

다양한 통신 링크에서 고성능 TCP에 관한 연구

김 상 미[†] · 최 선 완^{††} · 한 선 영^{†††}

요 약

지난 20년 동안 인터넷의 핵심 기술로서 Transmission Control Protocol(TCP)는 데이터 전송 기능을 성공적으로 수행한 것으로 평가된다. 신뢰성 있는 데이터 전송을 수행하기 위해서 TCP는 양방향성이 동일한 특성을 갖는 유선통신망을 가정하고 있고, 특히 패킷 손실의 원인을 네트워크의 혼잡(congestion)으로 가정하여 slow start, congestion avoidance, fast retransmit, fast recovery 알고리즘을 적용하고 있다. 그러나 무선이동통신망과 위성통신망에서는 패킷 손실이 링크 자체의 어려 또는 핸드오프에 의한 순간적인 접속단절에 의해서 발생되고, ADSL과 같은 비대칭형 통신망은 양방향성이 다른 링크 특성을 갖는다. 따라서 다양한 통신망의 링크 특성에 따라 TCP의 기능은 수정되거나 새롭게 구현되어야 한다. 본 논문에서는 유무선 링크와 위성 링크에서의 기존 TCP 문제를 분석하고, IETF Performance Implication of Link Characteristics(PILC) WG[2]에서 권고한 TCP 표준 매커니즘을 분석하고, 이에 대한 성능을 Network Simulator 2(NS-2)를 이용하여 분석한다.

A Study on the High Performance TCP over Various Communication Links

Sangmi Kim[†] · Sunwan Choi^{††} · Sunyung Han^{†††}

ABSTRACT

Transmission Control Protocol (TCP) [1] has been tuned as a reliable transfer protocol for traditional networks comprising wired links and stationary hosts with same link characteristics. TCP assumes that congestion in the network be a primary cause for packet losses and unusual delays. TCP performs well over such networks adapting to end-to-end delays and congestion losses, by standard congestion control mechanisms, such as slow-start, congestion avoidance, fast retransmit and recovery. However, networks with wireless and other lossy links suffer from significant losses due to bit errors and handoffs. An asymmetry network such as ADSL has different bandwidth for both directions. As a result, TCP's standard mechanisms incur end-to-end performance degradation in various links. In this paper, we analyze the TCP problems in wireless, satellite, and asymmetry links, and measure the new TCP mechanisms that are recommended by IETF Performance Implications of Link Characteristics (PILC) WG [2], by using Network Simulator 2 (NS-2).

키워드 : TCP, 성능평가(Capability Valuation), 인터넷(Internet), 무선통신(Wireless Communication), 유선통신(Wire Communication), 위성통신(Satellite Communication)

1. 서 론

현재 전 세계적으로 집중되고 있는 통신망 분야는 ATM으로 대변되는 광대역 초고속통신망, 일반 가입자에게 고속 서비스를 제공하기 위한 xDSL기반 통신망, 그리고 IMT-2000으로 대변되는 차세대 이동통신망, 무선통신망, 그리고 단방향 방송형 서비스를 제공할 수 있는 위성통신망으로 분류될 수 있다. 이러한 다양한 통신 환경에서 인터넷 서비스를 제공하기 위해서는 인터넷의 핵심인 Transmission Control Pro-

ocol(TCP)[1]/Internet Protocol(IP)를 이용해야 하며 TCP/IP는 지난 20년 동안 성공적인 프로토콜로 평가된다. 그러나 인터넷에서 데이터 전송을 담당하는 TCP는 slow-start, congestion avoidance, fast retransmit, fast recovery 알고리즘을 사용하고 있으며[3], 이 알고리즘은 무선통신망, 위성통신망, 비대칭 유선통신망에서 인터넷 서비스를 제공하는데 성능 저하 요인이 된다. 따라서 각기 다른 링크 특성을 갖는 망에 효과적인 인터넷 서비스를 제공하기 위해서는 TCP 기능을 확장하거나 또는 새로운 전송 프로토콜이 인터넷에 적용되어야 한다. 이에 따라 Internet Engineering Task Force (IETF)에서는 TCP 구현에 관련된 TCPIMPL WG, 위성통신망에서의 TCP를 위한 TCPSAT WG 등이 구성되어 많은 연구가 진행되었다[4-8]. 그러나 이들 WG이 특정 환경 또는

* 이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(과제번호: 1999-003-E00326).

† 준 회원 : 안양대학교 대학원 정보통신공학과

†† 정 회원 : 안양대학교 정보통신공학과 교수

††† 정 회원 : 건국대학교 전산학과 교수

논문접수 : 2002년 1월 8일, 심사완료 : 2002년 1월 23일

기존의 TCP 성능 향상만을 고려함에 따라 IETF에서는 다양한 통신 링크의 특성에 따라 각각 TCP 알고리즘을 선택적으로 적용할 필요성이 제기되었으며 이를 해결하기 위해 Performance Implication of Link Characteristics(PILC) WG[2]을 구성하여 저속 링크(slow link)[9], 예러가 많은 링크[10], 무선통신망과 유선통신망 사이에 인터넷 서비스를 제공하기 위한 프록시(performance enhancing proxy)[11], 기존 2.5G와 3G 문서이동통신망을 위한 TCP[12], ADSL과 위성통신망을 고려한 비대칭 링크에서의 TCP[13] 및 링크 계층에 대한 권고안[14], IP 트래픽에 대한 링크 ARQ[15]를 제안하고 있다.

본 논문은 다양한 통신 환경에서 IETF PILC WG이 권고한 TCP 매커니즘을 분석하고 버클리 대학에서 개발한 Network Simulator 2(NS-2)[16]를 이용하여 성능을 측정함으로써 이들 제안 알고리즘을 비교 분석한다. 본 논문은 2장에서는 다양한 통신 링크 특성에 대해서 분석하고, 3장에서는 각 통신 링크에서의 TCP 성능 향상을 위해 제안된 관련 연구를 수행하고, 4장에서는 여러 방안들의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하고, 마지막으로 5장에서는 논문의 결론에 대하여 기술한다.

2. 통신망 특성과 TCP 영향 분석

2.1 통신망 특성

본 장에서는 본 논문에서 성능 평가를 수행할 비대칭 유선통신망, 이동 무선통신망, 위성통신망에 대한 특성을 기술한다.

2.1.1 무선통신망[17-19]

무선통신망은 IEEE 802.11 표준을 따르는 W-LAN과 CDPD, Ricochet, CDMA, PHS, DoCoMo, GSM과 같은 W-WAN으로 분리할 수 있다. 무선통신망의 특징으로는 현재 낮은 대역폭, 높은 지연 시간, 접속 안정성 결여, 예측 사용성 결여 등을 꼽을 수 있다. 물론 최근 384 Kbps 이상의 3G, 그리고 200 Mbps 급의 4G에 대한 연구가 진행중이다. TCP 송신측은 수신측으로부터 어떠한 응답(ACK) 없이도 Bandwidth (B)*Delay(D) 만큼의 데이터를 보낼 수 있기 때문에 B*D 값은 인터넷상에서 상당히 중요한 요소이다. Ricochet, CDMA, PCS와 같은 W-WAN은 B*D 값이 2KB를 넘지 않는 Long Thin Network(LTN)이라 할 수 있다. 보통 TCP는 B*D 값까지 윈도우 크기를 증가시킨다. 그러나 LTN에서는 다음과 같은 이유 때문에 윈도우 크기를 크게 잡지 않는다.

- 사용자가 시간상의 제약을 알기 때문에 큰 파일을 전송하지 않으려는 경향이 있다. 보통 Email, 웹 요청, 웹 문서 등이 이에 해당한다.
- 링크가 예러가 많기 때문에 윈도우 크기가 작다.

- 네트워크의 혼잡이 많은 인터넷과 결합된 경우에 윈도우 크기가 작다.
- 운영자가 사용자당 보통 3개 정도의 패킷을 저장할 버퍼를 할당한다.
- 무선환경에서 트래픽간 경쟁을 피하고 재전송 시간을 적절히 조절하기 위해서 작은 소켓 버퍼를 할당한다.

2.1.2 비대칭 유선통신망

현재 초고속 인터넷 서비스로서 각광 받는 Asymmetric Digital Subscriber Line(ADSL)은 기존 구리 전화선을 사용하여 음성과 데이터를 동시에 송수신할 수 있는 서비스이다. 가입자와 전화국간의 데이터 전송 속도가 하향 1.5 Kbps-12 Mbps, 상향 16 Kbps-1.3 Mbps를 갖는 비대칭형 링크이다. 비대칭형 통신망은 양방향의 동일한 특성을 가정한 TCP의 기본 가정이 무시됨으로써 성능 향상을 제약한다. 즉 TCP는 항상 수신측으로부터 ACK를 받아야만 다음 데이터를 송신하는데 이를 Karn's Algorithm이라 한다. 그러나 송수신측의 속도와 지연시간이 다르기 때문에 ACK이 도착하는 전송 속도의 차이가 발생하여 양 TCP가 전송할 데이터의 양을 제한하고 왕복 시간 계산을 어렵게 함으로써 효과적인 데이터 전송을 방해한다.

2.1.3 위성통신망[5-6,11-12]

위성통신망은 지연 시간이 크고, 링크상에 존재하는 데이터의 양이 많고, 송신측에서는 수신측 방향으로 고속 위성 링크를 사용하며 수신측에서 송신측 방향으로서는 저속 위성 링크 또는 인터넷을 이용하는 비대칭형 네트워크로서 다음 특성을 갖는다.

- 지연시간이 크므로 송신측은 데이터 전송 확인이 어렵다.
- B*D 값이 9.6KB 이상이다. 따라서 위성통신망은 Long Fat Network(LFN)이라 할 수 있다.
- 링크의 예러율이 높다.
- 위성링크를 통해서 전송하는 하향링크와 인터넷 또는 저속 위성링크를 이용하는 상향 링크와의 대역폭과 지연시간이 다른 비대칭형(asymmetry)망이다.
- 저궤도 위성에서 RTT은 가변적이므로 재전송 타이머 계산이 어렵다.
- 정지궤도 위성이 아닌 경우에 TCP 접속이 위성으로부터 기지국으로 바뀌며 핸드-오프에 의한 패킷 손실이 발생된다.

2.2 통신 링크 특성에 따른 TCP 영향 분석

앞에서 기술한 각 통신망의 링크 특성은 TCP에 다음과 같은 영향을 미친다.

- 오랜 전파지연 시간
위성통신망과 같이 최소한 590 ms 이상의 왕복 시간을 갖

거나 무선통신망과 같이 약 200 ms의 왕복 시간을 갖는 통신 링크 환경에서 송신측 TCP는 오랜 시간동안 패킷이 성공적으로 상대방에게 도착했는지 결정할 수 없다.

● 큰 Bandwidth(B)*Delay(D) 값

Bandwidth(B)*Delay(D) 값이 크기 때문에 수신측으로부터 응답을 받지 않아도 송신측은 많은 데이터를 한번에 전송할 수 있지만 TCP는 많은 패킷을 관리해야 한다. 위성 및 무선통신 환경에서는 그 전송 속도를 제한해야 한다.

$$\text{throughput}_{\max} = \text{수신버퍼 크기} / \text{왕복시간(RTT)}$$

위 식에 따라 큰 윈도우가 아닌 경우에 일반 정지위성에서의 TCP의 throughput은 다음과 같이 제약된다.

$$\begin{aligned} \text{throughput}_{\max} &= 64 \text{ Kbytes} / 590\text{ms} \\ &= 112,000 \text{ byte} / \text{second} \\ &= 896,000 \text{ bits} / \text{second} \end{aligned}$$

● 전송 오류

현재 TCP는 데이터 전송 오류가 링크상의 오류인지 라우터의 오류인지를 판단할 수 없으며 따라서 모든 전송 오류를 라우터에서 패킷을 버렸다고 판단하여 윈도우 크기를 1/2로 줄임으로써 전송 속도를 크게 낮추어 성능을 저하시킨다. 그러나 위성 및 무선통신망에서는 전송링크에서의 오류율이 높기 때문에 새로운 방법을 사용해야 한다.

