

논문 2011-1-2

중복 승인을 사용하지 않는 TCP의 코드화된 무선 메쉬 망에서의 효과

Effectiveness of DUPACK-independent TCP in Coded Wireless Mesh Networks

임찬숙*

Chan-Sook Lim

요약 네트워크 코딩이 사용되는 무선 메쉬 망에서의 TCP 처리량 저하 문제가 잘 알려져 있는 것에 비하면 효과적인 해결방안은 아직 많이 제안되지 않은 편이다. 지금까지 제안된 대부분의 방안들은 네트워크 코딩의 부작용으로 나타나는 패킷 바뀔 현상을 완화하기 위해 하위 계층에서 패킷 순서를 맞추도록 하거나 코딩 기회의 희소성 문제를 해결하기 위해 네트워크 내부에서의 패킷 전송률을 조정하려고 한다. 본 논문에서는 기존의 표준 TCP들에 대한 모의 실험을 통해, TCP 승인 패킷의 손실과 복제 또한 TCP의 처리량에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 코드화된 무선 메쉬 망에서의 TCP 처리량 문제의 해소를 위해서는 중복 승인에 의존하지 않는 TCP가 더 적합함을 보여준다.

Abstract While the TCP throughput degradation problem in coded wireless mesh networks is well-known, few effective solutions have been proposed. Most schemes proposed attempts to mask packet reordering by ordering packets at a lower layer or to adjust a packet transmission rate to solve the scarcity problem of coding opportunities. Through the throughput comparison of traditional standard TCP variants, we show that losses and duplication of TCP acknowledgements in coded wireless mesh networks can impact throughput. In addition, we show that a TCP variant that does not rely on duplicate acknowledgements is more suitable for coded wireless mesh networks.

Key Words : TCP, Network coding, Wireless mesh networks, Packet reordering, Duplicate acknowledgements

1. 서 론

TCP는 현재 사용되는 전송계층 프로토콜 중에 가장 많이 사용되는 프로토콜이다. 현재 널리 사용되고 있는 TCP들은 유선망 환경에 맞춰 설계되었고, 무선망의 특성에 잘 맞지 않는 면들을 갖고 있다. 예를 들어 유선망에서는 채널 오류가 적어 TCP가 패킷 손실을 곧 네트워크 혼잡의 신호로 해석해도 잘 동작해 온 반면 무선망에서는 채널 상의 신호 감소, 간섭, 노이즈 등의 여러 가지

요인으로 인해 무작위(random) 패킷 오류가 많이 발생하므로 이로 인한 패킷 손실을 네트워크 혼잡으로 해석하면 TCP는 불필요하게 전송률을 줄이게 되고 네트워크 용량을 제대로 활용할 수 없게 된다. 또한 잦은 경로 변경, 데이터 링크 계층에서의 재전송은 패킷들이 순서가 뒤바뀌어 목적지에 도착하게 함으로써 잦은 중복 승인을 초래하고 이로 인해 전송률은 감소하게 된다. 무선망의 용량을 증가시킬 수 있는 방안으로 제안되어 온 네트워크 코딩은 패킷 오류로 인한 문제를 많이 완화시키지만 패킷 순서 바뀔 현상의 문제는 여전히 남아있다. 이러한 이유로 코드화된 무선 메쉬 망에서의 TCP 문제는 많은

*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과
접수일자: 2010.12.22 수정일자: 2011.2.1
게재확정일자: 2011.2.11

연구자들의 관심을 끌고 있다.

