

논문 2010-6-6

무선 메쉬 네트워크의 네트워크 코딩에서 패킷 전달자들이 TCP 성능에 미치는 영향

Effects of Forwarders on TCP Performance in Network Coding for Wireless Mesh Networks

임찬숙*, 안홍영*

Chan-Sook Lim, Hong-Young Ahn

요 약 실제 네트워크에서 압도적인 비중을 차지하는 TCP 트래픽의 성능은 네트워크 코딩 기법에서도 고려해야 할 중요한 요소이다. 그러나 무선 메쉬 네트워크에서의 네트워크 코딩 기법이 새로이 제안될 때 이를 위한 성능 평가는 대개의 경우 전송 계층에서의 프로토콜로서 TCP가 아닌 다른 프로토콜을 사용하여 이루어져 왔다. 이는 네트워크 코딩의 패킷 전송 형태에 대한 영향이 TCP 성능에 부정적인 요소로 작용하기 때문이다. 네트워크 코딩을 기반으로 하는 대부분의 무선 메쉬 네트워크 패킷 전송 방식에서는 패킷들을 받은 노드들 중 어느 노드가 네트워크 코딩을 하여 전달할 것인가를 정한다. 본 논문에서는 이 전달자 노드들이 TCP 성능에 미치는 영향에 대해 살펴본다.

Abstract Most traffic in the real internet is TCP traffic. Therefore newly proposed network coding schemes must consider their effects on TCP performance. However, in most studies on network coding, performance evaluation has been conducted using other types of traffic than TCP traffic because network coding has effects on the pattern of packet transmission, which again can impact TCP performance. In most packet transmission schemes based on network coding for wireless mesh networks, it is determined which node, among the ones that received a broadcasted packet, should encode and forward it. In this paper, we examine how the forwarder nodes impact TCP performance.

Key Words : Network coding, Wireless mesh network, TCP, Throughput, Forwarder

I. 서 론

네트워크 코딩은 네트워크상의 중간 노드들에서 패킷들에 대한 혼합 및 분리를 허용하는 방식으로 무선네트워크 환경에서 네트워크 용량과 신뢰성을 개선할 수 있다고 알려져 있다. 지금까지 제안된 네트워크 코딩 방식들은 대개 흐름 간의 네트워크 코딩 (inter-flow network coding)과 흐름 내에서의 네트워크 코딩

(intra-flow network coding), 둘 중 하나에 속한다.

네트워크 코딩의 개념을 설명할 때 거의 빠짐없이 언급되곤 하는 나비(Butterfly) 위상 예제^[4]는 여러 개의 출발지로부터의 멀티캐스트에 흐름 간 네트워크 코딩을 적용한 고전적인 예제이다. 그러나 일반적인 네트워크에 대해서는 흐름 간 네트워크 코딩에 대한 연구가 흐름 내 네트워크 코딩에 대한 연구에 비해 상대적으로 적은데 아마도 주 이유는 흐름 간 네트워크 코딩이 갖는 여러 가지 한계 때문일 것이다. 하나의 세션에 관한 멀티캐스트 시나리오에서 네트워크 코딩 이론은 최대 흐름(최소 절단) 한계를 가지고 용량 영역(capacity region)을 정의하

*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과

* 교신저자

접수일자 2010.10.31 수정일자 2010.11.30

게재확정일자 2010.12.15

는 유명한 정리에 잘 기초하고 있다. 또한 최적 용량은 스칼라(scalar) 선형 네트워크 코드만을 사용하여 얻을 수 있음이 증명되어 있다. 그러나 하나 이상의 세션과 수신자가 있도록 일반화 될 때 최적의 네트워크 코딩 전략을 찾는 문제는 아직도 미해결로 남아있다^{[5][6][7]}. 또한 선형 코딩은 다중 세션을 위한 최적의 코딩이 되기에 충분치 못함도 증명되었다^[8]. 이러한 여러 가지 이유들로 인해 이론적으로 최적인 흐름 간 네트워크 코딩 전략이 곧 나타날 가능성은 매우 적어 보인다는 의견이 지배적이다.

