

# 멀티 채널 무선 메쉬 네트워크에서 TCP 성능 평가

\*임영빈, \*이충호, \*최낙중, \*권태경, \*최양희  
\*서울대학교

\*{ybim, chlee, fomula}@mmlab.snu.ac.kr, \*{tkkwon, yhchoi}@snu.ac.kr

## TCP performance evaluation in multi-channel wireless mesh networks

\*Young-Bin Im, \*Choong-Ho Lee, \*Nak-Jung Choi, \*Tae-Kyoung Kwon, \*Yang-Hee Choi

\*School of Computer Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

### 요 약

무선 메쉬 네트워크는 저렴한 구축 비용, 쉬운 관리, 신뢰성 있는 커버리지 등의 수 많은 장점으로 인해 큰 주목을 받고 있으며, 이와 관련하여 다양한 연구가 진행되었다. 그러나 무선 메쉬 네트워크가 실제 환경에서 유용하게 사용되기 위해서는 중소규모의 다중 홉을 거쳐 트래픽이 전송되는 시나리오에서도 적절한 수준의 성능을 유지해야 한다. 그런데 무선 환경의 특성상 무선 메쉬 네트워크에서는 각 링크 간의 간섭과 전송 에러가 많이 발생하고, 이는 다중 홉 환경에서 심각한 성능 저하의 주된 요인으로 지적되어 왔다. 이러한 무선 메쉬 네트워크의 단점을 극복하고 적절한 성능을 유지하기 위한 다양한 연구들 중에서도, 최근에는 다중 인터페이스 기반의 다중 채널을 사용하여 각 링크 간의 간섭을 최소화하려는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 다중 인터페이스 및 채널 기법이 도입되었을 때 실제로 어느 정도의 네트워크 성능 향상을 보이는지 구축된 무선 메쉬 네트워크 테스트베드 상에서 실험을 통하여 살펴본다. 또한, **Reno, Westwood, Veno** 등 다양한 버전의 TCP 프로토콜 성능을 측정함으로써 다중 인터페이스 및 채널을 사용한 다중 홉 환경에서 각 프로토콜의 성능 특성이 어떠한지, 홉 수의 증가가 TCP 프로토콜 성능에 미치는 영향을 살펴본다.

### 1. 서론

무선 메쉬 네트워크는 자동적으로 애드혹 네트워크를 구성하고 메쉬 연결성을 유지하는 노드로 구성된 자기구성 자기설정 네트워크이다.[1] 무선 메쉬 네트워크는 메쉬 라우터와 메쉬 클라이언트로 구성되어 있으며 메쉬 라우터는 기존의 무선 라우터와 같은 게이트웨이/브리징 기능 외에 추가적으로 라우팅 기능을 포함한다. 무선 메쉬 네트워크는 저렴한 구축 비용, 쉬운 관리, 신뢰성 있는 커버리지 등의 수 많은 장점으로 인해 큰 주목을 받고 있으며, 이와 관련하여 다양한 연구가 진행되었다. 메쉬 네트워크는 위급 상황, 재난 상황, 전쟁 감시 시스템, 대중 교통 이동 비디오 등 다양한 시나리오에 적용될 수 있다[2].

그러나 무선 메쉬 네트워크가 실제 환경에서 유용하게 사용되기 위해서는 중소규모의 다중 홉을 거쳐 트래픽이 전송되는 시나리오에서도 적절한 수준의 성능을 유지해야 한다. 그런데 무선 환경의 특성상 무선 메쉬 네트워크에서는 각 링크 간의 간섭과 전송 에러가 많이 발생하고, 이는 다중 홉 환경에서 심각한 성능 저하의 주된 요인으로 지적되어 왔다.

이러한 무선 메쉬 네트워크의 단점을 극복하고 적절한 성능을 유지하기 위해 다양한 연구들이 진행 중이다. 지향성, 스마트 안테나 또는 재설정 가능한 라디오나 인지 라디오 등의 기술을 통해 성능 향상을 꾀하는 연구 또는 무선 전송과 충돌, 간섭 등의 현상을 수학적으로 모델링하여 간섭을 최소화하는 각종 기법을 찾는 연구 등이 그것이다. 이 중에서 최근에는 다중 인터페이스를 기반으로 하여 다중 채널을 사용하여 각 링크 간의 간섭을 최소화하

려는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 멀티 채널 메쉬 네트워크 환경에서는 적절한 채널 할당과 적절한 라우팅 경로 설정이 중요한 이슈로 부각된다.

