

논문 2014-51-7-3

다중 무선랜 인터페이스 전송을 위한 결합 방식의 성능 연구

(A Comparative Study of Aggregation Schemes for Concurrent Transmission over Multiple WLAN Interfaces)

유 리 스*, 황 환 응*, 윤 지 훈**

(Yuris Mulya Saputra, Hwanwoong Hwang, and Ji-Hoon Yun[©])

요 약

무선 전송 용량의 향상을 위해 다른 주파수 대역을 사용하는 복수 개의 무선 인터페이스를 결합하여 동시에 사용하는 것을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 복수 개의 Wi-Fi 인터페이스를 갖는 시스템을 대상으로, 인터페이스 결합 사용을 위한 링크 결합과 다중경로 TCP(MPTCP)의 두 기법을 실험을 통해 성능을 비교, 분석한다. 실험은 트래픽 종류, 네트워크 지연 시간, 무선 채널 품질, 인터페이스 장애 등의 다양한 조건이 고려되었다. 실험 결과, 인터페이스 결합을 통한 다중 전송은 큰 수율 이득이 있었다. 하지만, 링크 결합 기법은 패킷 전달 순서의 변경으로 중복 TCP 응답이 발생하여 MPTCP보다 낮은 수율을 보였고, 이의 개선을 위해 응답 필터링이 적용될 경우 이득이 있음을 확인하였다. 또, 링크 결합 기법에서 스케줄링 가중치의 조합에 따른 성능 차이가 있으므로 시공간에 따라 적응적으로 가중치를 조절할 필요가 있음을 보였다. 한편, 링크 결합 기법은 MPTCP 대비 빠른 반응으로 인해 긴 네트워크 지연 시간 및 인터페이스 장애 시 더 나은 성능을 보였다. 끝으로, 평균 소비 전력 계산을 위한 수학 모델을 제시하고, 이를 통해 각 기법의 소비 전력을 비교, 분석하였다.

Abstract

To increase wireless capacity, the concurrent use of multiple wireless interfaces on different frequency bands, called aggregation, can be considered. In this paper, we focus on aggregation of multiple Wi-Fi interfaces with packet-level traffic spreading between the interfaces. Two aggregation schemes, link bonding and multipath TCP (MPTCP), are tested and compared in a dualband Wi-Fi radio system with their Linux implementation. Various test conditions such as traffic types, network delay, locations, interface failures and configuration parameters are considered. Experimental results show that aggregation increases throughput performance significantly over the use of a single interface. Link bonding achieves lower throughput than MPTCP due to duplicate TCP acknowledgements (ACKs) resulting from packet reordering and filtering such duplicate ACKs out is considered as a possible solution. However, link bonding is fast responsive to links' status changes such as a link failure. It is shown that different combinations of interface weights for packet spread in link bonding result in different throughput performance, envisioning a spatio-temporal adaptation of the weights. We also develop a mathematical model of power consumption and compare the power efficiency of the schemes applying different power consumption profiles.

Keywords : 링크 결합, 다중경로 TCP, Wi-Fi, 무선랜

* 학생회원, ** 정회원, 서울과학기술대학교 전기정보공학과

(Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

© Corresponding Author(E-mail: jhyun@seoultech.ac.kr)

※ 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

접수일자: 2014년02월11일, 수정일자: 2014년05월14일
수정완료: 2014년06월23일

I. 서 론

무선 네트워킹을 통해 고속의 데이터 서비스를 받고자 하는 수요는 계속해서 증가하고 있다. 이를 충족시키기 위해, 무선 통신링크의 전송 용량을 향상시키기 위한 많은 방안의 연구개발이 이루어져 왔다. 그 중에서, 추가적인 주파수 스펙트럼을 이용하여 서비스 대역

폭을 늘리는 것은 무선 용량 증대를 위한 매우 효과적인 방법이며, 이는 다음의 두 가지의 다른 방법으로 실현될 수 있다: (1) 채널 자체의 대역폭을 확장, 또는 (2) 다수의 주파수 채널을 동시에 사용. 이 중에서, 방법 (2)는 일반적으로 결합(aggregation 또는 bonding)이라 부르고, 이는 또, 멀티채널 결합을 지원하는 하나의 무선 인터페이스를 사용하거나, 복수 개의 무선 인터페이스를 사용하여 구현할 수 있다.

복수 개의 무선 인터페이스를 사용하여 결합을 구현하는 것은 두 가지 장점을 갖는다. 첫째, 기존 인터페이스의 변경없이 즉시 다중채널 무선 시스템을 구축하는 것이 가능하다. 하나의 인터페이스가 다중 채널의 결합을 지원하기 위해서는 표준화를 필요로 하는 물리 및 MAC 계층의 변경을 동반하거나 하드웨어의 재설계가 필요하다(예: LTE-Advanced의 carrier aggregation, IEEE 802.11n의 channel bonding). 반면에 액세스 네트워크 구성 요소 중 일부는 이미 다중 인터페이스를 갖추고 있다. 그 예로 듀얼밴드 AP(Access Point)와 Wi-Fi AP 통합형 펌토셀 기지국이 있다. 뿐만 아니라, 오늘날 사용되고 있는 대부분의 스마트폰은 이동통신과 Wi-Fi 등 복수 개의 무선 인터페이스를 갖추고 있다. 단일 인터페이스만을 갖고 있는 단말의 경우(예: 랩탑)에도 USB, PCI 방식 등의 추가적인 무선통신 어댑터 장치를 추가함으로써 즉시 다중 인터페이스 환경을 구축할 수 있다.