● 비대칭 네트워크

송수신측의 전송 속도가 다르기 때문에 TCP의 성능저하 요인이 된다. 일반적으로 비대칭망을 분석하는 계수로 normalized bandwidth ratio, k를 사용한다 즉 k는 아래와 같이 유도된다.

$$K = (\text{하향 링크 대역폭} / \text{상향 링크 대역폭}) * (\text{ACK 패킷 크기} / \text{데이터 패킷 크기})$$

만일 하향 링크의 대역폭이 10 Mbps, 상향 링크의 대역폭이 9.6 Kbps, 데이터 패킷 크기가 1000 byte, ACK 패킷 크기가 40 byte인 경우에 $k = (10 \text{ Mbps} / 9.6 \text{ Kbps}) * (40 \text{ byte} / 1000 \text{ byte})$ 이고 k값은 42이다. 이 의미는 42개의 데이터 패킷 당 1개의 ACK가 존재하면 하향 링크에서의 포화상태보다 상향 링크에서의 포화상태가 먼저 발생하는 것을 말해준다.

● 가변적인 왕복시간

저궤도 위성은 전파지연 시간이 가변적이다. 그러나 아직까지 TCP 성능과의 연관성은 밝혀지지 않고 있으므로 연구 대상이다. 무선통신망에서는 이동단말기 사용자가 갑자기 늘어날 수도 있고 줄어들 수 있기 때문에 왕복 시간을 계산하기가 어렵다. 따라서 데이터의 오류 여부를 판단하기가 어렵다.

● 간헐적인 접속

정지궤도위성이 아닌 경우에 TCP 접속은 위성으로부터 지구국으로 바뀌어지며 이 핸드-오프는 패킷 손실을 초래한다. 무선통신망에서 다른 cell로 이동할 때 핸드-오프에 의한 순간적인 접속 불능 상태가 된다. 그러나 다시 재접속이 이루어지지만 기존 TCP는 이를 알 수 없다.

3. 관련 연구 및 TCP 기능 분석

위와 같은 통신 링크의 특성에 따라 이를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되었고[21-34], 새로운 TCP 기능이 추가되었다[35-42]. 이에 따라 IETF PILC WG은 다양한 통신 링크에 적합한 새로운 메커니즘을 제공하기보다는 이미 기존 연구에서 검증된 메커니즘을 선택하고 이를 권고하기로 결정했으며 이를 IETF 표준 과정의 하나인 Best Current Practice(BCP)로 제안하기로 하였다. <표 1>은 무선통신망과 위성통신망에서의 TCP 기능을 분석한 결과이다.

<표 1> 통신 링크 특성에 따른 TCP 기능 분석

기능	무선통신망	위성통신망
Slow Start / Congestion Avoidance [3]	RTT에 영향을 받으므로 가능한 큰 윈도우 사용	RTT에 영향을 받으므로 가능한 큰 윈도우 사용
Fast Retransmit / Fast Recovery [3]	<ul style="list-style-type: none"> 첫 번째 중복 ACK를 받으면 즉시 재전송 할 수 있도록 fast retransmit 수정 fast recovery 알고리즘에서는 윈도우를 줄이지 않도록 수정 윈도우를 작게 유지하므로 중복 ACK 가능성이 적으므로 장점을 살릴 수 없다. 	<ul style="list-style-type: none"> 좌동 좌동 윈도우를 크게 유지하므로 장점을 살릴 수 있다. 송신국만 수정하면 됨.
T / TCP [38]	지연시간이 큰 링크에서 접속 설정 시간을 줄이는 장점은 있으나 암호화에 문제가 있고 모든 접속의 종단부에 구현되어야 한다.	좌 동
큰 윈도우 크기 [7, 8]	<ul style="list-style-type: none"> 지연 시간이 크기 때문에 초기에 큰 윈도우를 설정. 현재 2~4 패킷이 유력 	<ul style="list-style-type: none"> B*D 값과 RTT값이 무선통신망보다 크므로 윈도우가 B*D 값에 도달하기 전에 데이터 전송 완료 가능성 송신측의 능력을 최대한 활용 못하므로 무선통신망보다 큰 초기 윈도우 고려
ACK spacing [43]	ACK spacing router를 BS가 담당함.	ACK spacing router를 수신국 근처 라우터에서 담당함.
ACK Counting [25]	네트워크 혼잡 발생시 문제 야기	좌 동
ACK-every-segment [25]	<ul style="list-style-type: none"> 성능 향상 지연 ACK 기능은 인터넷 표준에서 의무 사항 해결: 첫번째 패킷에 대한 ACK을 지연없이 전달하고 다음부터는 지연 ACK 수행 	좌 동

〈표 1〉 통신 링크 특성에 따른 TCP 기능 분석(계속)

중복 ACK 지연 (delayed duplicated ACK) [17, 26]	<ul style="list-style-type: none"> 수신측에서 얼마동안 지연해야 하는지 어렵다. BS에 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 좌동 송신측의 중간 시스템에서 처리
Selective ACK(SACK) [42]	<ul style="list-style-type: none"> 윈도우 크기가 4개 패킷 정도이므로 장점 없음. proxy상에서 함께 사용 가능 	윈도우 크기가 크고 링크상의 에러가 많으므로 유용
Forward Explicit Congestion Notification(FECN) [6, 40]	링크에 기인한 에러가 많은 환경에서 구현 요구됨.	적극 수용
순간적인 접속 단절에 의한 에러 처리 [44]	<ul style="list-style-type: none"> 이동통신망에서 핸드-오프에 의한 순간적인 비접속에 따른 ACK 수신 불능 송신측은 ACK을 못 받으므로 재전송하고 윈도우를 줄임. 그러나 현재 접속이 해제된 상태임. 중간 노드에서 순간적인 접속 해제입을 파악하여 해결 	좌 동
기지국에서 지연 중복 ACK [4,13,25]	패킷 손실이 혼잡에 의한 경우에 불필요하게 재전송을 지연시킴.	좌 동
헤더 압축 [45-47]	적 용	적 용
단절 TCP 접속 [44]	<ul style="list-style-type: none"> TCP end-to-end semantics 만족할 때 수용 기지국에 구현 기지국이 crash될 때 문제 발생 	비대칭 환경
TCP Control Block(TCB), 공유 [48]	<ul style="list-style-type: none"> 이동 단말기 사용자는 거의 같은 서버에 접속하므로 그 당시 상태 정보를 저장하여 새로운 접속시에 사용 수용 	수 용
SNOOP [25]	<ul style="list-style-type: none"> 기지국에 구현 링크 계층 수신측으로부터의 중복 ACK을 기지국에서 적당히 버림으로써 송신측이 fast retransmit과 congetion avoidance를 피함. 그러나 B*D 값이 4보다 작으면 중복 ACK이 발생하지 않으므로 효과 없음. 기지국은 이동단말기로부터 ACK을 받아야 송신측으로 ACK를 보냄. 기지국에서 재전송 수행 기지국에서 신뢰성있는 암호화를 수행해야 함. TCP endto-end semantics 만족하므로 수용 	좌 동
SNOOP with SACK [25]	윈도우 크기가 작으므로 성능 향상은 크지 않음.	윈도우 크기가 크므로 적극 수용

4. 성능 평가

본 논문에서는 다양한 통신 링크에서의 TCP 기능을 고려하고 성능을 분석하기 위하여 Linux Alzza 6.0 기반 Kernel 2.2.5-22에서 Network Simulator 2(NS-2)[16]를 이용하여 수행하였다. NS는 Tool Command Language(Tcl)을 확장해서 사용하고, Tcl 프로그램에 의해서 구현되는 시뮬레이터이다. NS의 명령어는 네트워크 노드를 구성하고 송신과 수신호를 형성할 수 있고, 링크지연 큐의 선택 등을 이용해서 nam, xgraph와 같은 비주얼 툴을 사용해서 패킷의 움직임이나 시뮬레이션 결과에 대한 통계를 수집할 수 있다.

4.1 성능 평가 모델

본 논문에서는 성능 평가를 위한 모델로서 유선통신망, 무선 I-TCP(Indirect TCP)망, 무선 M-TCP(Mobile TCP)망, 위성통신 대칭망, 위성통신 비대칭망을 제시하였다.

4.1.1 유선통신망

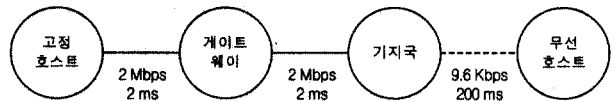
유선통신망의 성능 평가 환경은 (그림 1)과 같이 각 링크의 대역폭은 0.8 Mbps이고 송신측과 게이트웨이는 0.1 ms의 지연특성을 갖고 게이트웨이와 수신측은 100 ms의 지연특성을 갖는 링크로 구성되었다. TCP Tahoe를 사용하였고 환경에 따라 0.8 Mbps 대역폭은 9.6 Kbps, 250 Kbps로 게이트웨이와 수신측 사이의 100 ms 지연시간은 200 ms로 바꾸어 실험하였다.



(그림 1) 유선통신망 성능 평가 모델

4.1.2 무선통신망

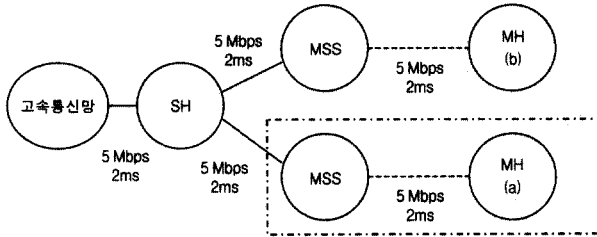
(그림 2)는 무선호스트(무선 단말기), 기지국(Base Station), 고정호스트로 구성되는 네트워크 모델이다. 기지국은 무선링크와 유선링크 사이에서 프록시 기능을 수행한다. 본 시뮬레이션의 모델은 Code Division Multiple Access(CDMA) 모델에 맞추어 대역폭을 9.6 Kbps로 하였으나 상향 384 Kbps 2 Mbps까지 측정 가능하다. 그리고 200 ms의 지연시간은 IETF PILC WG에서의 일반적인 측정치를 사용한 것이다. 각 링크는 2 Mbps의 대역폭과 2 ms의 지연특성을 갖는다.



(그림 2) I-TCP 성능 평가 모델

(그림 3)에서 Mobile Host(MH)는 이동중인 사용자로서

MH(a)에서 MH(b)로 이동하고 있고 Mobile Support Station(MSS)과 통신하며, MSS는 Supervisor Host(SH)에 의해 제어된다. SH는 유선망에 연결되어 있으며, 게이트웨이 기능을 제공한다. 상황에 따라 고속 통신망에서 MSS까지의 링크에서 5 Mbps대역폭을 9.6 Kbps, 250 Kbps로 2 ms 지연을 10 ms로 바꾸어 실험하였다.