본 논문에서는 이러한 다중 인터페이스 및 채널 기법이 도입되었을 때 실제로 어느 정도의 네트워크 성능 향상을 보이는지 **802.11a** 기반으로 구축된 링크간 간섭 현상이 없는 이상적 환경에 가까운 무선 메쉬 네트워크 테스트베드 상에서 실험을 통하여 살펴본다. 적절한 채널 할당 기법과 라우팅 기법이 적용 되었을 때 실질적으로 얻을 수 있는 성능의 한계 값이 어떠한지를 밝히고자 하는 것이다. 또한, **Reno, Westwood, Veno** 등 다양한 버전의 TCP 프로토콜 성능을 측정함으로써 다중 인터페이스 및 채널을 사용한 다중 홉 환경에서 각 TCP 프로토콜의 성능 특성이 어떠한지, 홉 수의 증가가 TCP 프로토콜 성능에 어떠한 영향을 미치는지 살펴본다.

전체적인 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 멀티 채널 메쉬 네트워크에 관한 연구와 각종 TCP 프로토콜의 특성에 대해 살펴보고, 3 장에서는 멀티 채널 환경에서 TCP 성능 평가를 위해 구축한 실험 환경과 실험 결과 및 그에 대한 분석을 제시하고, 4 장에서 결론을 맺는다.

### 2. 관련연구

#### 2.1 멀티 채널 메쉬 네트워크 연구

[3]에서는 기존 멀티홉 메쉬 네트워크에서 단일 채널을 사용함으로써 **802.11** 표준에 의해 제공되는 라디오 스펙트럼의 사용 가능한 대역폭을 충분히 이용하지 못함을

지적하고 Hyacinth 라는 멀티 채널 무선 메쉬 네트워크 아키텍처를 제시한다. 멀티 채널 무선 메쉬 네트워크의 중요한 이슈로서 채널 할당과 라우팅을 지적하고 로컬 트래픽 정보만을 사용해서 동적으로 채널을 할당하고 라우팅을 하는 분산 알고리즘을 제시한다. 또한 각 메쉬 노드에 2개의 인터페이스 카드만을 사용해서도 기존의 단일 채널 메쉬 네트워크보다 상당한 성능 향상이 있음을 보이고 실제 하드웨어 구현을 통해 검증한다.

[4]에서는 멀티 채널 무선 메쉬 네트워크에서 동일 채널 할당으로 인한 간섭 문제를 지적하고 이 문제를 해결하는 간섭 인지 채널 할당 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘은 메쉬 네트워크 상에서 간섭을 최소화하도록 채널을 할당한다. 노드 간의 간섭을 모델링하기 위해 충돌 그래프 모델과, 다중 라디오 충돌 그래프 모델을 확장하여 사용한다. 802.11 테스트베드 상에서의 구현과 시뮬레이션을 통해 정적 채널 할당 기법에 비해 40%의 성능 향상이 있음을 보인다.

[5]에서는 멀티 채널 메쉬 네트워크 상에서 효율적인 라우팅 알고리즘을 통해 게이트웨이에서의 혼잡 현상을 경감시킴으로써 쓰루풋을 향상시킬 수 있음을 지적하고 간섭에 의한 제약과 네트워크의 채널 수, 라디오 수를 고려하여 채널 할당과 라우팅 문제를 결합하여 수학적으로 모델링한다. 이를 통해 전체 네트워크 쓰루풋을 최적화하는 솔루션을 제공한다.

## 2.2 TCP variants

유선 네트워크와 달리 무선 네트워크에서는 비트 에러로 인한 패킷 손실이 상당하다. 가장 널리 사용되는 TCP 프로토콜인 Reno 의 경우 패킷 손실이 발생하였을 때 혼잡 윈도우(cwnd)를 급격하게 감소시켜 이러한 무선 환경에서는 성능 저하가 발생한다. 따라서 TCP Venof[6], Westwood[7] 등의 프로토콜에서는 패킷 손실이 발생하였을 때 윈도우 크기를 상황에 따라 적절히 조절해 TCP 의 성능을 향상시키고자 한다.

이 절에서는 실험에 사용한 이들 TCP 프로토콜이 어떤 특성이 있는지 살펴보고자 한다.

### 2.2.1 TCP Venof

이 프로토콜은 네트워크 혼잡도를 감지하여 이를 바탕으로 슬로우 스타트 임계치(slow start threshold: ssthresh)를 조정함으로써 TCP Reno 의 “multiplicative decrease” 알고리즘을 개선한다. 또한 네트워크 대역폭이 최대한 활용될 수 있도록 선형 증가 알고리즘을 개선한다. 네트워크 혼잡도를 측정하기 위해서는 TCP Vegas 프로토콜이 사용한 방법을 사용하는데, 측정된 지연시간(RTT)의 최소값과 최근의 지연시간 간의 차이를 이용한다. 윈도우 크기가 슬로우 스타트 임계치보다 큰 경우, 이 계산된 값을 사용해 혼잡도를 판단하고 혼잡도가 크면 윈도우를 천천히, 작으면 빨리 늘린다.