본 논문에서는 가장 널리 사용되어온 표준 TCP 프로토콜들의 성능을 코드화된 무선 메시 망에서 시험해보고 TCP 성능 감소의 주요 요인들을 살펴본다. 특히 다른 대부분의 연구에서 간과되었던 승인(ACK) 패킷 손실의 영향 및 네트워크 내에서 중복되어 생성되는 잘못된 중복 ACK 패킷의 영향을 살펴보고 중복 ACK을 사용하지 않는 TCP의 코드화된 무선 메시 망에서의 효과를 모의실험을 통해 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 관련 연구에 관하여, 3장에서는 모의실험 방법에 대해 기술한다. 4장에서는 모의실험 결과를 통해 파악된 요인들에 대해 논의하고, 5장에서는 중복 ACK에 의존하지 않는 TCP의 성능에 대해 논의하며 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

무선망은 채널의 특성(예를 들어 방송적인 전송, 채널의 높은 오류율, 시간에 따라 변하는 채널 상태)때문에 유선망에 비해 네트워크 코딩의 효과를 얻기에 더욱 적합하다. 코드화된 무선망이 실제로 성능 개선에 도움을 준다는 사실을 실제 시스템 구현을 통해 보여준 연구들이 있는데, 그 중에서도 COPE^[1], MORE^[2] 등은 이후의 많은 연구에 영감을 준 잘 알려진 시스템들이다. 그러나 이러한 연구에서의 놀라운 성능 개선은 UDP 데이터 전송을 통해 입증된 것이며 TCP를 이용한 실험에서는 상대적으로 미미한 개선에 그쳐 TCP 처리량 관련 문제는 중요한 문제로 지적되었다.

문제의 중요성에 비하면 그다지 많은 편은 아니지만, 네트워크 코딩이 사용되는 무선망에서 TCP 성능을 개선하기 위한 몇 가지 연구 결과들이 있다^[4-10]. 예를 들어 참고문헌 [4]에서는 코딩의 기회를 증가시키기 위해 인위적으로 중간 노드(라우터)에서 패킷 전송을 일정 시간동안 지연시키는 방식을 제안하였다. 그러나 이 방식은 RTT를 증가시킴으로써 TCP의 처리량을 감소시키는 부정적인 효과도 일으킨다. 따라서 [4]의 저자들은 코딩의 기회로 인한 처리량 증가와 RTT의 증가로 인한 처리량 감소 간의 상충관계(trade-off)를 분석하였다.

참고문헌 [5]에서는 블록 단위로 코딩을 하는 방식이

온라인 응용 프로그램에 잘 맞지 않으며 슬라이딩 윈도우 방식을 사용하는 TCP와도 잘 맞지 않는다는 점에 주목하여 네트워크 코딩 계층에서도 블록 단위의 코딩이 아닌 슬라이딩 윈도우 방식을 사용하여 데이터를 전송하는 방식을 제안하였다. 이를 위해 TCP계층과 IP계층 사이에 있는 네트워크 코딩 계층은 새로운 개념의 ARQ 방식을 사용하여 TCP 대신 ACK을 전송한다. 즉 수신측이 도착한 패킷들을 아직 디코드 할 수 없다 하더라도 디코딩 가능 여부가 이후에 도착할 패킷들에만 달려있다면 새로운 정보를 받았다는 것을 알려주기 위해 자유도(degree of freedom)에 대한 ACK을 보내는 것이다. 그러나 이 방식은 같은 데이터 흐름 안에서의 네트워크 코딩만을 고려하였고 모의실험을 위한 네트워크 위상도 탠덤(tandem) 위상이어서 패킷의 순서가 바뀌어 수신될 가능성이 적은 환경이었다. 따라서 데이터 흐름 간의 네트워크 코딩이 함께 사용되거나 패킷 손실과 순서 바뀔이 심하게 발생하는 환경에서 효과가 검증되지 않았다. 그럼에도 불구하고 네트워크 코딩이 슬라이딩 윈도우 방식에 잘 맞도록 시도하였고 새로운 개념의 ARQ 방식을 도입한 점에서 이 연구의 기여하는 바가 크다고 하겠다.