MH : Mobile Host SH : Supervisor Host MSS : Mobile Support Station

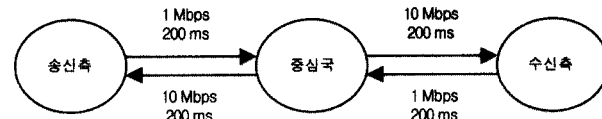
(그림 3) M-TCP 성능 평가모델

4.1.3 위성통신망

(그림 4)는 업링크와 다운링크가 10 Mbps의 대역폭과 500 ms의 지연 특성을 갖는 대칭망 실험 환경으로서 상황에 따라 10 Mbps의 대역폭을 500 Kbps, 2 Mbps로 바꾸어 실험하였다. (그림 5)는 업링크는 1 Mbps, 200 ms 특성을 갖고 다운링크는 10 Mbps, 200 ms 특성을 갖는 비대칭망 시험 환경으로서 상황에 따라 다운링크의 10 Mbps 대역폭을 500 Kbps, 5 Mbps로 바꾸어 실험하였다. (그림 4)와 (그림 5)에서 링크 손실을 고려한 시뮬레이션은 BER을 각각 10^{-5} , 10^{-6} 으로 하였다.



(그림 4) 대칭망 성능 평가 모델



(그림 5) 비대칭망 성능 평가 모델

4.2 성능 측정 및 분석

본 논문에서 고려한 TCP 기능은 아래와 같다.

- Window Scale Option에 따른 TCP 전송율
- Increasing TCP's initial window에 따른 TCP 전송율
- MTU에 따른 TCP 전송율
- ECN에 따른 TCP 전송율
- Snoop에 따른 TCP 전송율
- Sack에 따른 TCP 전송율

유선통신망과 무선통신망에서는 대역폭과 지연시간에 대

한 조건을 고려하였고 위성통신망에서는 높은 에러율에 의한 특성으로 인해 대역폭과 에러율(BER)에 대한 조건을 바꾸어 가면서 실험하였다.

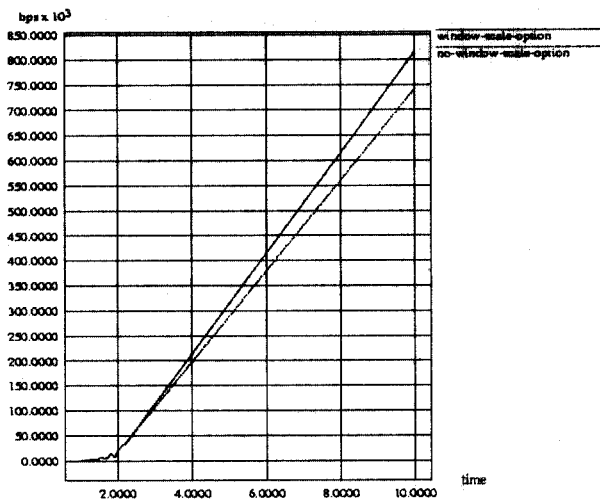
4.2.1 Window Scale Option에 따른 성능 측정

기존의 TCP의 윈도우 영역은 16 비트이므로 윈도우 크기는 최대 64 KByte 값을 얻을 수 있다. 따라서 링크 대역폭 888.61 Kbps($64 \text{ KB} * 8 / 590 \text{ ms}$)까지는 Window Scale Option을 사용하지 않아도 최대 링크 효율을 얻을 수 있지만 그 이상의 대역폭에서는 최대 링크 효율을 얻을 수 없다. 따라서 RFC에 명시된 Window Scale option을 사용하고 여러가지 대역폭과 지연시간, BER을 적용함으로써 각 통신 링크 환경의 전송율의 향상을 비교한다.

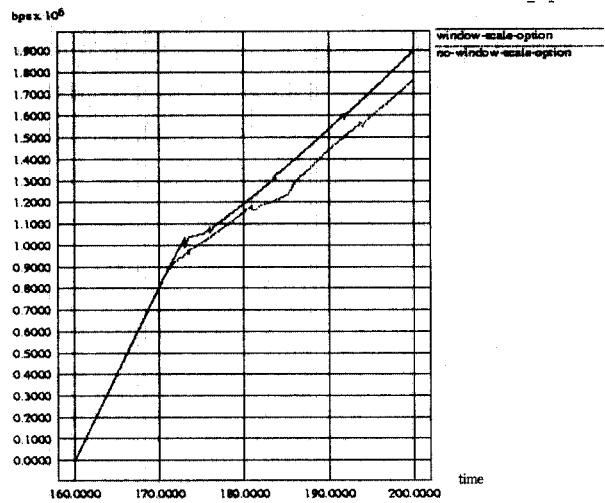
(그림 6)은 각 통신링크에서 Window Scale Option을 사용하여 수신단 버퍼 크기를 725 Kbytes로 증가시켰을 때의 TCP 트래픽 특성을 보여준다. 모든 환경에서 수신단의 버퍼 크기가 큰 경우 전송율이 향상되는 것을 볼 수 있다. 위성통신망에서는 처음 얼마동안은 차이를 보이지 않고 2~3초 후부터 전송율에 차이가 나타나고 있으며 다른 통신망 환경의 약 5~6% 전송율 증가에 비해 12~13% 정도의 큰 전송율 향상을 보이고 있다. 이것은 위성통신망이 다른 통신망보다 Bandwidth * Delay 값이 크기 때문이다. 위성통신망에서는 대칭망이 비대칭망보다 전송율이 약간 더 향상되었음을 볼 수 있다.

(그림 7)은 유무선 환경에서 Window Scale Option을 사용하였을 때 지연시간과 대역폭에 따른 전송율을 나타내고 있다. (그림 7(a))에서 대역폭이 250 Kbps와 0.8 Mbps인 경우를 비교할 때 8초 경과 시점에 약 380 Kbps의 전송율 차이를 보이는 반면 (그림 7(b))에서와 같이 지연시간이 2배인 경우에는 약 100 Kbps의 전송율 차이만을 보이고 있다. 무선 I-TCP망에서는 (그림 7(c))와 (그림 7(d))에서 보듯이 지연시간이 큰 차이에도 불구하고 190초에서 각각 약 850 Kbps와 1480 Kbps의 전송율을 보이고 있다. 그리고 무선 M-TCP망에서는 약간의 차이는 있지만 (그림 7(e))와 (그림 7(f))의 전송율은 거의 같다. 전체적으로 지연시간이 적은 환경에서 전송율이 향상되었지만 일정 배수로 증가하지는 않음을 알 수 있다.

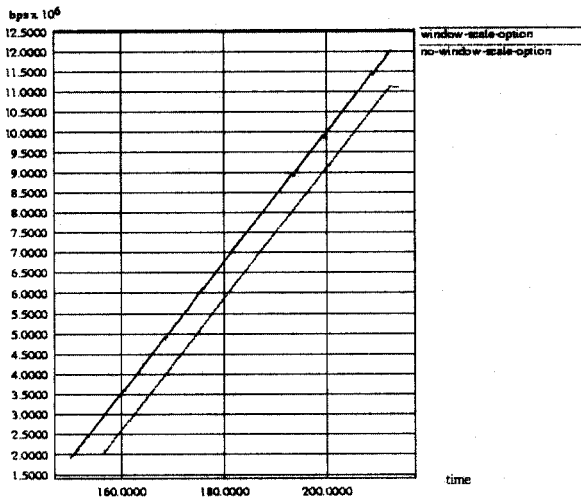
(그림 8)은 위성통신 환경에서 Window Scale Option을 사용하였을 때 BER과 대역폭에 따른 전송율을 나타내고 있다. 상향 링크의 대역폭을 1 Mbps로 고정하고 하향 링크의 대역폭을 2 Mbps, 500 Kbps로 바꾸어 실험하였다. 전체적으로 대역폭이 클수록 전송율이 높고, 대칭망과 비대칭망은 거의 동일한 결과를 보이고 있다. BER을 기준으로 비교할 때 BER이 10^{-5} 인 경우에 전체 전송량의 약 29%를 BER이 10^{-6} 인 경우 약 64% 정도의 전송량을 보이고 있으며 BER이 낮을수록 상당한 전송율 차이를 보임을 알 수 있다.