### 2.2.2 TCP Westwood

Westwood 는 Sender 에서 ACK 수신률을 측정함으로써 커넥션의 패킷 전송률을 계속적으로 예측한다. 이를 윈도우 크기와 혼잡 현상 발생시 슬로우 스타트 임계치를 계산하기 위해 사용한다. 윈도우 크기를 사용 가능한 대역폭에 맞도록 설정함으로써 무선 채널로 인한 주기적 패킷 손실에 보다 강하다.

## 3. 멀티채널 환경에서 다양한 버전의 TCP

## 성능 평가

### 3.1 실험 환경

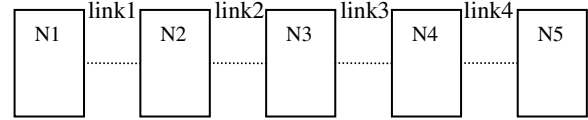


그림 1 - 테스트베드 구조

멀티 채널 환경에서 다양한 버전의 TCP 성능을 평가하기 위하여 그림 1 과 같이 테스트베드를 구축하였다. 기본적으로 각 노드는 일정 간격으로 배치되어 있고 두 개 또는 한 개의 802.11 인터페이스 카드가 장착되었다. 또한 모든 링크에서 802.11a 의 서로 다른 인접하지 않은 채널을 사용하여 동일 채널 사용 또는 인접 채널 사용으로 인한 간섭 현상을 발생하지 않도록 하였다. 라우팅 프로토콜로는 OLSR(Optimized Link State Routing Protocol) 을 동작시켰고 라우팅 경로는 수동 설정하여 1 홉~4 홉의 경로가 나타나도록 하였다. 또한 TCP 버퍼의 크기에 의해서 성능의 제약을 받지 않도록 충분히 큰 값(4MB)으로 설정하였다.

이렇게 설정된 테스트베드 상에서 TCP Reno, Venof, Westwood 의 3 가지 프로토콜을 사용하여 성능을 측정하였다. 양단간의 RTT 측정을 위해 ping 과 TCP 쓰루풋 측정을 위해 iperf[8]를 사용하였다. 이들을 사용하여 N1->N2, N1->N2->N3, N1->N2->N3->N4, N1->N2->N3->N4->N5 의 경로로 1 홉~4 홉 경로의 성능을 측정하였다.

### 3.2 실험 결과 및 분석

#### 3.2.1 6Mbps 실험



그림 2 - 6Mbps 에서의 TCP goodput

그림 2 는 11a 의 최저 rate 인 6Mbps 의 경우의 TCP 성능을 보인다. 수신 측의 트래픽 수신률 즉, goodput 값을 나타낸다. 홉 수와 TCP 프로토콜의 종류에 관계없이 성능이 거의 이론적인 최대값에 가까움을 알 수 있다. 각 링크는 iperf 를 사용해 UDP 패킷을 전송해 보았을 때 패킷 손실이 거의 없음을 확인했는데 이와 같이 손실이 거의 없는 링크 상태와 채널간의 간섭이 없는 상태에서는 멀티 홉에서도 이론적인 최대값에 가까운 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 기존의 단일 채널 무선 메쉬 네트워크 또는 채널 간섭이 있는 멀티 채널 메쉬 네트워크가 홉 수 증가에 따라 성능이 크게 떨어지는 현상과 대조를 보인다. 또한 손실이 거의 없기 때문에 패킷 손실 시 동작 방식이 달라지는 TCP 의 특성상 TCP 프로토콜간 성능 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

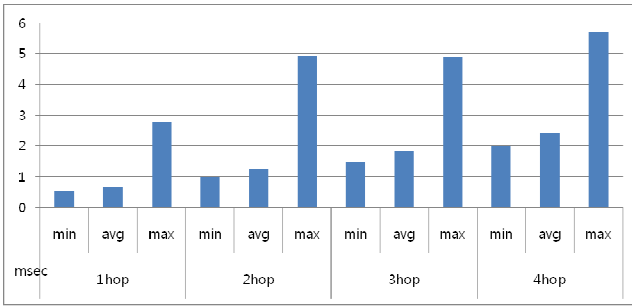


그림 3 - 6Mbps 에서의 패킷 딜레이

그림 3 은 6Mbps 의 경우의 패킷 딜레이를 보인다. 홉 수에 따라 값이 일정하게 증가함을 볼 수 있다. 각 홉을 거치면서 프로세싱 시간, 무선 전송 시간이 일정하게 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 최대 딜레이의 경우 무선의 변동이 큰 환경 특성상 순간적인 이상 딜레이가 발생하여 2 홉의 경우 경향성에서 어긋난 것으로 판단된다.