그러나 이러한 이론적인 한계에도 불구하고, 허용되는 코딩 연산이나 디코딩의 위치에 제한(예를 들면 코딩이 수행된 노드의 이웃노드들에서 바로 디코딩이 수행되어야 하는 제한)을 두는 코드를 사용함으로써 다중 세션 시나리오에서 네트워크 코딩의 다양한 활용을 보여주는 연구는 많이 있다. 이 중 Katti 등이 제안한 COPE^[1]은 아마도 흐름 간의 네트워크 코딩을 실제로 구현한 사례로 가장 유명한 것 중 하나일 것이다. COPE은 가장 간단한 코딩 방식인 XOR을 사용하여 여러 개의 유니캐스트 흐름에 속한 패킷들을 결합(인코딩)하여 전송하며 다음 홉에서 디코딩한다. COPE의 가장 큰 기여 중 하나는 네트워크 코딩을 실제 무선 메시 네트워크 테스트베드에서 구현함으로써 네트워크 코딩의 실제 효용성을 보여주었고 이후의 많은 연구들에 영감을 주었다는 점이다.

Zhang 등은 COPE의 한계점에 착안하여 COPE보다 성능이 좋은 네트워크 코딩 방식을 연고자 하였다.^[2] 즉, COPE에서는 정해진 노드들만 패킷을 전달할 수 있어 그 외의 노드들은 수신된 브로드캐스트 정보를 활용하지 못하는데 이 점을 개선하기 위해 각 노드들이 이웃 노드들의 라우팅 정보까지 활용하여 전진적으로(proactively) 코딩의 기회를 갖도록 한 것이다. 그러나 BEND라고 명명된 이 방식의 문제점은 중간노드들이 극히 밀집되어 있는 환경이 아닌 일반적인 환경에서의 성능은 명확하지 않다는 점이다. 본 논문에서는 BEND와 같이 더 많은 수의 전달자와 이웃 노드의 라우팅 정보를 활용하여 네트워크 코딩의 기회를 확대하고자 한 방식이 일반적인 환경에서도 성능 개선을 이룰 수 있는지를 재검증 하며, 더 중요하게는 BEND가 TCP 트래픽에 대해서는 얼마나 효과적인지에 대해서 검증한다.

TCP 트래픽이 인터넷 트래픽의 대부분을 차지함에도 불구하고 네트워크 코딩과 함께 TCP 트래픽을 사용했을

때에는 네트워크 코딩의 효과가 잘 드러나지 않을 수가 있다. 주요 이유로는 스스로 전송률을 조절하는 TCP 트래픽에서 네트워크 코딩의 기회가 줄어들 가능성이 크다는 점과 네트워크 코딩의 부작용으로 나타나는 패킷 순서 바뀔 현상이 TCP의 처리량을 감소시킨다는 점 등이 꼽힌다. 그러나 네트워크 코딩을 이용한 전송 방식 간에도 TCP 성능에 영향을 미치는 정도에는 차이가 있다. 본 연구에서 수행한 COPE와 BEND에 대한 성능평가 결과는, COPE보다도 더 많은 코딩의 기회를 부여하기 위해 더 많은 라우팅 정보 및 전달자 노드를 사용하는 방식을 취한 BEND가 오히려 TCP 트래픽에 대해서는 낮은 성능을 보이고 네트워크를 비효율적으로 사용함을 보여준다. 이러한 결과는 네트워크 코딩 기반의 새로운 전송 방식을 설계할 때 TCP 성능을 고려한다면 중복 패킷 발생 방식이 필수적임을 암시하고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 COPE과 BEND의 동작원리에 관해 간략히 설명하며, 3장에서는 모의실험 방법에 관해 기술한다. 4장에서는 모의실험 결과를 제시하고 이에 관해 논의하며, 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 배경지식

1. COPE

COPE이란 무선 메시 네트워크를 위한 네트워크 코딩 모듈을 IP계층과 MAC계층 사이에 구현한 구조를 의미한다. COPE은 가장 단순한 네트워크 코딩 형태인 XOR을 사용하여 여러 개의 유니캐스트 흐름에 속한 패킷들을 결합하며 노드들 간의 경로는 이미 정해져 있다고 가정한다. 또한 각 노드들이 무차별(promiscuous) 모드로 설정되어 자신에게 보내어지지 않은 패킷들도 엿들어 수신하게 되어 있다. COPE은 엿들은 패킷을 제한된 시간 동안 보관하다가 기회가 될 때마다 코딩을 수행한다. 어떻게 코딩을 하는 것이 효과적인가를 판단하기 위해 각 노드는 이웃 노드들이 어떤 패킷들을 수신했는가를 알려주는 수신 보고서(reception report)를 이용한다. 그러나 극심한 혼잡현상이 발생할 경우 이웃 노드로부터 수신 보고서를 받지 못할 수도 있으므로 라우팅 정보도 함께 이용한다. COPE에서는 여러 개의 유니캐스트 흐름으로부터 보내어지는 패킷들이 어떤 중간 홉에서 함께 인