두 번째로, 연결 장애에 보다 안정적으로 대처할 수 있다^[1]. 무선 네트워킹 시 신호 손실로 인해 통신 연결이 끊기는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황은 사용자가 높은 이동성을 가질 때 보다 빈번하다. 하지만, 다중 인터페이스를 이용할 경우, 적어도 하나의 인터페이스는 통신 연결을 유지하고 있을 가능성이 있으므로, 보다 안정적인 무선 서비스를 제공할 수 있다. 이러한 가능성은 인터페이스들의 특성-기술, 서비스 영역, 주파수 등-이 서로 상이할 때, 보다 높아진다.

하지만, AP와 단말이 각각 다중 인터페이스를 갖고 있다고 해서 이들을 동시에 사용하여 데이터 송수신을 할 수 있는 것은 아니다. 각각의 무선 인터페이스는 기본적으로는 서로 독립적으로 동작하므로 운영체제 차원에서 다중 인터페이스를 통합하여 상위 계층과 연결하고 인터페이스 간 트래픽을 분배하는 것이 필요하다. 이를 위한 방식은 통합 및 분배가 어떤 계층에서 수행

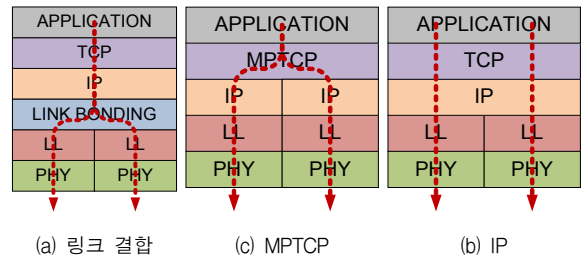


그림 1. 다중 인터페이스 결합 기법

Fig. 1. Aggregation schemes for the concurrent use of multiple interfaces.

되는지에 따라 링크, IP, 그리고 전송 계층 기법으로 분류할 수 있다(그림 1). 각 기법의 간략한 동작은 다음에서 설명한다.

링크 계층 기법은 일반적으로 링크 결합 (Link bonding)이라 불리며, 그림 1(a)와 같이 링크 계층이 다중 인터페이스들을 통합한 가상의 인터페이스를 생성해 상위 계층과 연결한다. 즉, 상위 계층은 가상의 단일 인터페이스만을 인지한다. 따라서, 트래픽의 종류(예: TCP 또는 UDP)와 상관없이 동작이 가능하다는 장점을 갖는다. 또, 링크 계층은 IP 계층으로부터 전달받은 패킷을 인터페이스들 사이에 분배하는 역할을 수행한다. IP 계층 기법은 그림 1(b)에 도시된 것과 같이 IP 플로우 단위로 인터페이스에 트래픽을 분배한다. 따라서, 다른 두 기법보다 트래픽의 분배 단위가 크다. 다중 경로 TCP(Multipath transmission control protocol 또는 MPTCP)^[2]는 전송 계층 기법으로서(그림 1(c)), 단일 TCP 세션의 데이터를 전송 경로 별로 서브플로우(subflow)를 만들어 분배한다. TCP 전송자는 서브플로우 간 TCP 패킷을 분배 하는 역할을 수행한다. MPTCP의 실현을 위해서는 TCP 전송자와 수신자 모두 프로토콜 스택이 변경되어야 한다. 이들 기법 중, 링크 계층 기법과 MPTCP는 패킷 단위의 트래픽 분배를 가능하게 해 다중 인터페이스의 효율성을 최대화할 수 있다.

본 논문은 링크 계층 기법과 MPTCP를 대상으로 다양한 환경과 실험 항목에 대해 성능 비교 및 분석 연구를 수행한다. 이를 위해, AP와 단말이 각각 두 개의 무선 인터페이스를 갖는 다중 Wi-Fi 시스템을 구축하고 링크 결합과 MPTCP를 실험하였다. 실험에서는 트래픽 유형, 네트워크 지연시간, 채널 품질, 인터페이스 장애 등 다양한 조건을 고려하여 단일 인터페이스 사용 대비

이득 및 서로 간의 장단점을 분석하였다. 그리고, 링크 결합 기법에서 인터페이스 간 트래픽 스케줄링 가중치의 영향을 실험하였다. 또, 링크 결합의 성능 개선 방안을 제시하고 이의 성능 이득을 보였다. 마지막으로, 수학적 분석 및 시뮬레이션을 통해 두 기법들의 소비 전력 효율을 비교하였다. 비교 결과에 대한 간략한 설명은 아래와 같다.