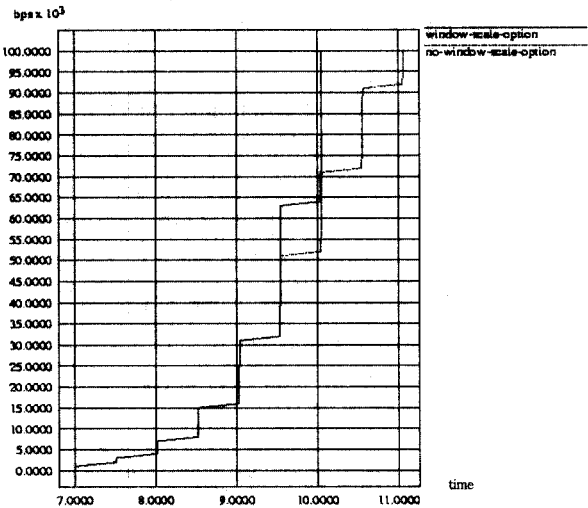
(a) 유선통신망



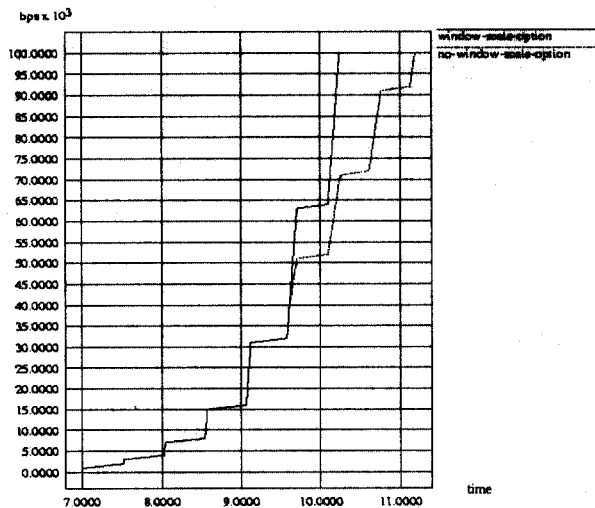
(b) 무선 I-TCP망



(c) 무선 M-TCP망

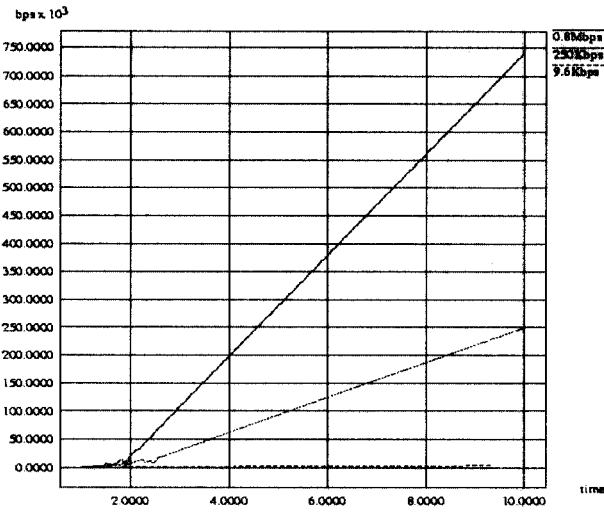


(d) 위성통신 대칭망

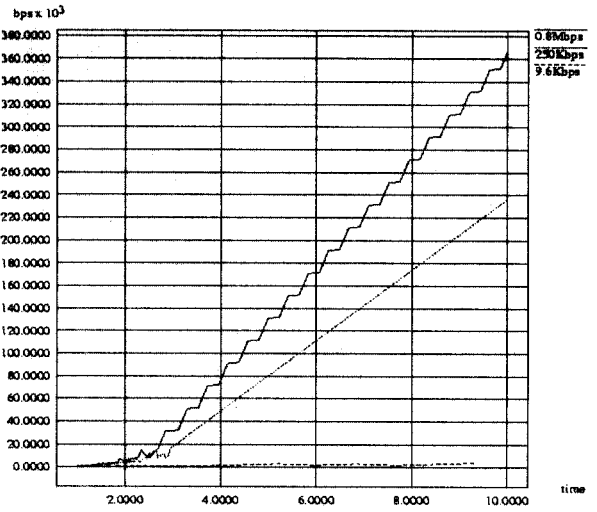


(e) 위성통신 비대칭망

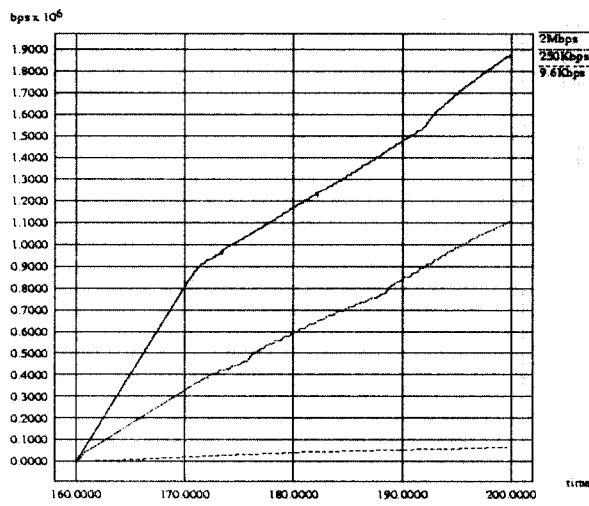
(그림 6) 각 통신링크에서 Window Scale Option을 사용하였을 때 전송율



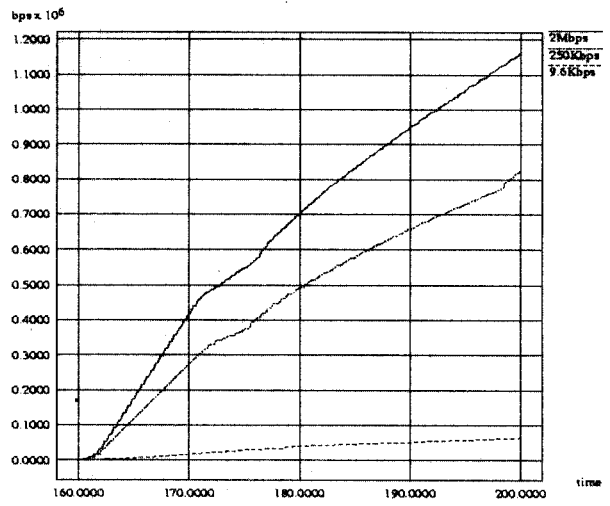
(a) 유선통신망 delay = 100ms



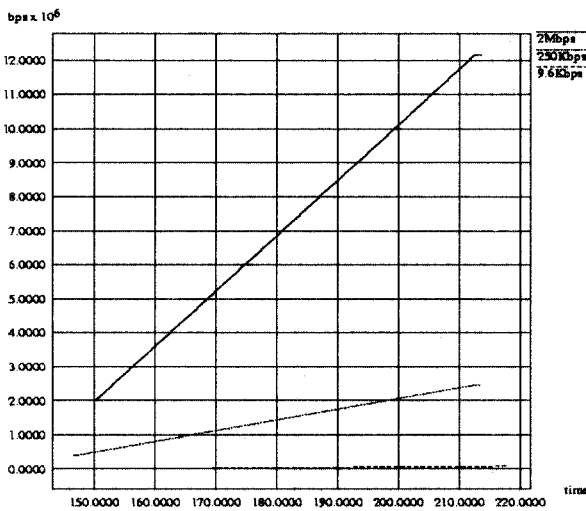
(b) 유선통신망 delay = 200ms



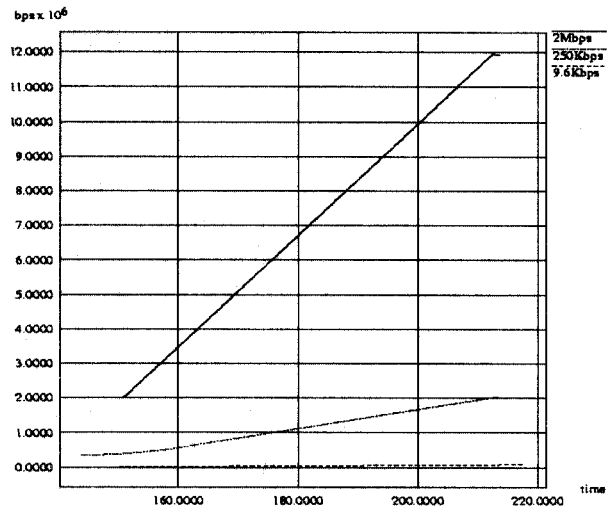
(c) 무선 I-TCP망 delay = 2ms



(d) 무선 I-TCP망 delay = 100ms

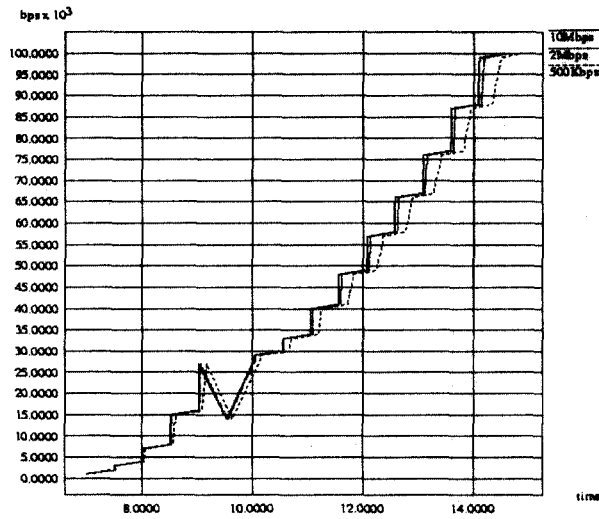


(e) 무선 M-TCP망 delay = 2ms

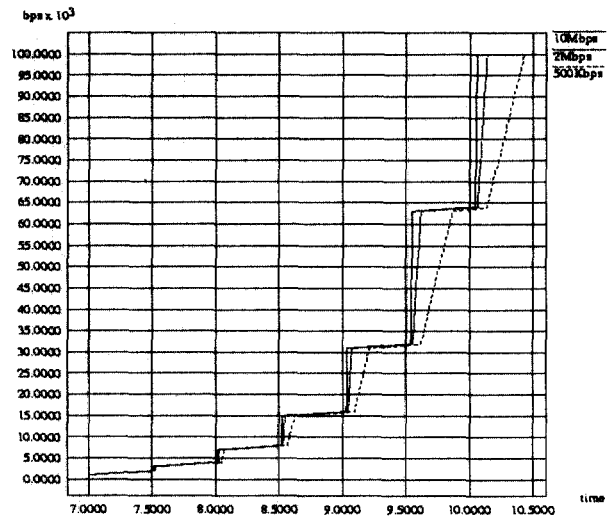


(f) 무선 M-TCP망 delay = 10ms

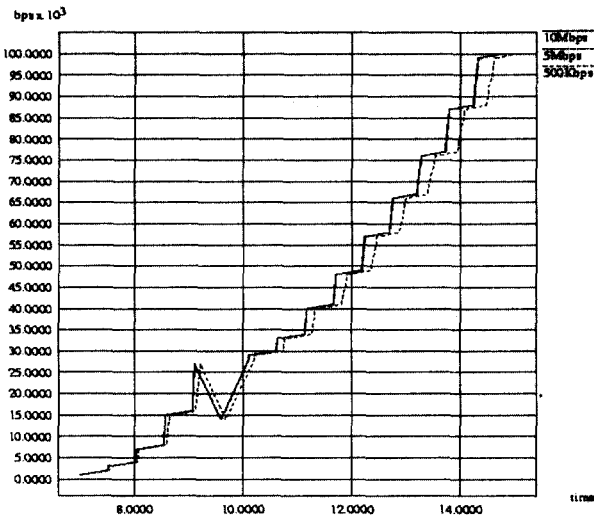
(그림 7) 지연시간과 대역폭에 따른 유선과 무선 환경에서의 전송율



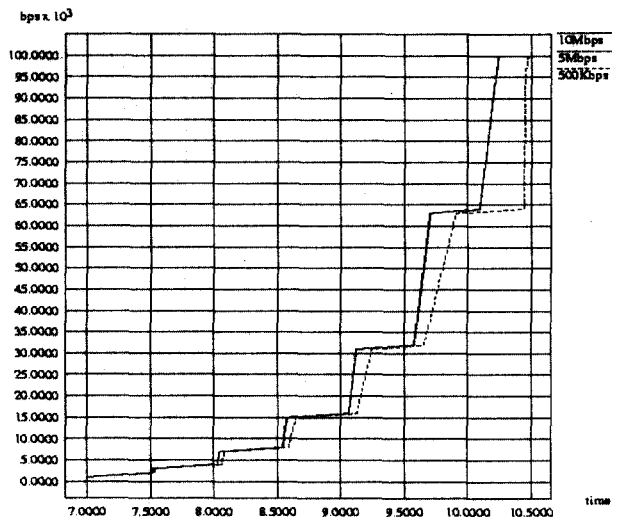
(a) 위성통신 대칭망 BER = 10^{-5}



(b) 위성통신 대칭망 BER = 10^{-6}



(c) 위성통신 비대칭망 BER = 10^{-5}



(d) 위성통신 비대칭망 BER = 10^{-6}

(그림 8) 위성 환경에서 Window Scale option을 사용하였을 때 BER과 대역폭에 따른 전송율

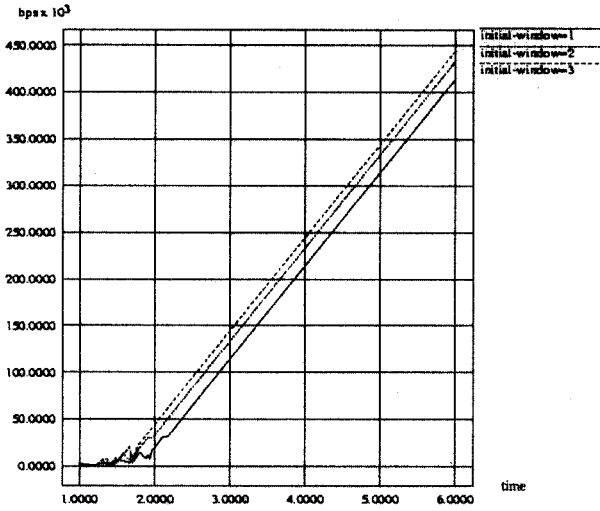
4.2.2 초기 윈도우 크기에 따른 성능 측정

한 개의 세그먼트를 초기 윈도우로 사용하는 slow start 메커니즘은 데이터를 전송하는데 오랜 시간을 소요한다. IETF에서는 TCP의 초기 윈도우를 1세그먼트에서 2~4세그먼트를 갖는 것에 대해 연구하였다. 이러한 변경은 최대 전송율까지 도달하는데 적은 RTT만이 소요되므로 주로 작은 데이터를 송수신하는 경우 유리하다. (그림 9)는 각 통신 링크 환경에서 초기 전송 세그먼트를 증가시켰을 경우의 성능을 보여준다. 그림에서도 알 수 있듯이 기존의 한 개의 세그먼트를 전송하는 방법보다 위성통신 환경에서는 약 6%, 무선통신 환경에서는 약 12~16%, 위성통신 환경에서는 약 26%~30% 정도 전송률이 증가했다. 위성통신 환경이 다른 통신 환경보다 더 큰 전송률 향상을 보이고 있는데 이것은 위성망의 긴 전파지연 특성 때문이다. 전파지연이 짧은 망에서는 slow start 구간의 영향이 적