이러한 모든 노력의 공통점은 TCP 자체를 개선하려는 접근 방법보다는 TCP 성능에 미치는 제반 요소들을 네트워크 내에서 제거하거나 완화시킴으로써 TCP계층을 성능 저하 요인들의 영향으로부터 최대한 보호하려는 접근 방법을 취하고 있다는 점이다. 이러한 연구들의 성능평가에는 기존의 표준 TCP들 중 하나가 사용되는데 제안된 방식과 함께 사용되었을 때 가장 높은 성능을 보이는 TCP를 선택하여 사용하고 있을 뿐 네트워크 코딩을 이용한 전송방식과 TCP 간의 상호 작용에 대한 상세한 분석은 거의 이루어지지 않았다.

사실 네트워크 코딩 방식을 쓰지 않는 무선망에 있어서도 TCP 성능 문제는 중요한 문제였음을 주목할 필요가 있다. 코드화된 무선 메시 망에서는 TCP 성능에 미치는 무선망의 특징뿐 아니라 네트워크 코딩이 TCP 성능에 영향을 미치는 요소까지 모두 고려해야 한다.

III. TCP들 간의 성능 비교를 위한 평가 방법

우리는 우선 기존의 표준 TCP들을 네트워크 코딩 기

반의 무선 메쉬 망에서 사용할 때의 문제를 파악하기 위해 ns-2 모의실험을 수행하였다. MAC계층으로는 표준 802.11 전송 방식과 네트워크 코딩 기반의 전송 방식인 COPE^[1]과 BEND^[3]를 사용하였다. COPE은 데이터 흐름 간 네트워크 코딩 방식을 실제로 구현한 구조로서 중 가장 잘 알려져 있는 방식들 중 하나이며 BEND는 COPE과 유사하게 동작하도록 되어 있으나 COPE보다도 더 많은 코딩의 기회를 얻을 수 있도록 개조된 방식이다. BEND는 COPE보다도 더 많은 코딩의 기회를 얻기 위해 주변 노드들의 라우팅 정보까지 활용하며, 받은 패킷 헤더에 기록된 두 번째 다음 홉 정보를 참고하여 코딩할 것인지 판단한다. 또한 COPE의 경우 라우팅에 의해 정해진 노드에서만 패킷의 혼합이 가능한 반면 BEND의 경우 패킷을 엮을 때는 어느 노드도 패킷을 코딩하고 전달할 수 있다. 이러한 특징을 갖는 BEND는 COPE에 비해 많은 전달자(forwarder)를 갖기 때문에 중복 패킷 발생의 가능성 또한 커지는데 중복을 막기 위한 장치로서 MAC 계층에서의 ACK에 의존한다.

모의실험을 위한 TCP로서는 기존의 표준 TCP들인 TCP-Tahoe, TCP-Reno, TCP-Newreno, TCP-Sack, TCP-Vegas를 사용하였다. 이 모의실험의 목적이 무선 메쉬 망에서의 네트워크 코딩방식과 TCP 성능과의 연관 관계를 살펴보기 위한 것이므로 가능한 모든 조건에서 모의실험을 수행하지는 않았으며 그림 1에서 보여주는 바와 같은 그리드 형태의 네트워크 위상에서 임의로 선택된 12개의 TCP 흐름을 이용하여 데이터를 전송하였다.

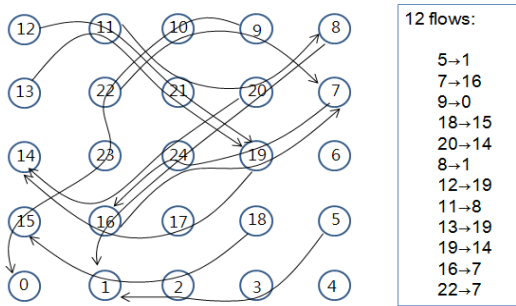


그림 1. 시뮬레이션 위상과 12개의 TCP 데이터 흐름
Fig. 1. Simulated network topology and 12 TCP flows

주요 모의실험 조건을 살펴보면, 대역폭은 1Mbps이며 MAC계층에서 RTS/CTS는 사용되지 않고, 라우팅 프로토콜로서는 DSDV가 사용되며 TCP에서의 초기 slow-

start 임계값은 20개의 패킷으로 설정된다. ftp를 이용한 TCP 데이터 전송은 320초 동안 이루어지나 마지막 100초 동안의 결과에 대해서만 평균값을 구한다. 제시된 수치는 100번 수행한 결과에 대한 평균값이다.