실험 결과, 양 기법 모두 단일 인터페이스만을 사용하는 것보다 향상된 수율 성능을 보였으며, 링크 결합의 경우 패킷 전달 순서의 변경(reordering)으로 인해 중복 TCP 응답(duplicate TCP Acknowledgement)이 발생하여 MPTCP보다 낮은 성능을 보였다. 하지만, 링크 결합은 긴 네트워크 지연 시간 및 링크 단절 상황에서 더 나은 응답 특성을 보였다. 또, 링크 결합 기법에서 인터페이스 간 최적의 스케줄링 가중치는 각 인터페이스가 겪는 채널 품질에 의존성이 있음을 보였고, 이는 최적 성능을 위해 가중치를 시공간에 따라 적응적으로 적용할 필요가 있음을 의미한다.

II. 관련 연구

다중 네트워크 인터페이스의 결합 기법에 대한 과거의 실험적인 연구들이 일부 존재한다. [3]은 복수 개의 이더넷 인터페이스에 링크 결합 기법을 적용하였고, 인터페이스들이 서로 다른 대역폭을 가질 때의 효과를 조사하였다. [4]에서는 복수 개의 Wi-Fi 인터페이스에 링크 결합을 적용하였다. MPTCP를 통해 Wi-Fi와 3G 이동통신을 결합 사용할 때의 핸드오버 성능과 에너지 소비도 조사되었다^[5]. [6]과 [7]에서는 인접 대역을 사용하는 다수의 Wi-Fi 인터페이스를 이용해 높은 전송률을 얻기 위한 결합 기술을 제안하였다. 제안된 기법은 모든 인터페이스들의 전송 타이밍을 일치시킴으로써, 인접 채널의 전송을 채널 내 전송으로 감지하는 것을 방지한다. IP 계층 기법과 MPTCP간의 성능 비교 결과는 [8]에서 제시되었다. 그러나, 동일 플랫폼에서 링크 결합 기법과 MPTCP의 성능을 비교한 연구는 현재까지 수행되지 않았다.

III. 실험 결과 및 분석

1. 실험 환경

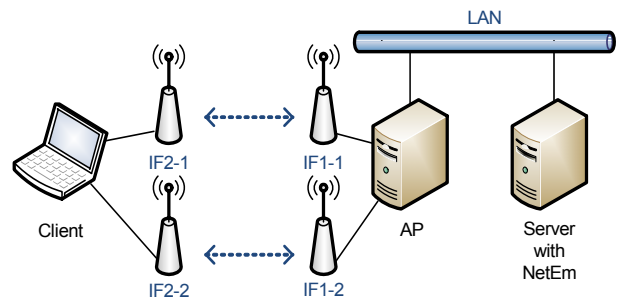


그림 2. 다중 Wi-Fi 인터페이스 시스템 실험 환경
Fig. 2. Experimental setup.

실험을 위해 구축한 다중 인터페이스 무선 시스템은 그림 2와 같이 클라이언트(랩탑, 2.4 GHz Core 2 Duo CPU, 4GB RAM), AP(데스크탑, 3.3 GHz Core i3 CPU, 4 GB RAM), 그리고 서버(데스크탑, 3 GHz Core 2 Duo CPU, 2 GB RAM)로 이루어져 있다. 모든 컴퓨터는 Ubuntu 12.10 운영체제로 동작한다. AP와 클라이언트는 각각 두 개의 Wi-Fi USB 어댑터(Netgear WNDA3100, Atheros AR9170 칩셋, 802.11a/b/g/n 지원)가 설치되었다. AP와 클라이언트 간에 한 쌍의 Wi-Fi 인터페이스는 5 GHz 대역을 이용하는 802.11a 모드로 연결되고, 다른 한 쌍은 2.4 GHz 대역을 이용하여 802.11g 모드로 연결된다. 링크 결합을 위해서는 리눅스 커널의 기본 모듈을 사용하고, MPTCP는 공개된 스택^[10]을 사용한다. 특별한 명시가 없다면 링크 결합에서 인터페이스 간 트래픽 스케줄링은 라운드로빈 방식을 사용한다(1:1 스케줄링 가중치 이용). 유선 인터넷의 지연 시간을 에뮬레이션하기 위해 서버에서는 netem 모듈^[9]을 사용한다. netem에 의한 네트워크 지연 기본값은 50 ms로 설정한다. 서버와 클라이언트 간 트래픽 발생과 수율 측정은 iperf를 사용하여 수행한다.

2. 성능 평가

(1) 수율 성능 비교

그림 3은 전송 설정 간의 수율(throughput) 성능을 비교하고 있다. 그림이 보이는 것처럼, 두 인터페이스를 결합하여 사용하는 것이 단일 인터페이스를 사용하는 것보다 더 나은 수율을 얻는다. MPTCP의 경우, 결합 수율은 각 인터페이스가 단독으로 사용되었을 때 얻는 수율을 합한 값에 가깝다. 즉, 단일 TCP 세션이 두 개의 인터페이스를 모두 최대로 사용하고 있음을

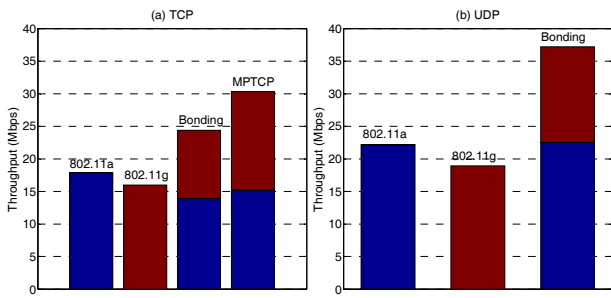


그림 3. 수율 성능 비교
Fig. 3. Comparison of throughput performance.