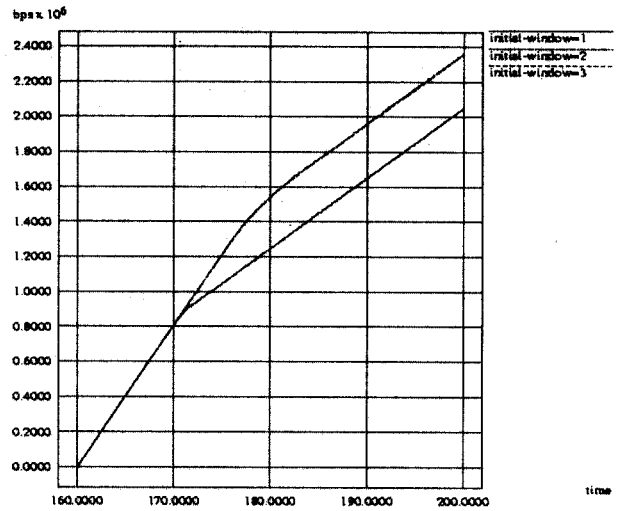
게 나타나지만 위성망에서는 패킷 전송 후에 ACK 패킷을 수신하는 데까지 약 590ms가 소요되므로 심각한 전송률 저해 요인이 된다.

(그림 10)은 초기 윈도우가 2개 세그먼트인 유무선 환경에서 대역폭과 지연시간에 따른 전송률 변화를 보여준다. 시간이 지남에 따라 대역폭이 클수록 좋은 성능을 보이고 있고, 지연 시간이 작을수록 좋은 성능을 보이고 있지만 초기 윈도우에 따른 성능 향상으로 보이지는 않는다.

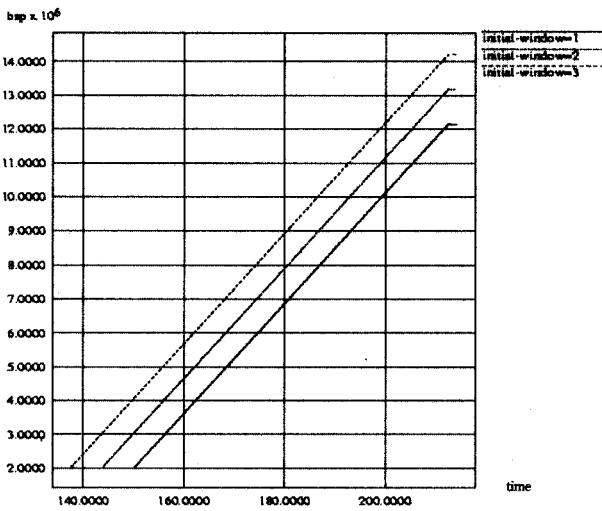
(그림 11)은 위성 환경에서 초기 윈도우가 2개 세그먼트일 때 대역폭과 BER에 따른 전송율을 보여준다. 상향 링크의 대역폭은 1Mbps로 고정하고 하향 링크의 대역폭은 2Mbps, 500 Kbps로 바꾸어 실험하였다. 대역폭에 따른 전송률 차이는 작고 BER이 10^{-5} 과 BER이 10^{-6} 인 경우 두 배 이상의 전송률 차이를 보이고 있다.



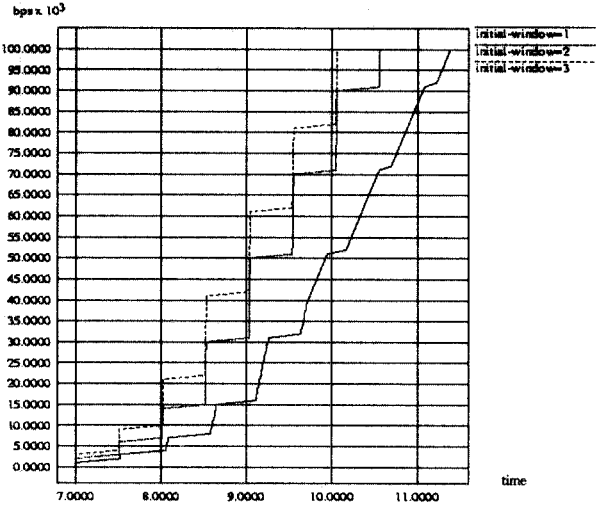
(a) 유선통신망



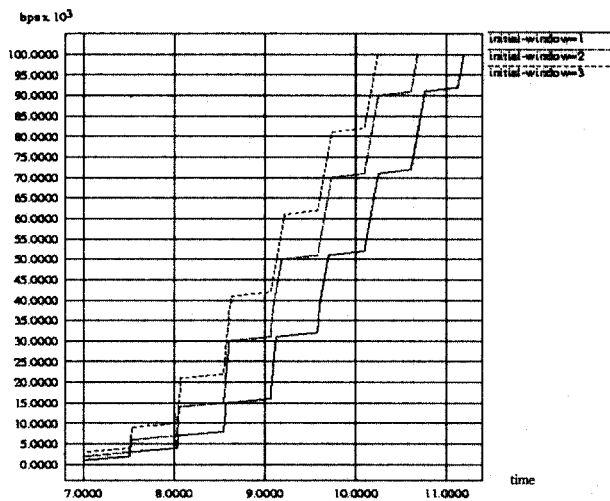
(b) 무선 I-TCP망



(c) 무선 M-TCP망

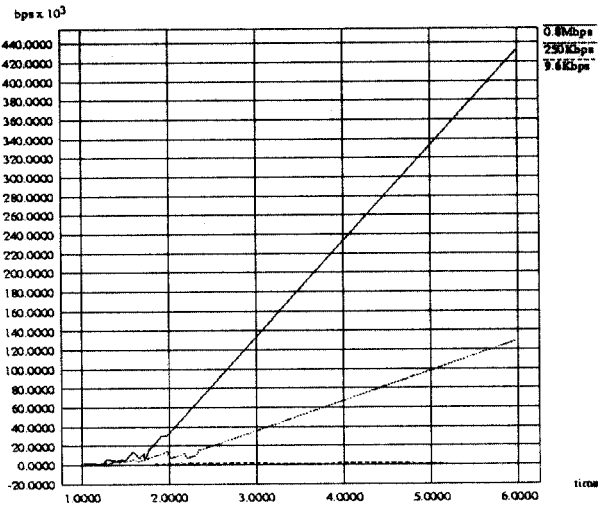


(d) 위성통신 대칭망

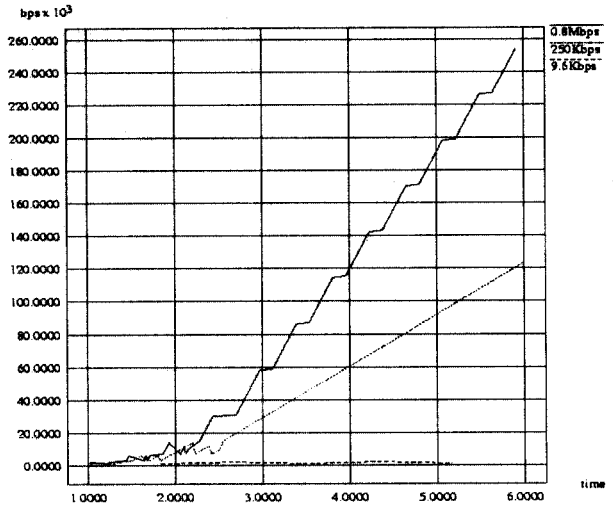


(e) 위성통신 비대칭망

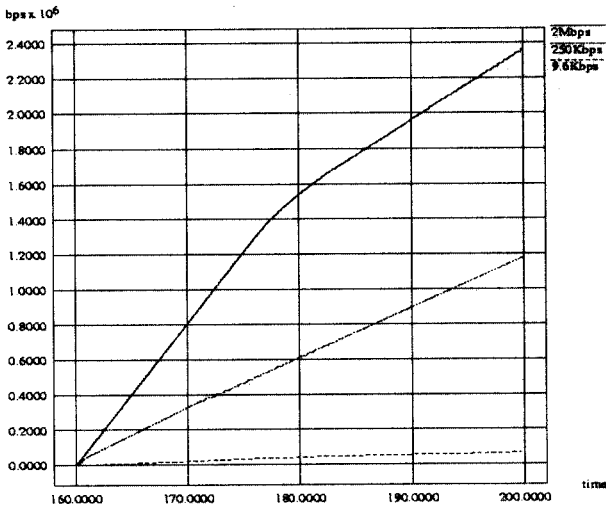
(그림 9) TCP 초기 윈도우에 따른 전송율



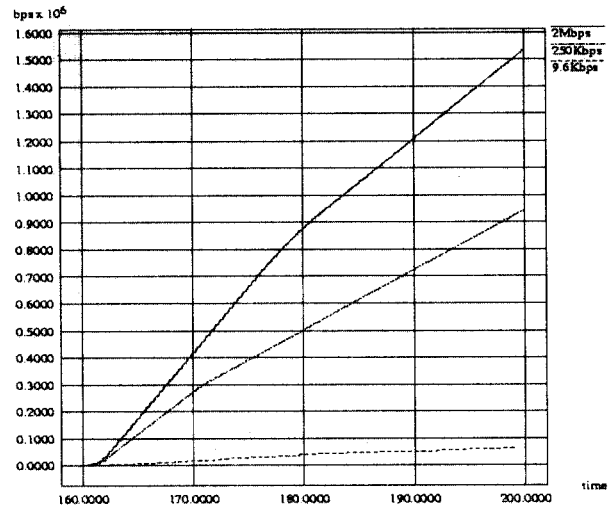
(a) 유선통신망(지연시간 = 100 ms)



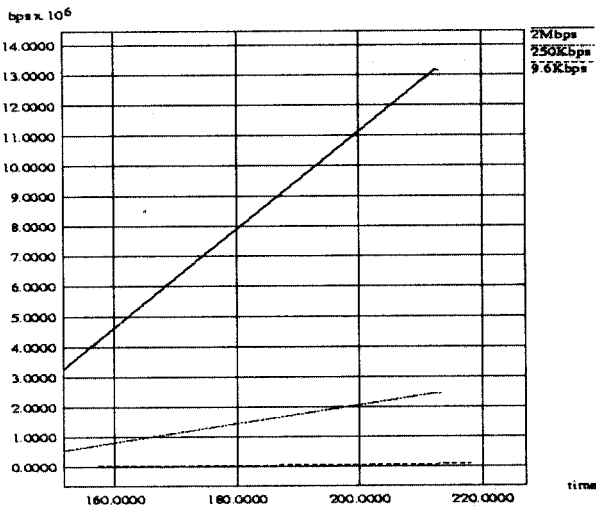
(b) 유선통신망(지연시간 = 200 ms)