코딩 되었다가 그 패킷들의 경로가 그 다음 홉에서 갈라질 경우 그 지점에서 패킷들은 디코드 되어야 한다. 따라서 코딩 알고리즘은 인코딩 된 패킷의 다음 홉 노드들이 해당 패킷들의 원본을 디코드 할 수 있도록 보장해주어야 한다. COPE은 리눅스가 탑재된 20대의 컴퓨터로 구성된 테스트베드에서 UDP 트래픽을 이용한 결과, 네트워크 코딩을 사용하지 않을 때에 비해 무려 3-4배까지의 처리량 향상을 보였다.

2. BEND

COPE을 제안한 연구자들은 네트워크 코딩 기법으로 인한 처리량 개선의 정도가 코딩 기회의 많고 적음에 달려 있다고 보았다. BEND는 COPE보다도 더 많은 코딩의 기회를 얻기 위해 주변 노드들의 라우팅 정보까지 활용한다. 예를 들어 그림 1이 보여주는 네트워크에서는 노드 x로부터 노드 y에 전송되는 패킷은 중간 노드 A를, 노드 u로부터 노드 v에 전송되는 패킷은 중간 노드 C를 거치도록 라우팅 테이블이 설정되어 있다. 그런데 노드 B₁, B₂, B₃가 노드 A 및 C와 매우 근접해있다고 하자. 네트워크 코딩을 사용하지 않는 전통적인 방식에서는 노드 B₁, B₂, B₃가 노드 A나 노드 C가 받았어야 할 패킷을 받았을 경우 즉시 폐기하며 COPE의 경우에는 라우팅에 의해 정해진 노드에서만 패킷의 혼합이 가능하다. 반면에 BEND의 경우에는 패킷을 엮들은 어느 노드도 필요하면 패킷을 코딩할 수 있다. 즉 그림 1의 예에서는 A와 C 뿐만 아니라 B₁, B₂, B₃들 중 어느 노드도 엮들은 패킷들을 이용하여 네트워크 코딩을 한 후 전송할 수 있다. 이러한 방식을 사용함으로써 BEND는 그림 1과 같은 환경에서 CBR 트래픽을 전송할 때 표준 IEEE 802.11이나 COPE에 비해 높은 처리량을 얻을 수 있음을 보고하고 있다.

BEND는 COPE에 비해 많은 전달자(forwarder)를 갖기 때문에 중복 패킷 발생의 가능성이 클 수 있으므로 중복을 막기 위한 장치가 필요하다. BEND의 MAC계층에서 보내는 ACK은 단순히 신뢰성 있는 전송을 위해서만이 아니라 중복을 최소화하기 위한 목적을 위해서도 사용된다.

[2]에서의 처리량 측정은 중간 노드들이 서로 극히 가까운 거리를 두고 배치되어 있는 3-tier 위상과 교차(cross) 위상에 대해서만 수행되었고 그리드 위상과 같은 다른 종류의 위상에 대해서는 처리량이 아닌 다른 성능 매트릭(예를 들어 중복 패킷 개수)만을 측정하였다. 따라

서 [2]의 성능 평가 결과는 다수의 중간 노드들이 밀집되어 있는 환경이 아닌 다양한 형태의 일반적인 네트워크 환경에서도 BEND가 높은 성능을 보일 수 있다는 확신을 주기에 미흡하다. 또한 BEND의 성능 평가 시 TCP 트래픽을 전혀 사용하지 않은 점과 CBR 트래픽에 있어서도 CBR 패킷 전송 간격을 0.01초로 고정한 모의실험 결과만을 제시한 점도 BEND 성능에 대한 재검증의 필요성을 제기한다.