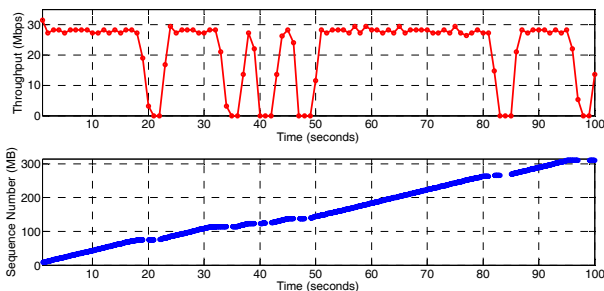


그림 4. 링크 결합 기법 사용 시 시간에 따른 수율 및 TCP 순차 번호의 변화
Fig. 4. Time evolution of throughput and TCP sequence number.

의미한다. 반면, 링크 결합은 MPTCP보다 낮은 수율을 보인다. 이는 인터페이스간 전송 시간의 차이로 인해 패킷의 순서가 뒤바뀌어 수신되는 경우가 빈번히 일어나기 때문이다. 이 경우, TCP 수신자는 중복 TCP ACK을 전송하고, 이로 인해 TCP 송신자는 혼잡제어의 일환으로 혼잡 윈도우를 줄이게 된다. 이러한 행동은 그림 4에 잘 제시되어 있다. TCP 송신자는 빈번히 중복 TCP ACK을 수신하고, 이 때, 전송 수율의 급격한 감소가 관찰된다. 실제로 각 무선 인터페이스의 전송 시간은 다양한 이유(채널 품질, 로드 등)로 시간에 따라 계속해서 변화할 수 있다. 그림 3은 또한 UDP 트래픽의 수율도 보이고 있는데, 이 때에는 중복된 TCP ACK 문제가 발생하지 않으므로 링크 결합 기법도 각 인터페이스 단독 수율의 합에 근접하는 수율을 보이는 것을 알 수 있다.

링크 결합 기법의 성능 저하를 막기 위해, 불필요하게 발생한 중복 TCP ACK을 필터링하는 방법을 적용할 수 있다. 즉, AP(업링크 트래픽은 클라이언트)에서 이미 수신한 TCP 패킷에 대해서는 중복 ACK을 수신할 경우, 이를 서버로 전달하지 않고 삭제한다. 이는 무선 링크에서 TCP 성능을 개선하기 위해 제안되었던

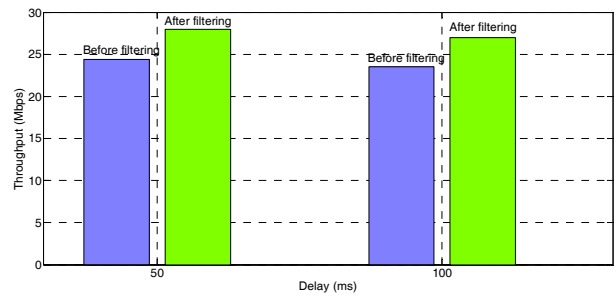


그림 5. 중복 TCP ACK 필터링을 통한 링크 결합 기법의 성능 개선 효과
Fig. 5. Performance enhancement by TCP duplicate ACK filtering.

Snoop 프로토콜^[13]의 동작과 유사하다. 본 논문에서는 이러한 방법의 성능 개선 가능성을 확인하기 위해, 위에서 언급한 간단한 형태의 필터링을 적용하였고, 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 기존의 링크 결합 기법 대비 약 15%의 수율 향상을 보인다.

(2) 네트워크 지연 효과

네트워크 지연 시간의 효과를 보기 위해 50 ms와 100 ms의 지연 시간에 대한 수율을 측정하였고, 그 결과는 그림 6과 같다. 흥미롭게도, 지연 시간이 50 ms에서 100 ms로 늘어날 때 링크 결합은 매우 적은 수율 감소를 보이는 반면에 MPTCP의 수율은 큰 폭(약 13 Mbps)으로 감소되었다. 이유는 MPTCP의 경우 TCP 송신자(실험에서는 서버)가 서브플로우간 트래픽을 분배하고, 따라서 지연시간이 길어질수록 각 링크의 상태 변화에 즉각적으로 반응하지 못해 최적이지 아닌 트래픽 분배를 할 가능성이 높아지기 때문이다.

