는 것이다.

이런 현상은 그림 4의 ns-2 모의실험 결과에서도 확인할 수 있다. 또한 매트랩의 유효 처리율이 ns-2의 결과와 상당히 비슷하기 때문에 본 논문의 유효 처리율에 대한 평가가 어느 정도 신뢰할 수준임을 보인다. 단, ns-2의 결과가 매트랩의 결과에 비해 약간 높게 평가된 것은 생성된 time-correlated 페이딩 채널의 특성이 약간 차이가 있기 때문이다. 따라서 앞으로의 모든 평가 결과는 보다 신뢰할만한 수준의 페이딩 채널을 생성하는 매트랩의 것을 보여준다.

예상대로 RBAR는 그림 6에서 보듯이 도플러 주파수가 너무 커져서 상관시간(coherence time)이 0.001초 이하가 되지 않는한 가상화로 인한 급격한 채널 변화에도 현재 채널 상태에 맞는 전송속도를 선택한다. 따라서 어느 서비스 시간에서도 실험망의 수가 증가해도 일정한 유효 처리율을 보이는 것이다. 이 말은 제안된 가상화 기법이 RBAR를 이용한 실험에 효과적인 가상화를 제공할 수 있음을 의미한다. 또한, 채널의 불연속성이 전송속도의 선택에 영향을 주지 않는다면 제안된 가상