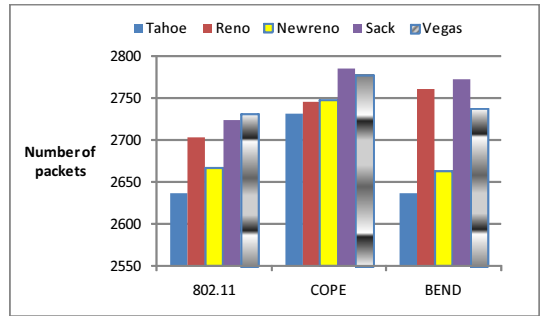


그림 2. MAC계층에서의 세 가지 전송방식에 대한 TCP 처리량
Fig. 2. TCP goodput for three MAC layer transmission schemes

IV. 실험 결과를 통해 본 TCP ACK의 영향

그림 2는 모의실험 결과를 보여준다. 우선 기본 802.11과 COPE의 결과를 비교해볼 때 모든 TCP에 대해 COPE이 더 나은 처리량을 보인다. 그러나 [1]에서 이미 보고된 바와 같이 TCP트래픽에 대해서는 개선된 정도가 미미하게 나타난다. 저자들은 네트워크 코딩으로 인한 패킷 순서 바뀔 현상이 TCP에 패킷이 손실되었다는 잘못된 신호를 주어 처리량을 떨어뜨리게 되며 다중 홉 무선 망에서는 Hidden Terminal 문제가 TCP 처리량 저하 문제를 더욱 악화시키게 됨을 지적하였다. 다시 그림 2로 돌아가 COPE과 BEND를 비교해보면 BEND의 경우 TCP-Reno를 제외한 모든 TCP들의 처리량이 COPE에 비해 낮은 것을 알 수 있으며 특히 TCP-Tahoe와 TCP-Newreno의 경우 확인한 처리량 저하를 보이고 있다. [3]에서 저자들은 UDP트래픽을 사용했을 때에는 COPE보다 좋은 성능을 얻었음을 보고한 바 있다.

BEND에 있어서의 TCP 처리량 저하의 요인을 추정하기 위해 우선 수신된 ACK 총 개수와 중복 ACK의 총 개수를 살펴보면, 그림 3에서는 COPE의 경우 802.11에 비해 모든 TCP들에 대하여 총 ACK의 수가 감소한 반면 BEND의 경우 증가한 것을 볼 수 있다. 중복 ACK 개수를 살펴보면 그림 4가 보여주는 바와 같이 네트워크 코딩

을 사용하는 방식들은 모두 802.11방식에 비해 중복 ACK 개수가 많음을 볼 수 있는데, BEND의 경우 특히 심하다. 단, TCP-Sack의 경우에는 다른 TCP들에 비해 중복 ACK이 많지 않는 것이 특징이다.