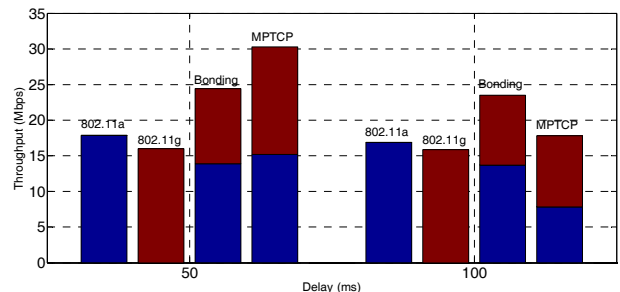


그림 6. 네트워크 지연 시간에 따른 수율 비교
Fig. 6. Comparison of throughput performance for different network latency.

(3) 링크 결합 기법의 스케줄링 가중치

이 실험은 링크 결합 기법 사용 시 인터페이스 간 트

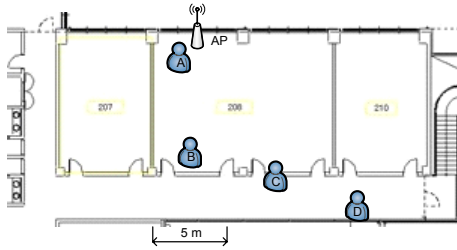


그림 7. 스케줄링 가중치 실험을 위한 실내 클라이언트 위치

Fig. 7. Locations of measurement for different scheduling weights.

래픽 분배에 있어서 다양한 비율의 스케줄링 가중치를 고려한다. 802.11a 인터페이스의 가중치를 m , 802.11g 인터페이스의 가중치를 n 이라고 하면, m 개의 패킷은 802.11a 인터페이스를 통해 전송되고 다음 n 개의 패킷은 802.11g 인터페이스를 통해 전송된다. 실험은 그림 7에 보이는 것과 같이 건물 안의 서로 다른 네 위치에서 여러 가중치 비율($m:n$)을 적용하여 수행되었다. 가중치는 예시적으로 2:1과 1:2가 고려되었고, 인터페이스 간 수율 비율과 유사한 4:3이 추가로 고려되었다.

실험 결과는 그림 8과 같다. 그림은 위치에 따라 최적의 가중치 비율이 달라지는 것을 보이고 있다. TCP 트래픽 사용 시, 위치 A에서는 1:1이 2:1보다 더 나은 반면, 위치 D에서는 2:1이 더 나은 결과를 보였다. 또, A와 B에서는 4:3이 가장 좋은 반면, C와 D에서는 2:1이 가장 좋게 나타났다.

앞서 언급한 것처럼 다른 무선 인터페이스를 이용한 전송 시간은 서로 상이할 수 있다. 따라서, 실험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 각 인터페이스별 스케줄링 가중치를 다르게(속도가 빠른 인터페이스를 더 높게) 설정할 필요가 있다. 이처럼 인터페이스의 상황에 맞추어

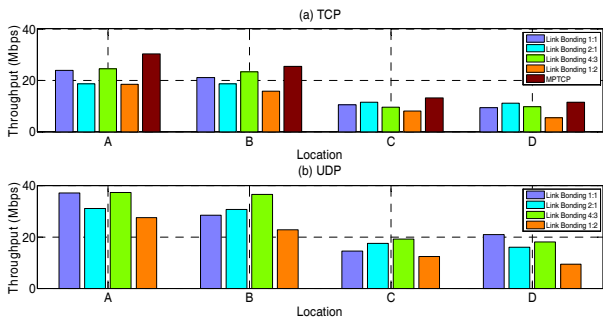


그림 8. 링크 결합에서 위치 및 스케줄링 가중치의 효과

Fig. 8. Effect of scheduling weight in different locations.

트래픽을 분배하는 것은 전체적인 수율 성능과 연관이 있다. 그런데, 인터페이스 간 링크 품질의 차이는 공간 뿐만 아니라 시간이 지남에 따라 변할 수 있기 때문에, 최적의 성능을 위해서는 스케줄링 가중치가 시공간에 따라 적응적으로 변경되어야 함을 알 수 있다. 이를 위해서는 각 인터페이스의 현재 상태(예: 전송 시간, 대역폭 등)가 실시간으로 측정될 수 있어야 한다.

(4) 인터페이스 장애

인터페이스 장애에 대한 안정성은 다중 인터페이스 시스템의 또 다른 장점이다. 인터페이스 장애가 일어났을 때 그리고 복구되었을 때, 각 결합 기법의 안정성 및 반응성을 평가하기 위해, 총 300초의 데이터 전송 실험 중 시작 후 100초 뒤에 802.11g 인터페이스를 시스템에서 분리하고, 그로부터 100초 후 이를 다시 연결하는 실험을 수행하였다. 그 결과는 그림 9와 같다. 원

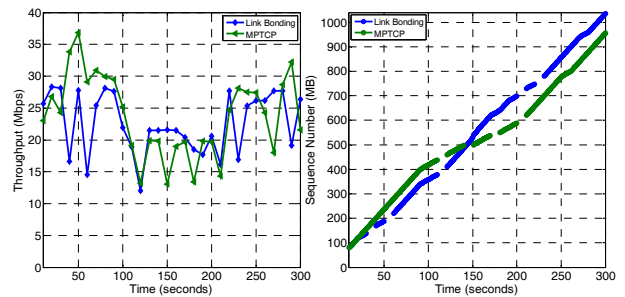


그림 9. 인터페이스 분리 및 재연결 시 시간에 따른 수율 및 TCP 순차 번호의 변화

Fig. 9. Time evolution of throughput and TCP sequence number when a radio interface is disconnected and reconnected