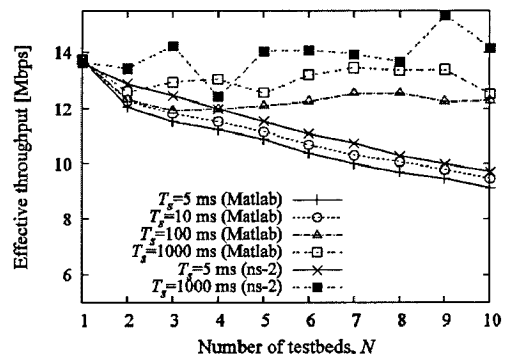


그림 4 다양한 서비스 시간에서 실험망의 수에 대한 ARF의 유효 처리율의 변화

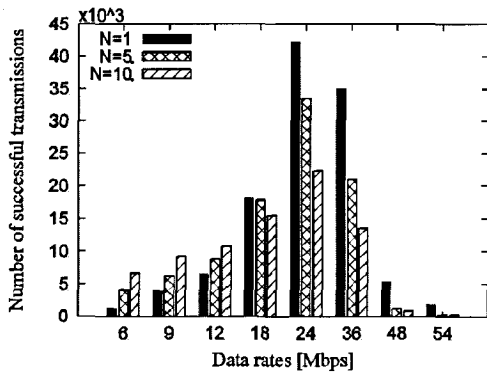


그림 5 그림 4의 결과에서 서비스 시간이 10ms일 때 전송속도 별 전송 성공한 횟수

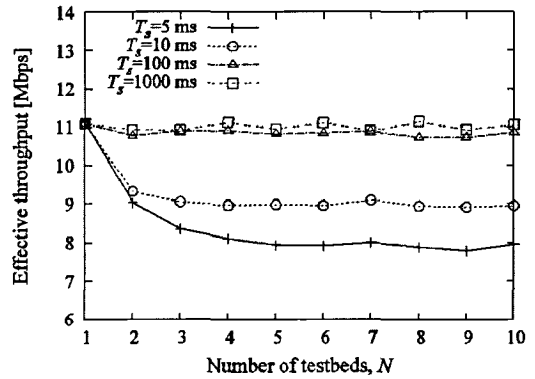


그림 7 도플러 주파수가 10Hz일 때 실험망의 수에 대한 ARF의 유효 처리율의 변화

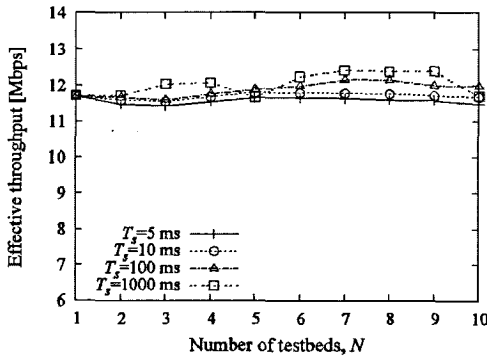


그림 6 다양한 서비스 시간에서 실험망의 수에 대한 RBAR의 유효 처리율의 변화

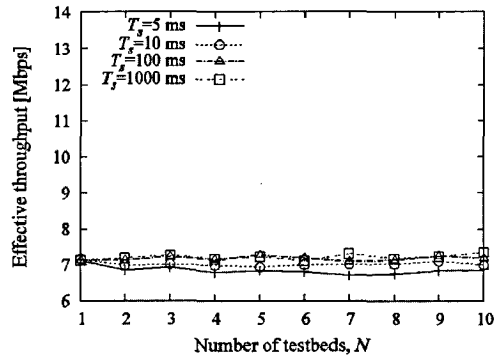


그림 8 도플러 주파수는 40Hz일 때 실험망의 수에 대한 ARF의 유효 처리율의 변화

화는 프로토콜 분리를 보장함을 의미하며 반대로 유효 처리율의 저하는 전적으로 채널의 불연속성으로 인한 전송속도 적응 알고리즘의 오동작으로 인해 발생함을 의미한다. 따라서 이후부터의 모든 실험은 ARF만을 이용한다.

4.2 도플러 주파수에 대한 유효 처리율 변화

같은 실험을 도플러 주파수가 10Hz와 40Hz일 때도 수행하였다. 그림 7에서 보는 것처럼 도플러 주파수가 10Hz로 증가하면 서비스 시간이 100ms와 1000ms인 경우 실험망의 수와 무관하게 유효 처리율이 감소 없이 일정하다. 서비스 시간이 5ms와 10ms인 경우도 다소 감소하지만 실험망의 수가 증가해도 더 이상 감소하지 않는다. 이는 다음의 두 가지 이유가 있다. 첫 번째, ARF는 도플러 주파수가 증가할수록 적응 능력이 떨어져 성능이 감소된다. 그림 4에서 N=1인 경우 유효 처리율이 13.7 Mbps인데 비해 그림 7에서 N=1인 경우 평균 RSS가 1 dB나 좋은데도 불구하고 유효 처리율이 11 Mbps로 감소된 것이 바로 이 이유로 인함이다. 따

라서 전체적으로 ARF가 사용하는 전송속도가 낮아짐으로써 채널의 불연속성으로 인해 전송속도가 낮아질 가능성은 다소 줄어든다. 두 번째, 도플러 주파수가 증가하면 상대적으로 채널의 불연속성의 영향이 줄어든다. 예를 들어, 도플러 주파수가 무한대가 되면 불연속성의 영향을 전혀 받지 않을 것이다.

그림 8은 도플러 주파수가 40Hz일 때 결과를 보여준다. 예상대로 위에서 언급한 두 가지 이유로 인해 유효 처리율은 서비스 시간에 대해서도 실험망의 수에 대해서도 감소 없이 일정 수준을 유지한다. 중복된 결과로 인해 생략했지만 평균 채널 상태가 나빠져도 비슷한 이유들로 인해 채널의 불연속성으로부터의 영향은 줄어든다.

4.3 노드 수에 대한 유효 처리율의 변화

각 실험망에서 노드의 수가 1보다 큰 경우엔 각 실험망 내에서 충돌이 발생한다. 이런 경우 가상화가 미치는 성능의 영향을 그림 9가 보여주고 있다. 노드의 수가 증가해도 서비스 시간이 작으면(여기서는 5ms) 여전히 가상화로 인해 유효 처리율이 감소된다. 단, 노드의 수가

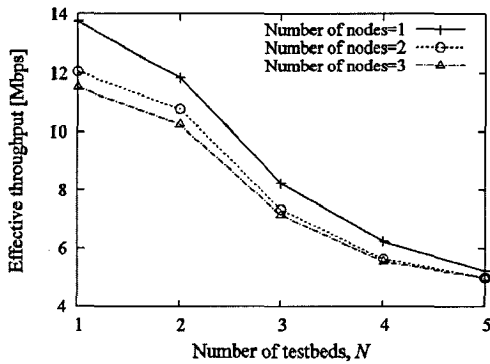


그림 9 각 실험망에서 노드의 수가 변할 때 실험망의 수에 대한 ARF의 유효 처리율의 변화

증가할수록 감소량은 조금씩 줄어들지만 그 양은 무시할 정도이다. 따라서 노드의 수가 1보다 큰 경우에도 주어진 도플러 주파수에 맞춰서 적정 서비스 시간을 결정하는 것이 중요하다.