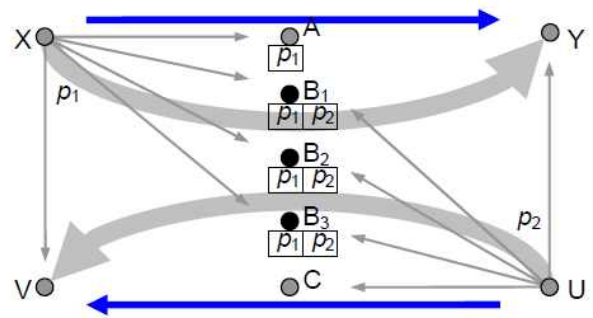


그림 1. BEND의 동작 원리를 설명하기 위한 네트워크 예제
Fig. 1. Example topology to explain how BEND works

III. 모의실험

모의실험은 [2]에서 사용한 ns-2 프로그램^[3]을 사용하였다. 또한 [2]에서의 성능평가 결과와 비교하기 위해 동일한 조건의 물리계층 환경을 사용하였다. 물리계층에서의 BER은 2×10^{-6} 으로 설정되었으며 최대 전송거리는 250m로 설정되었다. ns-2의 two-ray propagation 모델을 사용하였고 대역폭은 1Mbps로 설정되었다. ([1]의 COPE 실험에서는 IEEE 802.11a를 사용하였으나 [2]의 모의실험 결과와의 비교를 위해 [2]에서와 동일한 대역폭을 사용한다.) 라우팅 프로토콜로서는 DSDV를 사용하였다. UDP 트래픽에 대해서는 1000 byte 데이터그램을 사용하였다.

본 모의실험에서는 3-tier 위상과 5x5 그리드 위상을 사용하였다. 3-tier 위상은 양단에 4개씩의 노드가 400m의 거리를 두고 위치하며 그 중간에 중간노드들이 서로 매우 가까운 거리를 두고 배치된다. 3-tier 위상에 대한 실험에서는 총 4개의 흐름이 사용되며 양단에 있는 노드들 중에서 출발지와 목적지 노드들이 선택된다. 5x5 그리드 위상에서는 위아래, 좌우 노드 간의 간격이 150m가

되도록 노드들이 배치된다. 5x5 그리드 위상에 대한 실험에서는 총 12개의 흐름이 사용되며 출발지 및 목적지 노드들은 임의로 선택된다.

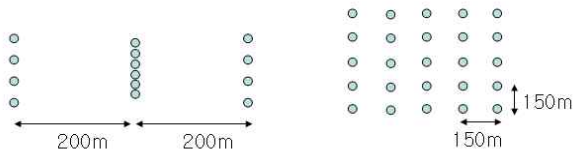


그림 2. 모의실험을 위한 3-tier 위상과 5x5 그리드 위상
Fig. 2. 3-tier topology and 5x5 grid topology for simulation

IV. 모의실험 결과 및 논의

우선 UDP 트래픽을 이용한 모의실험에서는 [2]에서 보여주는 결과에 비해 위상과 CBR 패킷의 전송 간격을 다양화 하였다. 이 모의실험에서의 처리량은 그림 3과 그림 4가 보여준다. 그림 3은 3-tier 위상에 대한 처리량으로 [2]에서 언급된 바와 같이 BEND가 COPE과 네트워크 코딩을 하지 않는 IEEE 802.11에 비해 대체로 탁월한 것을 알 수 있다. 그러나 CBR 패킷 전송 간격이 0.1초일 때에는 세 방식 간에 처리량의 차이가 거의 없는데 이는 전송률이 너무 낮아 코딩의 기회가 적기 때문이다. 그림 4는 5x5 그리드 위상에서 CBR 패킷 전송 간격을 0.001초로부터 0.2초까지 바뀌가며 측정된 처리량을 보여준다. 어느 CBR 전송률에 대해서도 BEND가 가장 높은 처리량을 보이나 3-tier 위상에 비하면 BEND와 COPE간의 격차가 줄어든 것을 볼 수 있다. 사실 3-tier 위상은 BEND의 장점이 가장 잘 부각되는 위상이다. 이에 반해 5x5 그리드 위상에서 많은 임의의 노드들 간에 데이터 흐름이 발생할 경우 BEND는 네트워크 자원을 효율적으로 이용하지 못한다. 예를 들어 CBR 패킷 전송 간격이 0.01초일 때, 3-tier 위상에서는 수신된 패킷들의 총 개수에 대한 코드화 된 패킷 개수의 비율이 BEND의 경우 32%로 COPE에 비해 10% 이상 높다. 그러나 5x5 그리드 위상의 실험에서는 BEND의 경우 18%이어서 COPE에 비해 오히려 낮게 나타난다. 노드들이 밀집되지 않고 일정한 간격을 두고 배치되는 5x5 그리드 위상에서 많은 수의 임의의 데이터 흐름이 발생할 때 효과적인 코딩의 기회는 많지 않음을 알 수 있다.