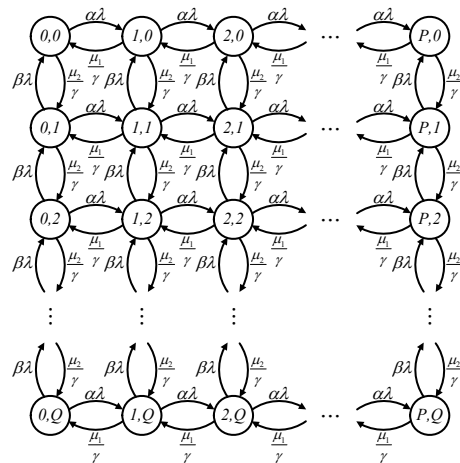


그림 10. 다중 인터페이스 대기열 모델

Fig. 10. Markov-chain model of multi-interface buffers.

쪽 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 100초에서 인터페이스가 분리되어 수율이 급격히 감소하지만, 다른 인터페이스를 통해 계속해서 데이터 전송이 가능하므로 수율이 일정 수준으로 유지되는 것을 볼 수 있다. 수율은 200초부터 회복되어 다시 두 인터페이스의 대역폭을 활용하게 된다.

인터페이스 장애 및 복구에 대한 두 기법의 반응성 차이는 그림 9에서 확인할 수 있다. 100초 전까지는 MPTCP의 TCP 순차 번호가 링크 결합 기법 대비 더 빠르게 증가하지만, 100~200초 사이에는 더 낮은 증가율을 보인다. 이는 단일 인터페이스를 사용하게 된 것뿐만 아니라, MPTCP의 경우 전송자가 인터페이스 장애를 감지하고 해당 서브플로우를 해지하기 까지 지연이 발생하기 때문이다.

IV. 소비전력 모델 및 결과

본 장에서는 다중 인터페이스를 사용 시 소비전력을 분석하기 위한 수학적 모델을 제시하고, 이를 기반으로 링크 결합 기법과 MPTCP의 소비전력을 분석, 그 결과를 시뮬레이션과 비교한다. III장과 달리, 본 장에서는 소비전력 산출의 용이성과 칩셋별 다양한 소비전력 프로파일의 적용성을 위해 수학적 모델을 사용하여 비교를 수행한다.

모델은 두 개의 인터페이스를 결합하는 경우를 대상으로 하고, 별도의 대기열을 가정한다. 새로 도착하는 패킷은 스케줄링 가중치에 의해 각 인터페이스로 분배된다. 인터넷 트래픽의 발생은 일정 수준의 정확도로 Poisson 분포로 모델링될 수 있으므로^[14-15], 패킷의 도착은 Poisson 분포를 따른다고 가정한다. 802.11 무선랜의 패킷 전송 시간은 기하(Geometric) 분포를 따르는 것으로 알려져 있다.^[16] 기하 분포는 확률변수의 표본공간 해상도가 높아질수록 지수(Exponential) 분포에 수렴한다. 즉, 기하 분포는 지수 분포로 근사화될 수 있으므로, 본 모델에서는 패킷 전송 시간은 지수 분포를 따른다고 가정한다. 각 인터페이스는 일정 시간(대기 모드 전환 시간) 이상 전송할 패킷이 없으면 대기 모드로 전환하고, 보낼 패킷이 생기는 즉시 활성화된다. 이 경우, 각 인터페이스는 대기열 상태에 따라 대기 모드 또는 활성화 모드가 된다. 결국, 소비 전력 모델의 수립을 위해서는 각 인터페이스의 대기열 상태 확률을 구하는

것이 필요하다. 따라서, 본 모델에서는 2차원 마코브체인을 이용하여 다중 인터페이스의 대기열을 그림 10과 같이 모델링한다. 각 상태는 (i, j) 로 표현되는데, i 와 j 는 각 인터페이스의 대기열에 있는 패킷 수를 지칭한다. λ 는 평균 패킷 도착율, μ_1 과 μ_2 는 각 인터페이스의 서비스율이고, 인터페이스의 로드는 $\rho_1 = \lambda/\mu_1$ 과 $\rho_2 = \lambda/\mu_2$ 으로 표현된다. α 와 β 는 각 인터페이스의 스케줄링 가중치이다($\alpha+\beta=1$).

두 인터페이스가 결합되었을 때의 서비스율을 μ/γ 라고 하자($\gamma \geq 1$). 즉, γ 가 1에 가까울수록 해당 결합 기법이 각 인터페이스의 대역폭을 충분히 활용한다고 할 수 있다. 그림 6으로부터, 50 ms의 네트워크 지연 시간에 대해 MPTCP는 $\gamma=1.12$, 링크 결합 기법은 $\gamma=1.39$ 를 갖는다. 100 ms의 지연 시간에서는 MPTCP는 $\gamma=1.84$ 로 높은 값을 갖는 반면, 링크 결합 기법은 동일한 γ 를 갖는다. P 와 Q 는 각 인터페이스의 최대 대기열 크기를 나타낸다.