4.4 Ricean 계수(Ricean factor)에 대한 유효 처리율의 변화

마지막으로 Ricean 계수에 대한 영향을 살펴보자. Ricean 계수 K는 LOS(line-of-sight) 신호 세기와 NLOS(non-line-of-sight) 신호 세기의 비로 클수록 신호세기 측면에서 페이딩 채널의 변화폭이 줄어들음을 의미한다. K=0인 경우 Rayleigh 페이딩이라 하며 K>0이면 Ricean 페이딩이라 한다. 그림 10과 그림 11은 같은 페이딩 채널 환경에서 서비스 시간이 10ms와 100ms인 경우의 결과를 각각 보여준다. 양쪽 결과 모두 Ricean 계수가 커질수록 ARF의 성능 평가의 왜곡은 줄어든다. 이는 채널 상태의 변화폭이 줄어들면서 Twait 만큼의 시간 뒤에도 비슷한 채널 상태를 경험할 확률이 증가하기 때문이다. 극단적으로 K=∞인 경우 채널 상태가 시간에

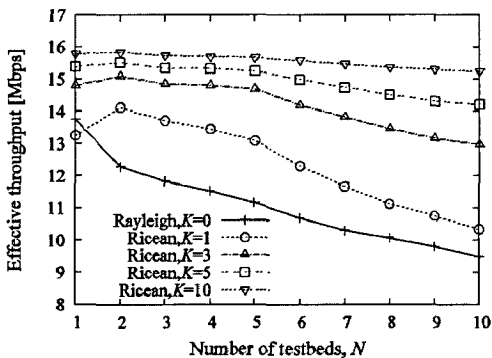


그림 10 서비스 시간이 10ms일 때 다양한 Ricean 계수에서 실험망의 수에 대한 ARF의 유효 처리율의 변화

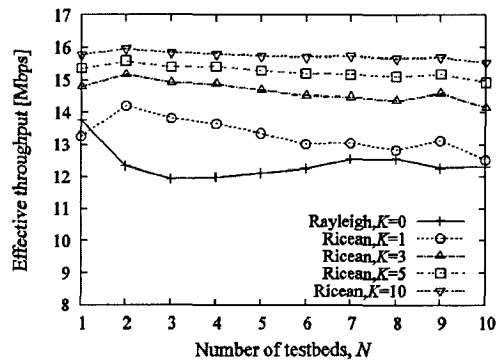


그림 11 서비스 시간이 100ms일 때 다양한 Ricean 계수에서 실험망의 수에 대한 ARF의 유효 처리율의 변화

따라 변화하지 않는데 이 경우 채널의 불연속성의 영향은 전혀 없다.

다만, 서비스 시간이 10ms이면 K=3일 때 실험망의 수가 5개가 넘어가면 가상화 망의 결과를 점점 신뢰하기 힘들데 비해 서비스 시간이 100ms이면 K=1일 때 N에 상관없이 어느 정도 일관성이 있는 결과를 얻을 수 있다. 특히하게 K=1일 때 N이 2~3인 경우 오히려 유효 처리율이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 흔히 발생하지는 않지만 채널의 불연속성이 오히려 다이버시티 이득을 발생시킨 것으로 보인다. 하지만 그 정도는 미미하다.