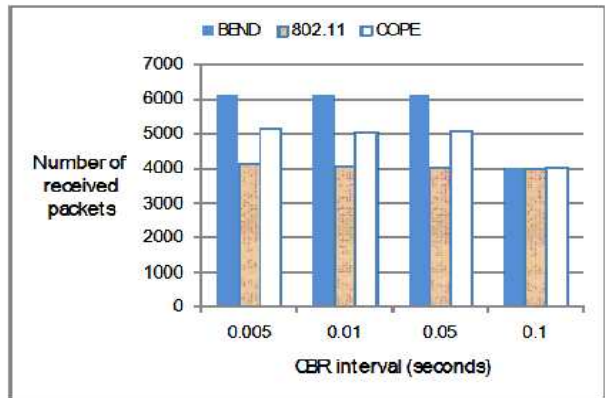


그림 3. 3-Tier 위상에서의 CBR 처리량
Fig. 3. CBR throughput for 3-tier topology

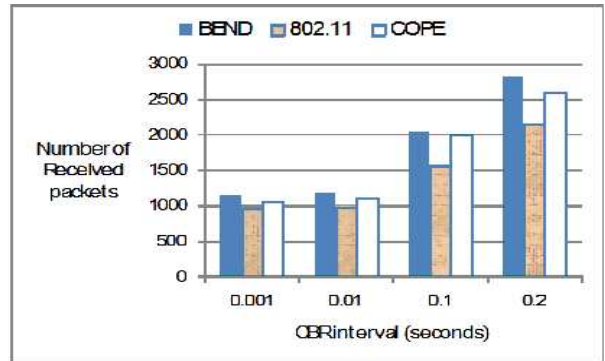


그림 4. 5x5 그리드 위상에서의 CBR 처리량
Fig. 4. CBR throughput for 5x5 grid topology

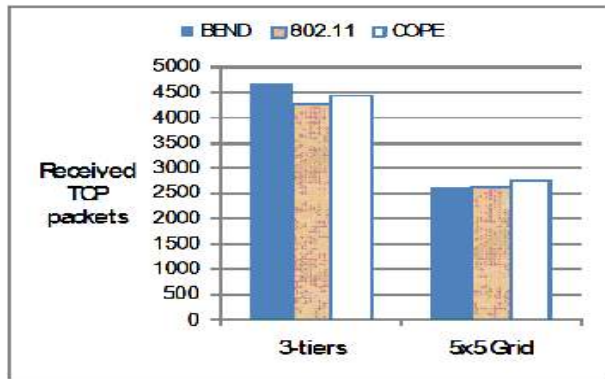


그림 5. 3-tier 위상과 5x5 그리드 위상에서의 TCP 처리량
Fig. 5. TCP goodput for 3-tier topology and 5x5 grid topology

그림 5는 3-tier 위상과 5x5 그리드 위상에 대해 TCP 트래픽을 이용한 모의실험에서 TCP가 보는 처리량을 보여준다. 3-tier 위상에 대해서는 근소한 차이로 BEND가 COPE을 능가한다. 그러나 5x5 그리드 위상에 대해서는 오히려 COPE의 TCP 처리량이 더 좋은 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 TCP-Tahoe의 결과만을 보여주고 있지만

TCP-Reno, TCP-Newreno, TCP-Sack 모두에 대해서도 정도의 차이가 있을 뿐 BEND에 비해 COPE이 더 나은 TCP 처리량을 보였다.

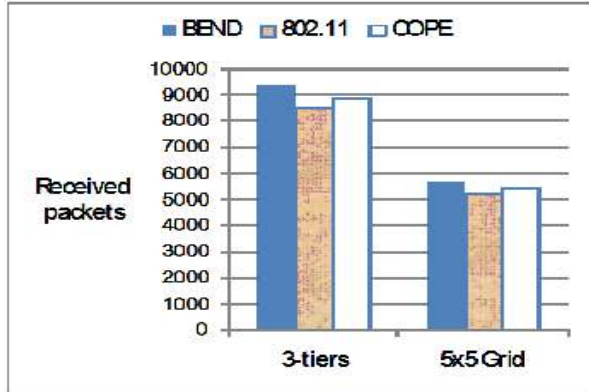


그림 6. 그림 5를 위한 모의실험에서 MAC 계층이 본 TCP 패킷의 총 개수
 Fig. 6. Number of received packets in the simulation whose results are shown in Fig. 5