### 3.2.2 54Mbps 실험



그림 4 - 54Mbps 에서의 TCP goodput

그림 4 는 11a 의 최고 rate 인 54Mbps 의 경우의 TCP 성능을 보인다. 1, 2 홉의 경우 거의 최대 성능을 유지하지만 3, 4 홉의 경우 프로토콜에 따라 차이가 있지만 홉 수가 증가할수록 미세하게 성능이 감소함을 볼 수 있다. 6Mbps 의 경우에 비해 많은 양의 트래픽이 전송되므로 라우팅 오버헤드와 패킷 프로세싱에 따른 딜레이가 3,4 홉의 경우 영향을 미치기 시작한 것으로 판단된다. 그러나 이것이 전체 네트워크 성능에 미치는 영향은 크지 않기 때문에 감소 폭이 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 6Mbps 의 경우와 유사하게 프로토콜 간 성능 차이는 거의 없다.

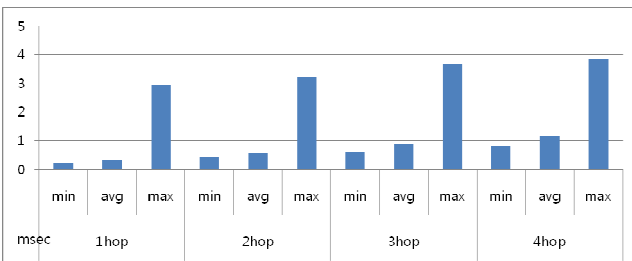


그림 5 - 54Mbps 에서의 패킷 딜레이

그림 5 는 54Mbps 의 경우의 패킷 딜레이를 보인다. 6Mbps 의 경우와 마찬가지로 홉 수에 따라 값이 일정하게 증가함을 볼 수 있다. 다만 6Mbps 의 경우보다 값이 작아졌는데 rate 가 높기 때문에 무선 전송으로 인해 발생하는 딜레이가 차지하는 부분이 작아졌기 때문인 것으로

판단된다.

## 4. 결론

본 고에서는 무선 메쉬 네트워크에 다중 인터페이스 및 채널 기법이 도입되었을 때 어느 정도의 네트워크 성능 향상을 보이는지 802.11a 기반으로 구축된 무선 메쉬 네트워크 테스트베드 상에서 실험을 통하여 살펴 보았다. 실험 결과 손실이 거의 없는 링크 상태와 채널간의 간섭이 없는 상태에서는 멀티 홉에서도 이론적 최대값에 가까운 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 무선 메쉬 네트워크를 지향성 안테나를 사용하고 적절한 채널 할당 기법을 적용해 구축함으로써 각 링크간의 간섭 현상이나 손실률을 최소화 하면 멀티 홉의 경우에서도 최대값에 가까운 쓰루풋과 낮은 딜레이를 얻을 수 있음을 보인 것이다. 또한, Reno, Westwood, Veno 등 다양한 버전의 TCP 프로토콜 성능을 측정 한 결과 각 프로토콜 간의 성능 차이가 거의 없으므로 이렇게 구축된 메쉬 네트워크에서는 Reno 와 같은 기존 프로토콜을 이용해도 무방할 것이다.

## 감사의 글

이 논문 또는 저서는 2008 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00267)

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-F-038-02, 미래 인터넷 핵심기술 연구]

이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터연구소에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] I. Akyildiz and X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 9, Sep 2005.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_mesh\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_mesh_network)
- [3] A. Raniwala and T.-C. Chiu. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. In Proc. IEEE INFOCOM, 2005.
- [4] K. Ramachandran, K. Almeroth, E. Belding-Royer, and M. Buddhikot. Interference Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks. In Dept. of Computer Science Technical Report, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, CA, July 2004.
- [5] ALICHERY, M., BHATIA, R., AND LI, L. E. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In ACM MobiCom (2005), pp. 58- 72.
- [6] C. P. Fu, and S. C. Liew. "TCP Veno: TCP Enhancement for Transmission over Wireless Access Networks," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 21, Issue 2, 2003.
- [7] S. Mascolo, C. Casetti, M. Gerla, S.S. Lee, and M. Sanadani, "TCP-Westwood: Congestion window control using bandwidth estimation," in Globecom 2001.
- [8] Iperf, "<http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf>"