시스템이 상태 (i, j) 에 있을 확률을 $p(i, j)$ 라 하고, 대기 모드 전환 시간 τ 동안 i 개의 패킷이 도착할 확률을 각 인터페이스 별로 $u(i)$ 와 $v(i)$ 라 하자. 각 확률은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} p(i, j) &= (\alpha\gamma\rho_1)^i (\beta\gamma\rho_2)^j p(0, 0), \\ p(0, 0) &= (1 - \alpha\gamma\rho_1)(1 - \beta\gamma\rho_2), \\ u(i) &= e^{-\alpha\lambda\tau} (\alpha\lambda\tau)^i / i!, \\ v(i) &= e^{-\beta\lambda\tau} (\beta\lambda\tau)^i / i!. \end{aligned} \quad (1)$$

인터페이스들의 상태 확률은 다음과 같이 구한다. 먼저, 둘 다 대기모드에 있을 경우는 시스템에 패킷이 없고, 또 대기 모드 전환 시간 동안 패킷 도착이 없는 경우이므로, 이 경우의 확률은 $p(0, 0)u(0)v(0)$ 가 된다. 첫째 인터페이스는 활성화 모드, 둘째 인터페이스는 대기 모드에 있을 경우는 시스템에 패킷이 없지만 대기 모드 전환 시간 안에 첫째 인터페이스에 패킷이 도착하거나, 둘째 인터페이스에만 패킷이 없고 대기 모드 전환 시간 안에 패킷 도착이 없는 경우이다. 이 때의 확률은

$$\sum_{i=1}^P p(i, 0)v(0) + p(0, 0)(1 - u(0))v(0) \quad (2)$$

이다. 첫째 인터페이스는 대기 모드, 둘째 인터페이스는 활성화 모드에 있을 확률도 마찬가지로 구할 수 있다.

마지막으로, 두 인터페이스 모두 활성화되어 있는 경우는 위의 경우들을 제외한 경우이다. 첫째 인터페이스의 대기 모드 및 활성화 모드 소비 전력을 각각 P_{sleep} 과 P_{active} 라 하고, 둘째 인터페이스의 소비 전력은 Q_{sleep} 과 Q_{active} 라 하자. 그러면, 평균 소비 전력 P_{avg} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{avg} = & (P_{sleep} + Q_{sleep})p(0,0)u(0)v(0) \\
 & + (P_{active} + Q_{sleep}) \\
 & \times \left(\sum_{i=1}^P p(i,0)v(0) + p(0,0)(1-u(0))v(0) \right) \\
 & + (P_{sleep} + Q_{active}) \\
 & \times \left(\sum_{j=1}^Q p(0,j)u(0) + p(0,0)u(0)(1-v(0)) \right) \\
 & + (P_{active} + Q_{active}) \\
 & \times (1 + p(0,0)u(0)v(0) - p(0,0)(u(0) + v(0)) \\
 & - \sum_{i=1}^P p(i,0)v(0) - \sum_{j=1}^Q p(0,j)u(0)).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

표 1에 제시된 Atheros 칩셋의 소비전력 프로파일^[1~12]을 기반으로 하여, λ 에 따른 평균 소비 전력 P_{avg} 의 변화를 그림 11에 도시하였다. 대기 모드 전환 시간은 200 ms를 가정하였다. 그림에서 선은 모델 결과, 심볼은 시뮬레이션 결과를 표시한다. 기본적으로 λ 가 커질수록 소비전력도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 각 인터페이스가 대기 모드에 들어갈 확률이 줄어들기 때문이다. 소비 전력 프로파일 2에서, 지연 시간이 50 ms 일 때, MPTCP의 소비 전력은 링크 결합 기법의 소비 전력과 비슷하지만, 지연 시간이 100 ms인 경우에는 MPTCP의 급격한 성능 저하로 인해 더 큰 소비 전력을 갖는 것을 볼 수 있다. 즉, 결합 성능이 좋을 경우 동일한 양의 트래픽을 신속히 전송하고 대기 모드로 전환할 수 있기 때문이다. 프로파일 1의 경우도 비슷한 양상을

표 1. Atheros 듀얼밴드 Wi-Fi 칩셋의 802.11a / 802.11g 소비 전력 (mW)
Table 1. Power consumption of Atheros dual-band Wi-Fi chipsets.

소비 전력 프로파일	활성화 모드	대기 모드
1. AR5213 with 1.8 v supply	126/126	10.8/10.8
2. AR9170 with 5 v supply	1290/1085	930/820

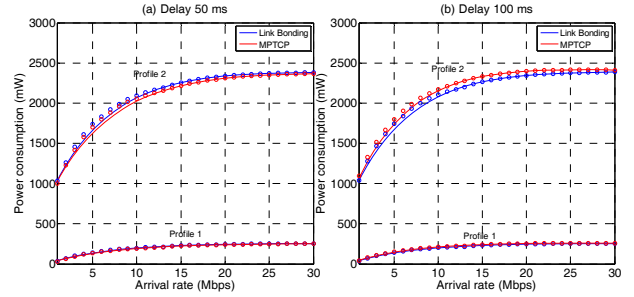


그림 11. 패킷 도착율에 따른 각 결합 기법의 평균 소비 전력
Fig. 11. Average power consumption of aggregation schemes for a varying packet arrival rate.