그림 6의 결과는 그림 5의 결과를 얻은 바로 그 실험에서 MAC계층이 본 TCP 패킷의 총 개수를 보여준다. COPE에 비해 BEND가 낮은 TCP 처리량을 보였던 반면 MAC계층에서 본 TCP 패킷 개수는 COPE에 비해 BEND가 더 많다. 즉 BEND의 경우 5x5 그리드 위상에서 TCP로 데이터를 전송할 경우 다른 방식에 비해 상대적으로 네트워크에 훨씬 더 많은 패킷을 전송하면서도 좋은 TCP 처리량을 얻지 못했다는 것이다. 이러한 문제의 원인을 추적함에 있어 우리는 중복된 패킷들의 전송에 주목한다.

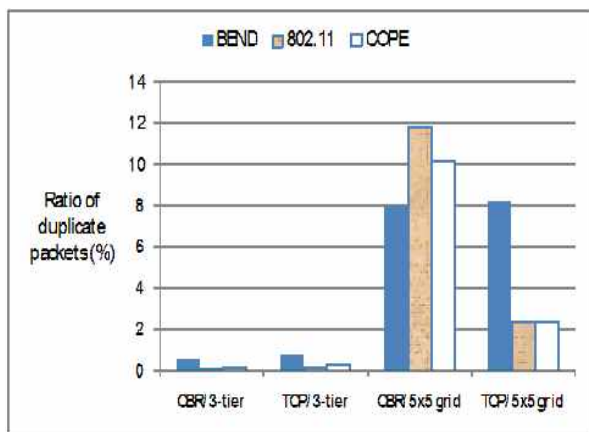


그림 7. 중복 수신 패킷의 비율
 Fig. 7. Ratio of duplicate packets

중복된 패킷의 전송은 표준 IEEE 802.11을 사용할 때에도 발생하는 현상이며 때로는 신뢰성을 위한 한 방법으로 도입되기도 한다. 그러나 전송 횟수를 줄임으로써 네트워크 용량을 증가시키고자 하는 네트워크 코딩 방식을 이용할 때 중복 패킷이 증가한다면 이는 반드시 해결되어야 할 문제가 된다. BEND 연구자들은 [2]에서 중복 패킷이 전송되는 비율을 측정했지만 이는 5x5 그리드 위상에서 UDP 트래픽을 사용하는 경우에 국한되었다.

우리는 3-tier 위상과 5x5 그리드 위상 모두에서 CBR과 TCP를 사용한 경우의 중복 비율을 측정하였다. CBR 패킷 전송 간격은 [2]에서와 같이 0.01초로 설정되었다. 그림 7이 보여주듯이 3-tier 위상에서는 모든 방식에 있어 중복 패킷의 비율이 높지 않다. BEND가 상대적으로 높기는 하지만 세 방식 모두 절대적인 중복 비율이 매우 낮으므로 이에 관해서는 논의를 생략한다. 5x5 그리드 위상에 대한 BEND의 결과는 흥미롭다. UDP트래픽을 이용하여 측정한 중복패킷의 비율은 다른 방식에 비해 상대적으로 낮은 반면 TCP트래픽을 이용하여 측정한 중복 패킷의 비율은 다른 방식에 비해 상대적으로 높다. 앞서 보았던 그림 4에서는 5x5 그리드 위상에서 12개의 흐름 각각에 대해 패킷 전송간격을 0.2초까지 증가시켰을 때 처리량이 증가한 사실을 참고할 때 CBR 패킷 전송 간격이 0.01초일 경우 네트워크에 너무 많은 패킷을 전송한 것임을 알 수 있다. 흥미로운 사실은, 혼잡제어를 통해 네트워크가 감당할 수 있는 한도 이상으로 패킷을 보내지 않으려고 하는 TCP 트래픽을 사용할 경우 BEND의 중복 비율이 다른 방식에 비해 훨씬 높다는 점이다. 이 현상에 대해서는 다음과 같이 추론해 볼 수 있다.