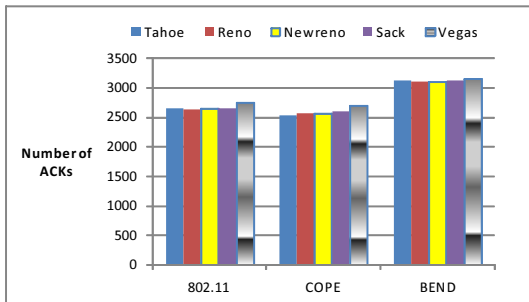


그림 3. 수신된 승인들의 총 개수
Fig. 3. Total number of acknowledgements

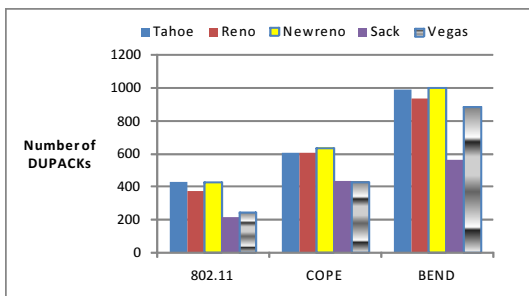


그림 4. 중복 승인 개수의 비교
Fig. 4. Number of duplicate acknowledgements

앞서 보았던 그림 2의 TCP 처리량 결과와 함께 살펴 볼 때 TCP-Tahoe는 많은 중복 ACK을 수신 하면서 예상대로 낮은 TCP 처리량을 보이고 있다. TCP-Sack의 경우 다른 표준 TCP들에 비해 중복 ACK의 개수도 적고 좋은 처리량을 보이고 있다. 이는 TCP-Tahoe, TCP-Reno, TCP-Newreno가 단순히 누적(cumulative) ACK의 정보에만 의존하는 반면 TCP-Sack은 SACK 블록 정보를 이용하여 어느 패킷이 수신되었는지에 대한 더 상세한 정보를 얻을 수 있기 때문이다. 또한 TCP-Vegas는 혼잡제어를 위해 중복 ACK의 개수보다는 RTT의 변화에 의존하지만 BEND에서는 성능이 저하됨을 볼 수 있다.

BEND의 경우 왜 모든 TCP에 대해서 중복 ACK가 확연하게 증가했는가에 대한 답은 두 가지로 추정할 수 있다. 첫째, COPE과 달리 BEND에서는 패킷들이 단일 경

로를 통해 전송되지 않는다. 따라서 다수의 패킷들이 순서가 바뀌어 수신측에 도착하는 현상이 발생하게 된다. 둘째, BEND의 경우 네트워크 코딩 및 전달에 COPE보다 더 많은 노드들이 참여하게 되는데 이로 인해 중복 패킷이 많이 발생하게 된다. 이렇게 중복되어 복제되는 패킷 중에는 TCP ACK 패킷도 포함되기 마련이다. 수신측 TCP가 새로운 패킷을 받을 때 보내는 중복 ACK이 아닌, 네트워크 내에서 복제되는 "잘못된 중복 ACK (false duplicate ACK)"으로 인해 발생하는 문제는 RFC 3042에서도 지적되었듯이 TCP의 중요한 약점 중 하나이다. 따라서 이 문제는 네트워크 코딩이나 기회적 라우팅 등의, 적절한 제어가 없으면 중복 패킷이 많이 발생할 수 있는 방식들이 설계될 때 고려되어야 한다.

이 논문을 위한 모의실험에서도 "잘못된 중복 ACK"이 발생하였다. 이 모의실험에서 사용된 세 가지의 MAC 계층 전송방식 중 패킷이 복제될 확률이 가장 높은 것은 BEND이다. 그림 5는 노드 9로부터 노드 12로의 TCP-Newreno 흐름에서 중복 ACK이 전송 중에 복제되어 불필요하게 전송률이 감소하는 예를 보여 준다. 예를 들어 310.74초에 송신 TCP는 일련번호 135번에 대한 ACK을 단 한 번 보내지만 수신 TCP는 이 번호에 대한 ACK을 311.76초부터 313.29초에 걸쳐 4번 수신한다. 이로 인해 혼잡윈도우가 줄어든 것을 그림 5에서 확인할 수 있다.

그림 2가 보여주는 예상 밖의 결과는 TCP-Newreno가 TCP-Reno에 비해 대체로 낮은 성능을 보이고 특히 BEND에 대해서는 현저히 성능이 저하되는 현상을 보인 점이다. TCP-Newreno는 기존에 TCP-Reno가 겪었던 한 윈도우 내의 다중 패킷 손실로 인한 성능 저하문제를 해결한 버전이다. 그럼에도 불구하고 패킷 순서 바뀌 현상이나 복제된 중복 ACK이 자주 수신될 경우에는 오히려 TCP-Reno에 비해 취약함을 알 수 있다. 이러한 추정을 뒷받침하기 위해 ns-2를 이용하여 Y자형 위상에서 4개의 TCP 데이터 흐름을 통해 약 30초 간 데이터를 전송하는 실험을 하였다. 각 TCP 흐름에서는 100개의 TCP 패킷이 전송될 때마다 일련번호가 '00', '02', '07'로 끝나는 패킷에 대해 인위적으로 세 개의 (복제된) 중복 ACK이 전송되도록 하였다. 이 간단한 모의실험에서도 TCP-NewReno는 TCP-Reno에 비해 14% 이상의 낮은 처리량을 보였다. 그림 6은 두 TCP 간에 혼잡 윈도우의 변화를 비교하여 보여준다. TCP-Reno와는 달리