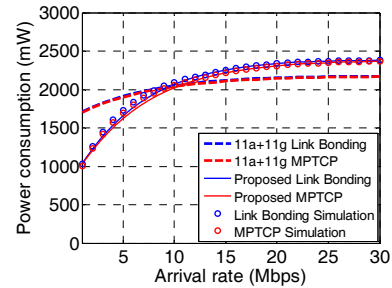


그림 12. 단일 인터페이스 모델과의 결과 비교
Fig. 12. Comparison of power consumption between models and simulation results.

보이지만, 표 1에서 볼 수 있는 것처럼 기본 소비 전력이 매우 낮아 그 차이가 크지 않다. 그림 12에서는 기존 모델처럼 각 인터페이스의 소비전력을 따로 계산하여 이를 합한 경우(점선)는 시뮬레이션과 괴리가 있음을 보이고 있다.

V. 결 론

본 논문은 다중 무선 인터페이스 시스템 구축을 위해 링크 결합 기법과 MPTCP의 성능을 실제 실험을 통해 비교, 분석하였다. 이를 통해 다중 인터페이스의 사용이 성능 상 이득이 있을 수 있음을 보였고, 각 기법에 따라 성능 차이가 있음을 보였다. 또, 소비 전력 분석을 위한 모델을 제시하고, 이를 통해 각 기법의 전력 효율성을 분석하였다.

REFERENCES

[1] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Link Aggregation, IEEE Computer

Society Std., 2008.

- [2] TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses, IETF RFC 6824 Std., 2013.
- [3] J. Li and J. Brassil, "On the performance of traffic equalizers on heterogeneous communication links," QShine'06.
- [4] A. Jayasuriya, et al., "Aggregation of Wi-Fi links: When does it work?," ICON'07, 2007, pp. 318 - 323.
- [5] C. Paasch, et al., "Exploring mobile/Wi-Fi handover with multipath TCP," CellNet'12, pp. 31 - 36.
- [6] C.-L. Tsao and R. Sivakumar, "On effectively exploiting multiple wireless interfaces in mobile hosts," CoNEXT'09, pp. 337 - 348.
- [7] S. Kakumanu and R. Sivakumar, "Glia: a practical solution for effective high datarate Wi-Fi-arrays," ACM MobiCom'09, pp. 229 - 240.
- [8] R. van der Pol, et al., "Multipathing with MPTCP and OpenFlow," SCC'12, pp. 1617 - 1624.
- [9] Network Emulation (netem). [Online]. Available: <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem>
- [10] MultiPath TCP. [Online]. Available: [git://github.com/multipath-tcp/mptcp.git](https://github.com/multipath-tcp/mptcp.git)
- [11] AR5213 Preliminary Datasheet, Atheros Communications, July 2004.
- [12] DNUA-81 UB82/AR9170+AR9104 Datasheet, Unex Technology Corporation, December 2008.
- [13] S. Vangala and M. Labrador, "The TCP SACK-aware snoop protocol for TCP over wireless networks," VTC'03, vol. 4, pp. 2624 - 2628.
- [14] J. Cao, W. S. Cleveland, et al., "Internet traffic tends toward poisson and independent as the load increases," Nonlinear Estimation and Classification, 2003, vol. 171, pp. 83 - 109.
- [15] T. Karagiannis, et al., "A nonstationary Poisson view of Internet traffic," IEEE INFOCOM'04, vol. 3, 2004, pp. 1558 - 1569.
- [16] A. Abdrabou and W. Zhuang, "Service time approximation in IEEE 802.11 single-hop ad hoc networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 1, pp. 305 - 313, 2008.

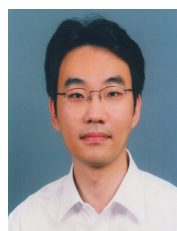
— 저 자 소 개 —



유 리 스(학생회원)
2010년 반등공과대학교 학사 졸업.
2010년~2012년 삼성전자 인도네시아 연구원.
2012년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 석사 과정.
<주관심분야 : 무선네트워크, 무선랜>



황 환 응(학생회원)
2014년 서울과학기술대학교 전기정보공학과 학사 졸업.
2014년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 석사 과정.
<주관심분야 : 무선네트워크, 무선랜>



윤 지 훈(정회원)
2000년 서울대학교 전기공학부 학사 졸업.
2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사 졸업.
2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 졸업.

2007년~2009년 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원.

2009년~2010년 미시건대학교 박사후연구원.

2010년~2012년 금오공과대학교 조교수.

2012년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수.

<주관심분야 : 무선랜, 이동통신망, 웹토셀>