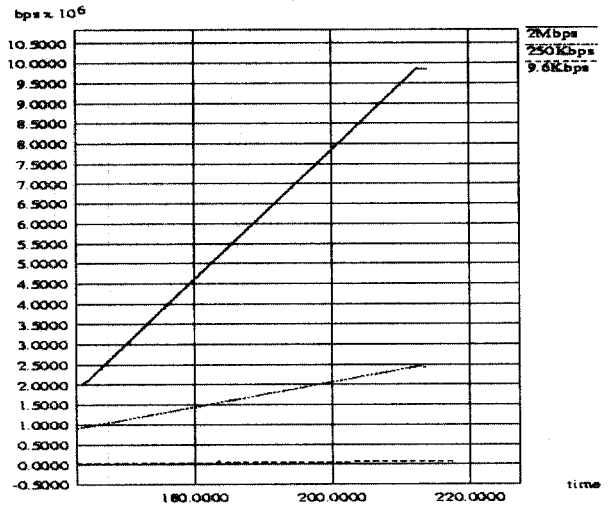
(c) 무선 I-TCP망(지연시간 = 2 ms)



(d) 무선 I-TCP망(지연시간 = 100 ms)

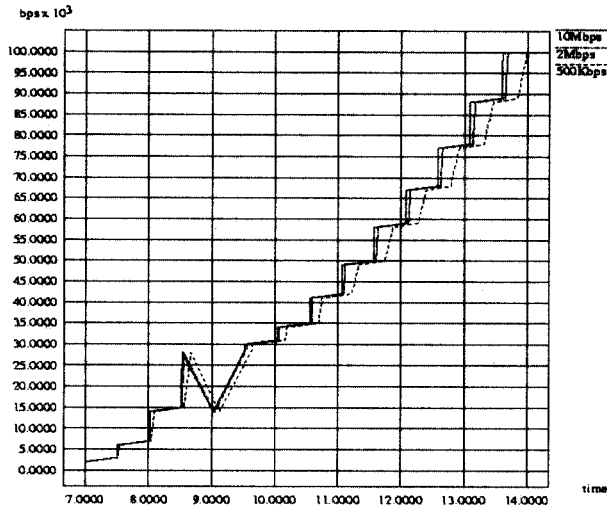


(e) 무선 M-TCP망(지연시간 = 2 ms)

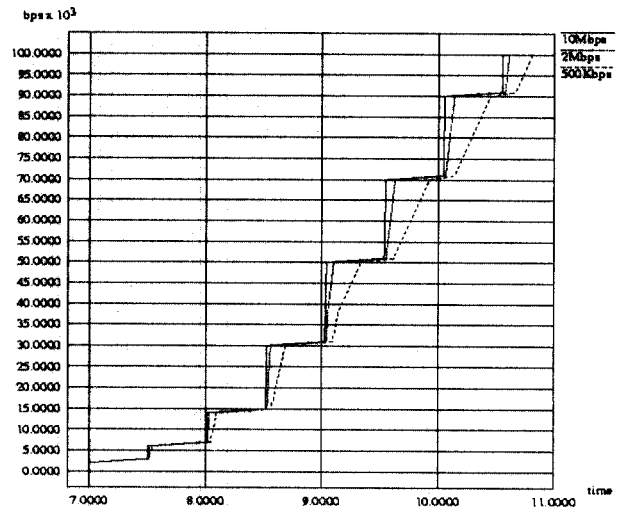


(f) 무선 M-TCP망(지연시간 = 10 ms)

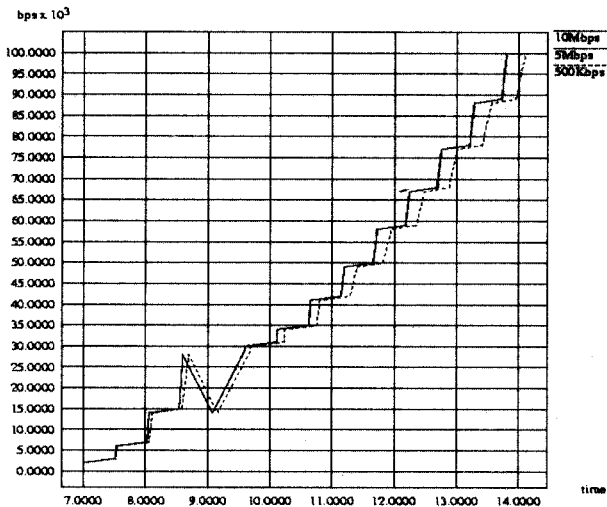
(그림 10) 지연시간과 대역폭에 따른 전송율



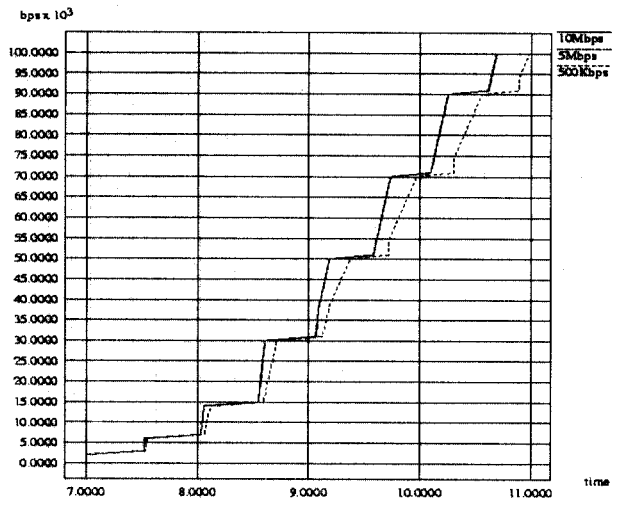
(a) 위성통신 대칭망 BER = 10^{-5}



(b) 위성통신 대칭망 BER = 10^{-6}



(c) 위성통신 비대칭망 BER = 10^{-5}



(d) 위성통신 비대칭망 BER = 10^{-6}

(그림 11) 대역폭과 BER에 따른 위성 환경에서의 전송율

4.2.3 MTU(Maximum Transmission Unit)에 따른 성능 측정

(그림 12)는 각 통신 링크 환경에 따라 전송율을 높이기 위해서 여러 가지 MTU를 적용함으로써 나타난 결과이다. (그림 12(a))에서는 1024 byte와 1460 byte가 같은 전송율을 보이고 있다. (그림 12(b)), (그림 12(d)), (그림 12(e))는 패킷의 크기가 클수록 전송율이 향상되고 있는 반면 (그림 12(c))에서는 MTU의 크기가 작을수록 전송율이 향상되고 있다. 즉 (그림 12(c))에서는 패킷이 중간 라우터를 거치면서 프라그먼트(fragmentation)되어 여러 패킷으로 분리 되어서 많은 시간을 소요할 경우 1000 byte가 가장 적절한 MTU가 되는 것이다.

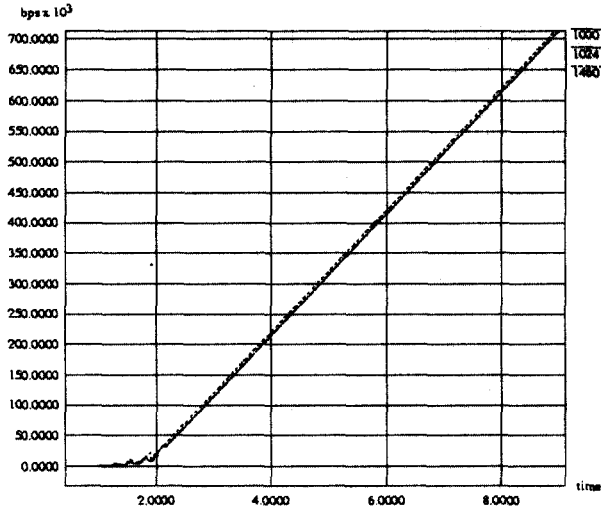
4.2.4 ECN(Explicit Congestion Notification)에 따른 성능 측정

(그림 13)은 각 통신 링크에서 ECN을 적용하였을 때의 전송율을 나타내고 있다. 유선통신망과 무선 M-TCP 망은 ECN의

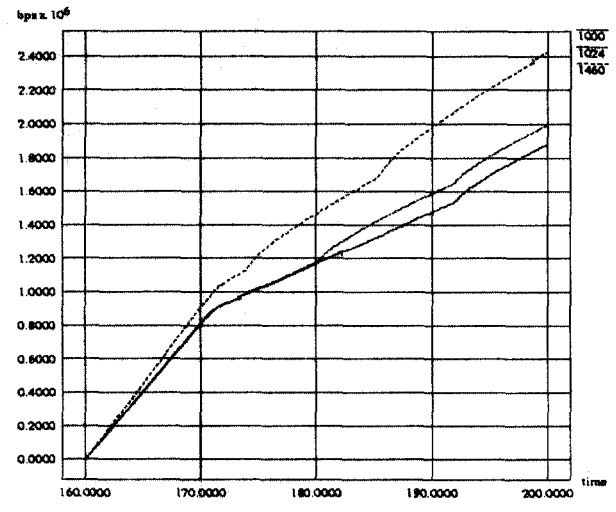
적용에 따라 전송율의 차이가 없었고 다른 통신망에서는 ECN의 적용이 약간의 전송율 증가를 가져오고 있다.

4.2.5 Snoop에 따른 성능 측정

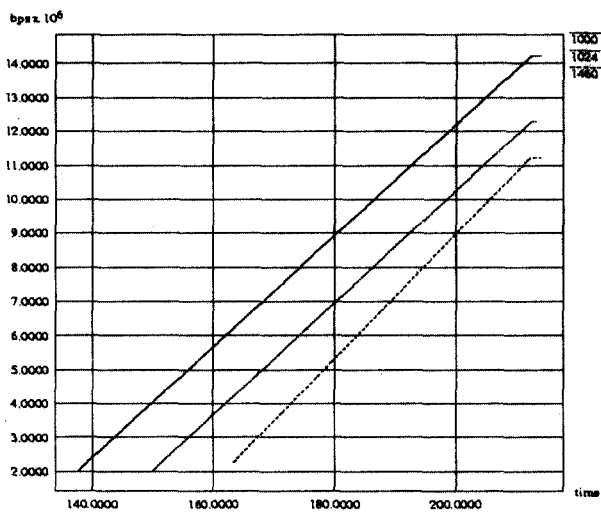
Snoop 프로토콜은 이동 호스트와 고정 호스트 사이에서 패킷 송수신을 책임지는 중간 호스트인 기지국에서 Snoop 에이전트를 통해 전송 성능의 향상을 이루어 내는 프로토콜이다. Snoop 에이전트는 기지국을 통해 전송하며 아직 수신측에게 ACK이 안된 세그먼트를 캐쉬에 저장했다가 중복되는 ACK 또는 지역 타임 아웃에 의해 유실된 패킷이 있다는 것을 알게 되었을 때 캐쉬에 있는 유실된 패킷을 전송한다. 그리고 반복되는 ACK이 송신측으로 가는 것을 막아 송신측으로부터 중복되는 재전송을 막는다. 캐쉬에 저장된 세그먼트는 올바른 ACK이 오면 삭제된다. 이와 같이 무선 환경에서는 TCP의 end-to-end semantics를 위배하게 되며 송신측은 중복된 ACK를 받지 않으므로 송신측이 빠른 재전송(fast retransmit)과 혼잡회피(congestion avoidance) 과정을 수행하지 않는다.