TCP-Newreno는 자주 Timeout을 겪는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 현상이 지속적으로 심하게 발생할 때에는 TCP-Newreno의 성능이 더욱 악화될 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

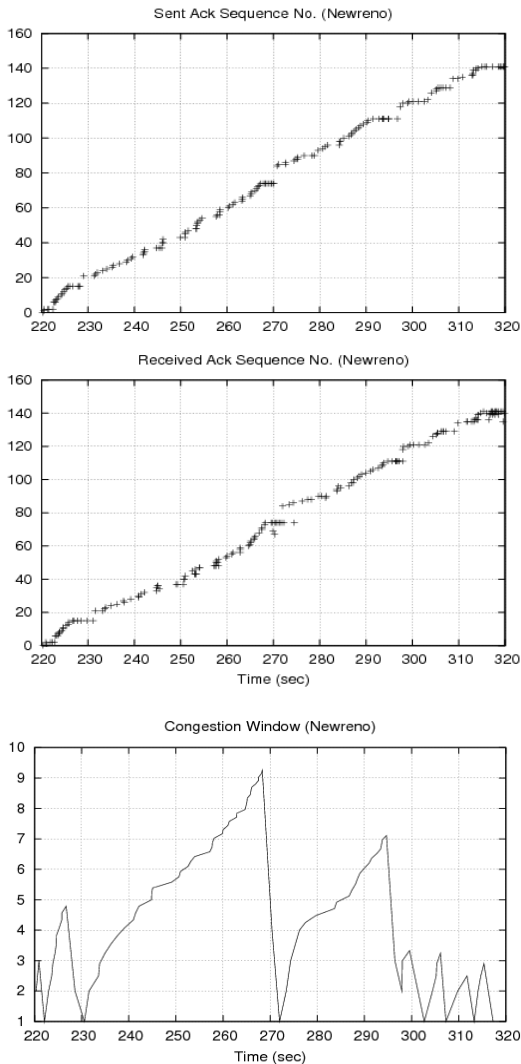


그림 5. 복제된 중복 ACK를 받은 TCP 흐름의 예: 보낸 ACK들(맨 위), 받은 ACK들(가운데), 혼잡윈도우의 변화(맨 아래)
 Fig. 5. Example TCP flow suffering false duplicate ACKs: sent ACKs(top), received ACKs (middle), congestion window (bottom)

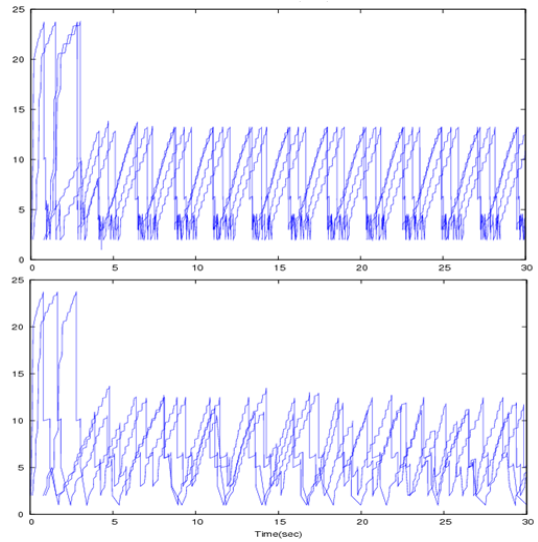


그림 6. 잘못된 중복 ACK 발생 시의 TCP-Reno(위)와 TCP-Newreno(아래)의 혼잡윈도우의 변화
 Fig. 6. Congestion window of TCP-Reno(upper) and TCP-Newreno(lower) in the presence of false duplicate acknowledgements