- 5x5 그리드 위상에서의 BEND의 경우 CBR 트래픽에 대해서는 다른 방식에 비해 중복 패킷이 많이 발생하지 않았으나 TCP 트래픽에 대해서는 특별히 중복 패킷의 비율이 높은 것을 볼 수 있다. 이는 CBR의 경우 데이터 흐름의 반대방향으로 가는 패킷이 없으나 TCP의 경우 TCP ACK로 인해 데이터 흐름의 반대 방향으로 가는 패킷들이 각 노드에게 네트워크 코딩을 할 수 있는 기회를 많이 주었을 것임을 알 수 있다. 문제는 같은 패킷을 받은 여러 개의 노드가 각각 판단한 네트워크 코딩의 기회를 활용하여 코드화된 패킷을 전송함으로써 중복된 패킷의 전송이 많이 발생하는 것이다.
- 5x5 그리드 위상에서의 BEND의 경우 MAC계층이

본 서로 다른 TCP 패킷의 개수는 세 가지 방식 중 BEND가 가장 많으나 TCP계층이 수신한 패킷의 개수는 가장 적다. 이는 TCP로 보아서는 중복된 일련번호의 패킷이 수신되었음을 의미하며, 다시 말해서 MAC계층에서의 중복 패킷이 아닌 송신측 TCP가 재전송한 패킷인데 불필요한 재전송이 많이 발생했음을 의미한다.

이상과 같은 결과는 보다 많은 주변 노드들의 라우팅 정보와 더 많은 전달자를 활용하여 네트워크 코딩의 기회를 확대하는 방식이 중복 패킷 발생 방지에 실패했을 때 TCP 성능에는 오히려 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

V. 결론

무선 메쉬 네트워크에서의 네트워크 코딩과 관련된 연구에서는 성능평가를 위해 TCP 트래픽을 사용하지 않는데, 네트워크 코딩이 패킷 전송의 형태에 미치는 영향이 TCP성능에 부정적인 요소로 작용하기 때문이다. 본 논문에서 살펴본 BEND의 경우, 코딩의 기회를 증가시키기 위해 전달자 노드의 수를 증가시킴으로써 처리량을 증가시킬 수 있다고 보고하고 있지만 본 연구에서의 성능평가 결과는 그러한 방식이 TCP 트래픽에 대해서는 성능에 부정적인 영향을 미침을 보여준다. 이러한 결과는 네트워크 코딩을 기반으로 한 새로운 패킷 전송방식을 설계함에 있어 전달자 노드들을 어떻게 결정해야 하는지에 대한 방향을 제시해준다.

참 고 문 헌

[1] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft, "XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding", ACM SIGCOMM, 2006.

[2] Jian Zhang, Yuanzhu Peter Chen, Ivan Marsic, "MAC-layer proactive mixing for network

coding in multi-hop wireless networks", Elsevier Computer Networks 54, pp.196-207, 2010.

[3] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> "The network simulator ns-2."

[4] C. Fragouli, J. L. Boudec, and J. Widmer, "Network Coding: An Instant Primer", ACM Computer Communication Review, 2006.

[5] R. W. Yeung, S.-Y. R. Li, N. Cai, and Z. Zhang, "Network coding theory Part II: Multiple source", Foundation and Trends in Communications and Information Theory, vol. 2, no. 5, pp. 330-381, 2005.

[6] T. Chan and A. Grant, "Dualities between entropy functions and network codes", submitted to IEEE Trans. Information Theory 2007.

[7] X. Yan, R. Yeung, and Z. Zhang, "The capacity region for multi-source multi-sink network coding", Proc. of IEEE ISIT, 2007.

[8] R. Dougherty, C. Freiling, and K. Zeger, "Insufficiency of linear coding in network information flow", IEEE Trans. Information Theory, vol. 51, no. 8, pp. 2745-2759, 2005.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (No. 2010-0015480).

저자 소개

임 찬 숙(정회원)



- 서울대학교 계산통계학과 학사, New York University 석사, University of Southern California 박사
 - 홍익대학교 과학기술대학 컴퓨터정보통신공학과 조교수
- <주관심분야 : 라우팅, TCP, 네트워크 코딩, 인터넷 측정>

안 홍 영(정회원)



- 서울대학교 전자공학과 학사, University of Florida 석사, University of Florida, 박사
 - 국방과학 연구소 선임연구원 홍익대학교 과학기술대학 컴퓨터정보통신공학과 교수
- <주관심분야 : Wireless Networks, Ad-hoc Networks, Sensor Networks, Wireless Internet, VoIP, 4세대 이동통신, MIMO, OFDM>