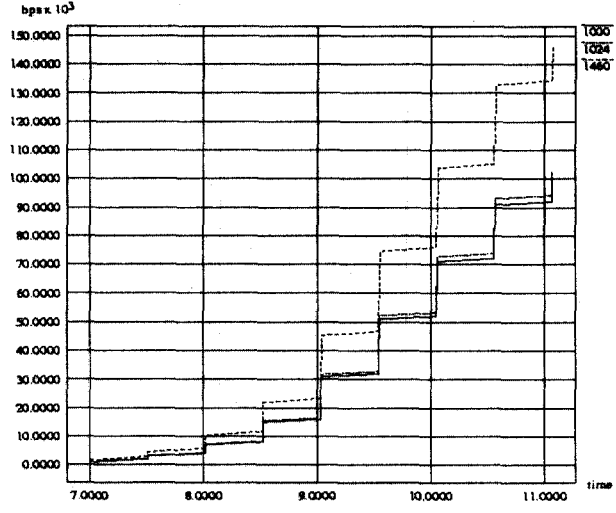
(a) 유선통신망



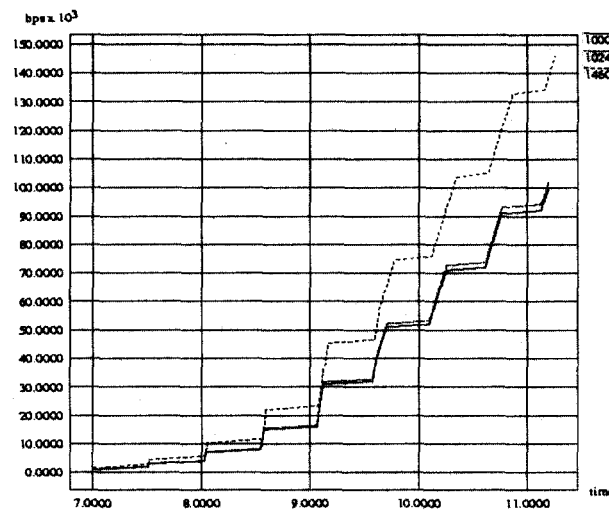
(b) 무선 I-TCP망



(c) 무선 M-TCP망

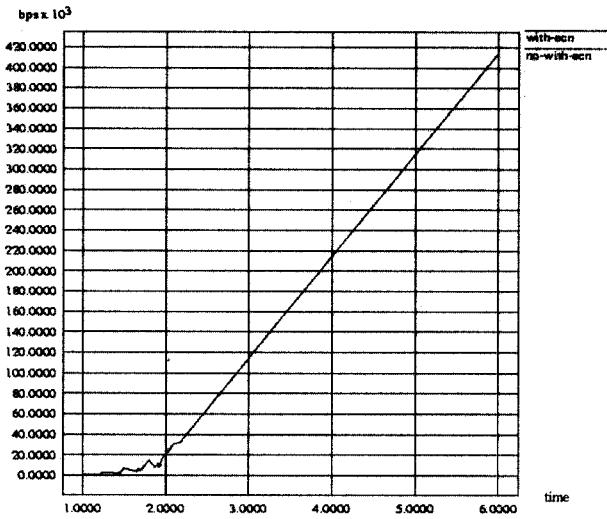


(d) 위성통신 대칭망

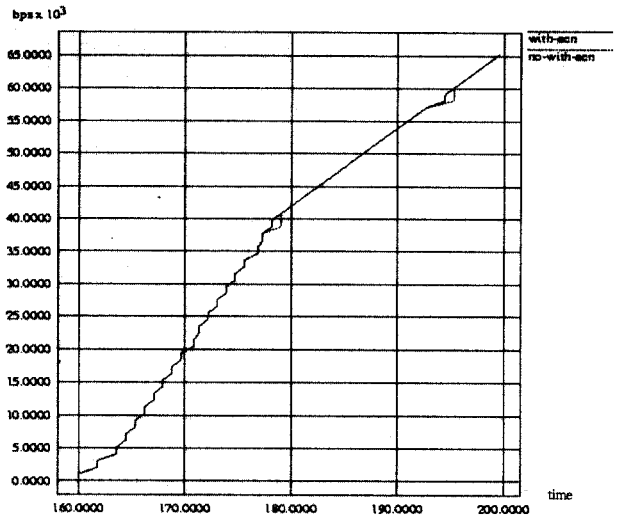


(e) 위성통신 비대칭망

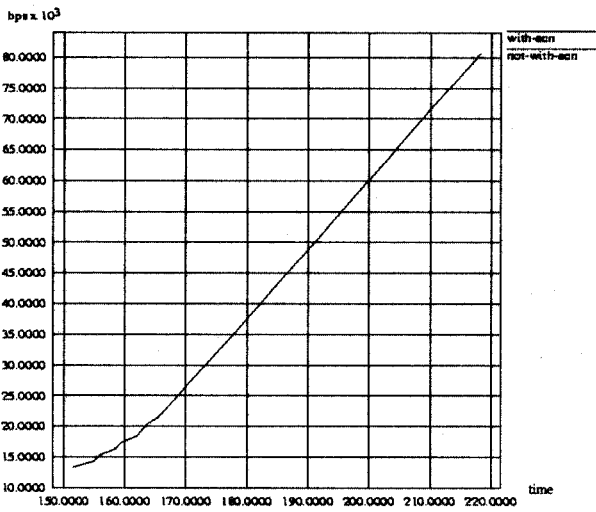
(그림 12) MTU에 따른 전송율



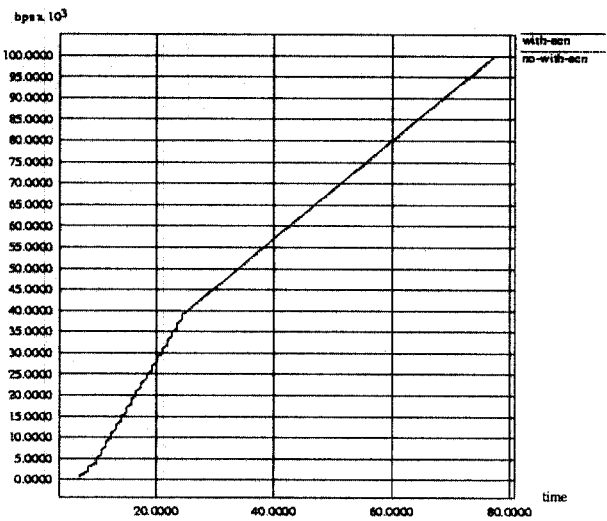
(a) 유선통신망



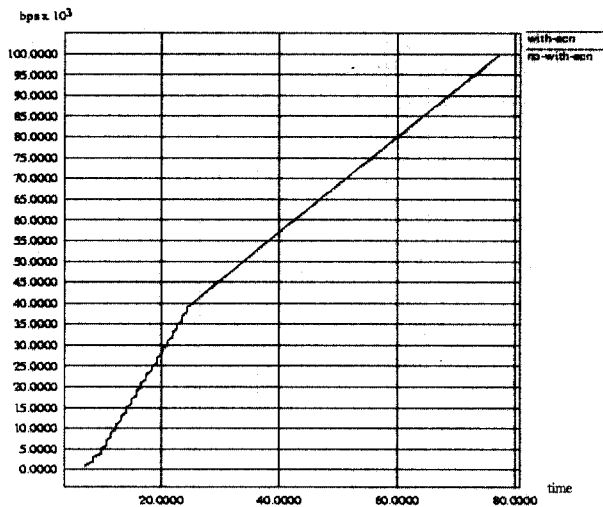
(b) 무선 I-TCP망



(c) 무선 M-TCP망

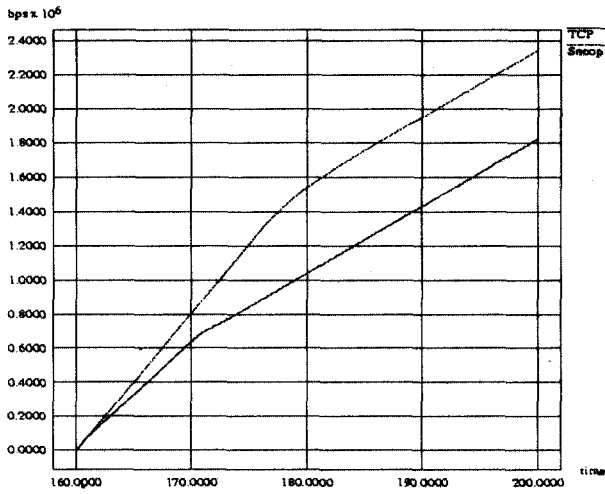


(d) 위성통신 대칭망

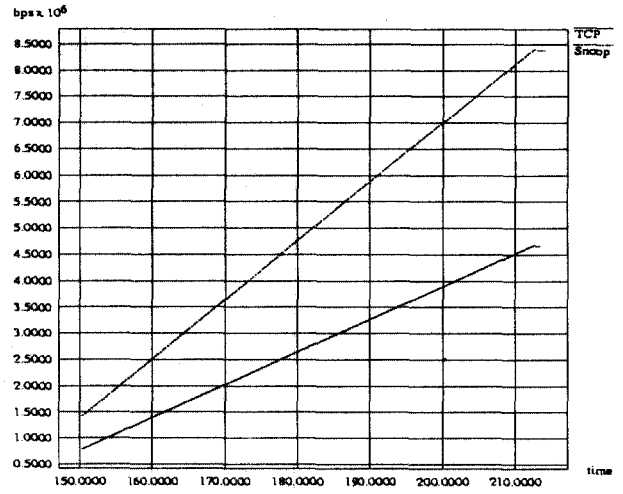


(e) 위성통신 비대칭망

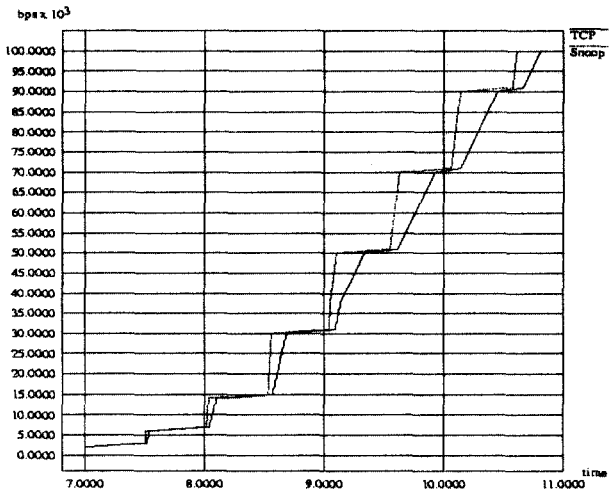
(그림 13) ECN의 적용에 따른 전송율



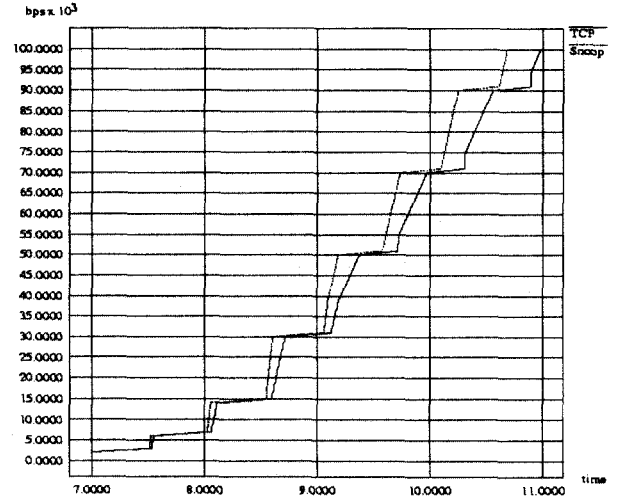
(a) 무선 I-TCP망



(b) 무선 M-TCP망

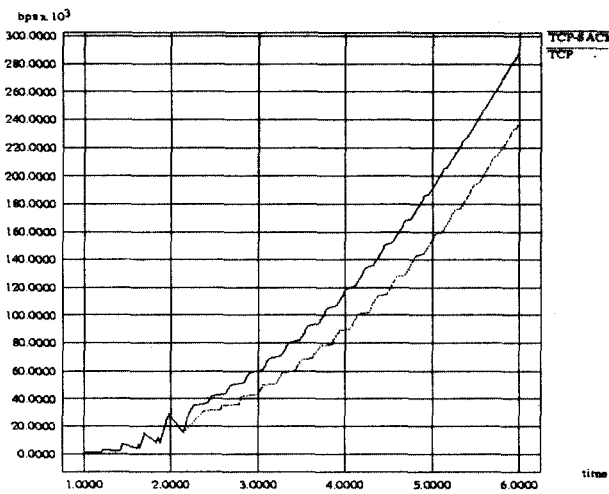


(c) 위성통신 대칭망

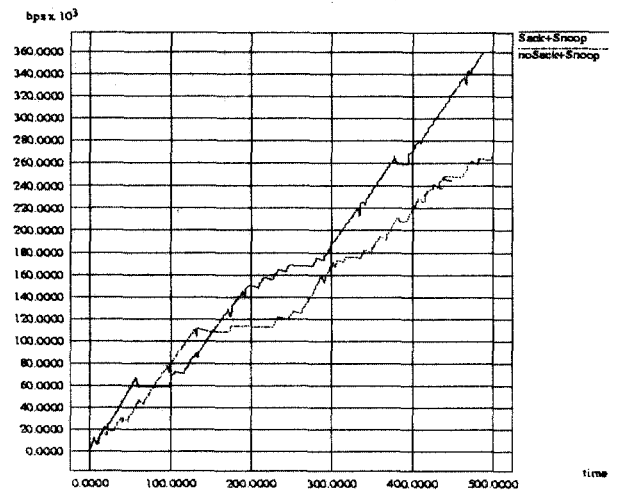


(d) 위성통신 비대칭망

(그림 14) Snoop 적용에 따른 전송율



(a) 유선통신망



(b) 무선 I-TCP망

(그림 15) SACK의 적용에 따른 전송율

(그림 14)는 무선통신과 위성통신 환경에서의 Snoop 모듈 적용에 따른 전송율을 보여준다. 무선 I-TCP망에서 Snoop을 적용한 경우에 180초 경과 시점에 약 300 Kbps정도의 전송율이 향상되었고 무선 M-TCP망에서는 약 2Mbps 정도의 전송율이 향상되었다. 위성통신 환경에서 대칭망과 비대칭망의 차이는 거의 없으며 Snoop에 적용에 따라 전송율이 약 10Kbps 정도 향상되었다.

4.2.6 SACK(Selective ACK)에 따른 성능 측정

(그림 15(a))는 유선통신망에서 TCP Reno와 SACK을 적용한 경우이며 SACK을 적용한 경우에 약 30 Kbps정도의 전송율 향상을 보이고 있다. (그림 15(b))는 무선통신망에서 일반 Snoop과 Snoop에 SACK을 적용한 경우에 대한 성능 측정 결과이며 SACK을 적용한 경우에 40~50 Kbps정도의 전송율 향상을 보이고 있다.

5. 결 론

현재 모든 통신망은 인터넷을 백본으로 하는 ALL-IP 망으로 진화되고 있다. 따라서 이들 통신망에 보다 향상된 인터넷 서비스를 제공하기 위해서는 데이터 전송 기능을 수행하는 TCP가 확장되거나 수정되어야 하며 많은 연구들이 개별적으로 진행되어 왔다. 따라서 IETF에서는 다양한 특성에 맞는 TCP 메커니즘을 제정할 필요성이 제기되었고 IETF PILC WG은 지금까지 연구된 향상된 TCP 메커니즘 중에서 각 링크 특성에 맞는 기능을 선택하여 이를 표준으로 제안할 예정이다. 그러나 IETF PILC WG이 선택한 TCP 메커니즘을 정당화하기 위해서는 이를 분석할 필요성이 있었다. 본 논문에서는 IETF PILC WG이 선택한 이들 메커니즘을 분석하였고, 다양한 통신 링크 환경을 고려하여 성능을 측정하였다. 본 논문에서는 기본적인 성능만을 분석하였으므로 향후 모든 TCP 메커니즘이 새로운 통신 환경에 어떤 영향을 미치는가를 분석할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793, 1981.
 [2] IETF PILC WG 홈페이지, <http://www.ietf.org/html.charters/plic-charter.html>.
 [3] W. Stevens, "TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery Algorithms," RFC 2001, Jan. 1997.
 [4] M. Allman and et. al, "Ongoing TCP Research Related to Satellite," RFC 2760, Feb. 2000.
 [5] M. Allman, D. R. Glover, and L. A. Sanchez, "Enhancing TCP Over Satellite Channels," RFC 2488, Jan. 1999.
 [6] K. Ramakrishnan and S. Floyd, "A Proposal to add Explicit

Congestion Notification(ECN) to IPv6 and to TCP," Internet-Draft draft-kksjf-ecn-01.txt, July, 1998.
 [7] S. Floyd and M. Allman, and C. Partridge. "Increasing TCP's Initial Window," Interner-Draft, draft-floyd-incr-init-win-03.txt, May, 1997.
 [8] Poduri, et. al. "Simulation Studies of Increased Initial TCP Window Size," Internet-Draft draft-ietf-tcpimpl-poduri-00.txt, February, 1998.
 [9] S. Dawkins, G. Montenegro, M. Kojo, and V. Magret, "End-to-End Performance Implications of Slow Links," draft-ietf-pilc-slow-06.txt, May, 2001.
 [10] S. Dawkins, G. Montenegro, M. Kojo, V. Magret, and N. Vaidya, "End-to-End Performance Implications of Links with Error," draft-ietf-pilc-error-07.txt, May, 2001.
 [11] J. Border, M. Kojo, J. Griner, and G. Montenegro, "Performance Enhancing Proxies," draft-ietf-pilc-pep-07.txt, May, 2001.
 [12] H. Inamura and et. al, "TCP over 2.5G and 3G Wireless Networks," draft-ietf-pilc-2.5g3g-01.txt, May, 2001.
 [13] H. Balakrishnan and V. N. Padmanabhan, "TCP Performance Implications of Network Asymmetry," draft-ietf-pilc-asym-04.txt, May, 2001.
 [14] P. Karn, A. Falk, and J. Touch, "Advice for Internet Subnet Designers," draft-ietf-pilc-link-design-05.txt," Feb. 2001.
 [15] G. Fairhurst and L. Wood, "Link ARQ Issues for IP Traffic," draft-ietf-pilc-link-arq-issues-01.txt, March, 2001.
 [16] Network Simulator Version 2(NS-2), <http://www-mach.CS.Berkeley.edu/ns/>.
 [17] Wireless Application Protocol Forum, <http://www.wapforum.org/>.