V. 중복 ACK에 의존하지 않는 TCP의 효과

무선 매쉬 망에서의 TCP 처리량 저하의 요인들에는 여러 가지 원인으로 인한 높은 패킷 손실률이 우선적으로 포함될 것이다. 여기에 네트워크 코딩 방식이 적용되면 목적지에 패킷의 순서가 뒤바뀌어 도착할 확률이 높아지므로 이로 인한 성능 저하가 악화된다. 그런데 네트워크 내에서 패킷이 복제될 확률이 클 경우, 더구나 이 복제된 패킷이 TCP ACK 패킷일 경우에는 앞서 보았듯이 패킷의 순서 바뀔 현상과 마찬가지로 전송률 감소를 초래한다. 지금까지의 대부분의 연구들에 있어 패킷이 네트워크 내에서 중복되어 전달되는 것을 방지하려고 한 노력은 네트워크 자원의 낭비를 막기 위함이 주목적이었고 TCP ACK 패킷이 복제될 때 나타나는 "잘못된 중복 ACK"으로 인한 TCP 처리량 감소에 대해서는 별로 주목하지 않았다. 그러나 BEND에서 보았듯이 많은 중복 패킷의 생성을 방지하지 못하면 쉽게 발생할 수 있는 문제라는 사실에 주목하게 된다.

이러한 의미에서 중복 ACK에 의존하지 않는 TCP들의 유용성은 분명하다. 예를 들어 TCP-PR[11]은 패킷들

이 지속적으로 순서가 바뀌어 들어오는 환경에서 좋은 성능을 보이도록 설계된 프로토콜이다. 기존의 표준 TCP들과는 달리, 중복 ACK의 정보를 사용하지 않고 오직 타이머에 의존하여 패킷의 손실 여부를 판정함으로써 패킷들이 지속적으로 순서가 바뀌어 들어올 경우 잘못 전송률을 감소시키는 문제를 해결하였다. 따라서 중복 ACK을 사용하지 않는 특성으로 인해 네트워크 코딩 기반의 전송 방식에서처럼 네트워크 내에서 패킷들이 복제되어 전송된다 하더라도 성능에 영향을 받지 않는 장점을 갖는다.

우리는 세 가지 MAC계층 전송방식에 대해 TCP-PR의 모의실험을 수행하였다. 그러나 초기의 실험에서는 세 방식 모두에 있어 TCP-PR이 가장 낮은 처리량을 보였다. 유선망에 비해 패킷 바뀔 현상이 잦은 무선망에서 낮은 성능을 보이는 것은 뜻밖의 결과였다. 원인은 TCP-PR이 ns-2에서 구현될 때 TCP-PR의 수신자(sink)가 새로운 패킷이 수신될 때마다 해당 패킷의 일련번호를 실은 ACK 패킷을 보내기 때문에 ACK 손실이 있을 경우 TCP-PR의 송신자가 이에 민감하게 반응하여 나타난 현상이다. 즉, 누적(cumulative) ACK을 사용하는 기존의 표준 TCP에 비해 TCP-PR은 ACK 손실에 더 많은 영향을 받은 것이다. 사실 TCP-PR이 실제 Linux 시스템에서 구현될 때에는 수신측이 TCP-Sack을 사용할 것을 가정한다^[11]. 따라서 모의실험에서와 같은 현상이 발생할 가능성은 낮다. 그러나 무선망에서 TCP ACK의 손실이 TCP의 성능에 영향을 미치는 극단적인 예를 보여준다고 하겠다.