5. 결론

지금까지 시간 분할을 통한 무선랜의 가상화 기법과 이 기법을 적용한 망에서의 실험결과와 일관성에 대해서 다양한 채널 환경에서 검증해보았다. 제안된 기법은 표준의 수정 및 추가가 없어 구현이 용이하며 추가로 발생하는 비용도 802.11a에서는 무시할 수준으로 작다. 이 기법은 프로토콜 분리를 달성하였지만 무선 채널의 특성상 특히 도플러 주파수가 작은 페이딩 채널에서 가상화로 인해 발생하는 채널의 불연속성으로 인해 성능 평가의 왜곡이 발생할 수 있다. 도플러 주파수가 1Hz인 Rayleigh 페이딩 채널에서는 서비스 시간을 100ms 정도로 선택하면 10% 정도의 성능 왜곡이 발생하는데 도플러 주파수가 증가할수록 왜곡의 정도는 줄어들어 10Hz에서는 거의 없어진다. 또한, Ricean 계수가 커질수록 서비스 시간을 작게 잡아도 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다. 이런 경우 지연에 민감한 TCP 성능 평가에도 제안된 가상화 기법을 적용할 수 있을 것이다. 성능 평가 척도를 포함한 TCP 관련 결과는 차후과제로 남겨놓는다.

결과적으로 주어진 페이딩 채널의 특성(즉, 도플러 주파수, Ricean 계수, 평균 RSS)과 실험망의 수를 동시에 고려하여 서비스 시간을 결정한다면 채널 불연속성의 영향을 최소화하여 궁극적으로 가상화된 무선랜에서 일관성(consistency)이 높은 실험결과를 얻을 수 있다.

참 조 문 헌

[1] T. Anderson, L. Peterson, S. Shenker, and J. Turner, "Overcoming the Internet Impasse through Virtualization," *IEEE Computer Magazine*, Apr. 2005.

[2] G. Smith, A. Chaturvedi, A. Mishra, and S. Banerjee, "Wireless Virtualization on Commodity 802.11 Hardware," *WiNTECH 2007*, Sep. 2007.

[3] I. Seskar, "Virtualization techniques for wireless testbeds," *Workshop on Methods and Tools for Network Analysis INTIMATE 2007*, Paris, France, Jul. 2007.

[4] G. smith, A. Chaturvei, A. Mishra, S. Banerjee, "Wireless virtualization on commodity 802.11 hardware," *WiNTECH 2007 (A Workshop in Mobi-Com 2007)*, Montreal, Canada, Sep. 2007.

[5] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *ANSI/IEEE Std 802.11*, 1999 Edition.

[6] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, 2nd Edition, Prentice Hall.

[7] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks," *Proc. ACM MOBICOM 2001*, Rome, Italy, pp.236-251, Jul. 2001.

[8] J. Camp and E. Knightly, "Modulation Rate Adaptation in Urban and Vehicular Environments: Cross-layer Implementation and Experimental Evaluation," *Proc. ACM MOBICOM 2008*, San Francisco, USA, pp.315-326, Sep. 2008.

[9] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band," *Bell Lab Technical Journal*, vol.2, no.3, pp.118-133, 1997.

[10] S. Hahm, J. Lee, and C. Kim, "Opportunistic Waiver of Data Reception for Exploiting Multiuser Diversity in the Uplink of IEEE 802.11 WLAN," *IEEE INFOCOM 2008*, Phoenix, AZ, USA, April 2008.

[11] NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2007.

[12] Matlab, <http://www.mathworks.com/>, 2009.



합 성 일

2002년 한동대학교 전산전자공학부 학사
2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사. 2007년~2008년 Purdue University 방문학생. 2009년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사. 2009년~현재 삼성전자 DMC 연구소 책임 연구원



이 희 진

1997년 광운대학교 전자계산학과 학사 1997년 삼성전자 중앙연구소 연구원. 2000년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사. 2010년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정



강 영 명

2000년 경상대학교 컴퓨터학과 학사
2003년 서울대학교 전기컴퓨터공학과 석사
2003년~2006년 LG전자 Mobile Lab 근무. 2006년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정



임 상 순

2005년 성결대학교 컴퓨터학부 학사. 2007년 고려대학교 전자컴퓨터공학과 석사
2007년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정



김 종 권

1981년 서울대학교 산업공학과 학사. 1982년 University of Illinois at Urbana-Champaign 석사. 1987년 University of Illinois at Urbana-Champaign 박사
1987년~1991년 Bellcore 연구원. 1991년~현재 서울대학교 교수