우리는 ns-2의 TCP-PR 수신자가 TCP-Sack과 유사한 방식으로 기존에 보냈던 ACK 일련번호를 새로 보내는 ACK 패킷에 함께 실어 보내도록 수정하였다. 이러한 수정 후의 결과를 그림 7이 보여준다. 세 가지의 MAC 계층 전송 방식 모두에 대해 TCP-PR이 가장 높은 성능을 보이며 특히 BEND에 대해 큰 폭의 처리량 증가를 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 무선망을 위한 TCP가 중복 ACK에 의존하지 않고 패킷 손실을 판단할 때의 장점을 보여준다.

VI. 결론

본 논문에서는 네트워크 코딩이 사용되는 무선 메쉬

망에서의 TCP의 처리량 문제를 살펴보았다. 기존의 TCP들이 MAC계층에서 구현된 네트워크 코딩 방식에 어떻게 반응하는지를 모의실험을 통해 시험해 보았는데 특히 패킷 순서 바뀔 현상이나 네트워크 내에서의 패킷 복제가 심하게 발생할 때의 처리량 감소 문제를 보다 심도 있게 살펴보았다. 이러한 문제를 해결하기에는 중복 ACK 정보에 의존하지 않는 TCP-PR과 같은 방식의 TCP가 더 나은 성능을 보임을 모의실험을 통해 확인하였다. 향후의 과제는, 처음 설계 시 특별히 무선망을 목표로 설계되지 않은 TCP-PR이 어떠한 환경의 무선망에서도 보다 나은 성능을 보일 수 있도록 개선하는 것이다.

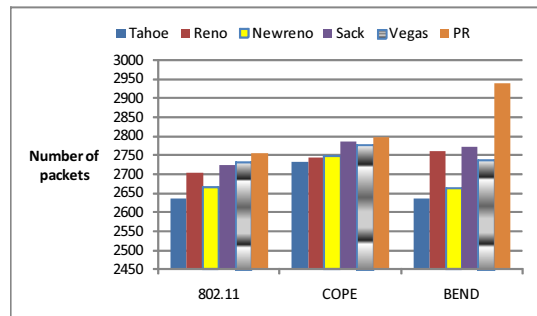


그림 7. TCP 처리량 비교: TCP-PR의 ACK을 보내는 방식을 수정한 후의 결과

Fig. 7. TCP goodput comparison: after modifying the way of TCP-PR sending ACKs

참고 문헌

- [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] Szymon Chachulski, Michael Jennings, Sachin Katti, Dina Katabi, "Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing", ACM SIGCOMM 2007.
- [3] 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.
- [4] Yong Huang, Majid Ghaderi, Don Towsley, and Weibo Gong, "TCP Performance in Coded

- Wireless Mesh Networks”, Proc of IEEE SECON, pp. 179-187, 2008.
- [5] Jay Kumar Sundararajan, Devavrat Shah, Muriel Médard, “ARQ for Network Coding”, IEEE ISIT pp. 1651-1655, 2008.
- [6] Jay Kumar Sundararajan, Devavrat Shah, Muriel Médard, Michael Mitzenmache, Joao Barros, “Network coding meets TCP”, IEEE INFOCOM 2009.
- [7] Hulya Seferoglu, Athina Markopouloum “Network Coding-Aware Queue Management for Unicast Flows over Coded Wireless Networks”, IEEE NetCod 2010.
- [8] Sofiane Hassayoun, Patrick Maille, and David Kaelin, “On the impact of random losses on TCP performance in coded wireless mesh networks”, IEEE Infocom 2010.
- [9] MinJi Kim, Muriel Médard, João Barros, “Modeling Network Coded TCP Throughput: A Simple Model and its Validation”, Submitted to IEEE INFOCOM, 2011.
- [10] S. Hassayoun, P. Maille, and D. Ross, “On the impact of random losses on TCP performance in coded wireless mesh networks”, IEEE Infocom 2010.
- [11] S. Bohacek, J. P. Hespanha, J. Lee, C. Lim, K. Obraczka, “A new TCP: TCP for Persistent Packet Reordering”, ACM/IEEE Transactions on Networking, pp. 369-382, 2006.

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>

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