 [18] Wireless Data Forum, CDPD System Specification, Release 1.1, 1995.
 [19] M. Rahnema, "Overview of the GSM system and protocol architecture," IEEE Communications Magazine, Vol.31, pp. 92-100, April, 1993.
 [20] BARWAN Project, <http://http.cs.berkeley.edu>.
 [21] B. Braden and et. al, "Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet, RFC 2309, April, 1998.
 [22] A. DeSimone et al., "Throughput performance of trasport-layer protocols over wireless LANs," in Proc. IEEE GLOBE-COM '93, pp.542-549, 1993.
 [23] M. Mehta and N. Vaidya, "Delayed Duplicate-Acknowledgments : A Proposal to Improve Performance of TCP on Wireless Links," Technical Report 98-006, February, 1998.
 [24] B. Bakshi, N. Krishna, N. Vaidya, and D. K. Pradhan, "Improving Performance of TCP over Wireless Networks," Technical Report 96-014, Texas A&M University, 1996.
 [25] H. Balakrishnan, S. Seshan, E. Amir, and R. Katz, "Improving

- TCP/IP Performance over Wireless Networks," Proc. 1st ACM Conf. on Mobile Computing and Networking(Mobicom), Berkeley, CA, November, 1995.
- [26] M. Mehta, and N. Vaidya, "Delayed Duplicate-Acknowledgements : A Proposal to Improve Performance of TCP on Wireless Links," Texas A&M University, Available at <http://www.cs.tamu.edu/faculty/vaidya/mobile.html>, December, 1997.
- [27] A. Bakre and B. R. Badrinath. "I-TCP : Indirect TCP for Mobile Hosts. In Proceeding of the 15th International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS), May, 1995.
- [28] I. Rhee, N. Balaguru, and G. N. Rouskas, "MTCP : Scalable TCP-like Congestion Control for Reliable Multicast, NCSU, TR-98-01, Jan. 1998.
- [29] M. Allman. "Improving TCP Performance Over Satellite Channels," Master's thesis, Ohio University, June, 1997.
- [30] V. Arara and et. al, "Asymmetric Internet Access Over Satellite-Terrestrial Networks," Proceedings of the AIAA : 16th International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit, Part1, pp.476-482, Washington, D.C, February, 1996.
- [31] C. Hayes. "Analyzing the Performance of New TCP Extensions Over Satellite Links," Master's Thesis, Ohio University, August, 1997.
- [32] P. J. Brown, "IP-Over-Satellite : A Global Solution Now," <http://www.satellitetoday.com/viaonline/backissues/1998/1098ip.htm>.
- [33] International Internet Satellite/cable Project, <http://www.tagish.co.uk/ethosub/lit8/c53a.htm>.
- [34] T. Henderson, "Satellite Transport Protocol," <http://www.cs.ucberkeley.edu/~tomh/stp/>.
- [35] 한국전자통신연구원, 고속 위성통신망에서의 트래픽 처리 연구, 1998.
- [36] 김용신의 3인, "비대칭 대역폭 위성망에서의 단말국 ACK 필터링 및 패킷 스케줄링 기법", 한국통신학회 추계종합학술발표회, 1997.
- [37] 김상미의 1인, "위성통신망에서 고성능 TCP 성능 분석", 안양대학교 자연과학연구, 2000.
- [38] R. Jain, The Art of Computer Systems Performance Analysis, John Wiley and Sons, 1991.
- [39] R. Braden, "T/TCP-TCP Extensions for Transactions Functional Specification," RFC 1644, July, 1994.
- [40] S. Floyd, "TCP and Explicit Congestion Notification," ACM Computer Communication Review, Vol.24, No.5, October, 1994.
- [41] E.Amir et al. "Efficient TCP over networks with wireless links," in Proc. HotOS-V, May, 1995.
- [42] S. Floyd, "Issues of TCP with SACK," Technical report, Mar. 1996.
- [43] C. Patridge, "Ack Spacing for High Delay-Bandwidth Paths with Insufficient Buffering," Internet Draft, draft-patridge-e2e-ackspacing-00.txt, July, 1997.
- [44] K. brown and S. Singh, "M-TCP : TCP for Mobile Cellular Networks," ACM Computer Communication Review, 27(5), 1997.
- [45] M. Degermark, B. Nordgren and S. Pink, "IP Header Compression," RFC 2507, Feb. 1997.
- [46] S. Casner and V. Jacobson, "Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links," RFC 2508, Feb. 1999.
- [47] M. Engan, S. Casner and C. Bormann, "IP Header Compression over PPP," RFC 2509, Feb. 1999.
- [48] J. Touch, "TCP Control Block Interdependence," RFC 2140, April, 1997.
- [49] M. Allman, C. Hayes, and S. Ostermann. "An Evaluation of TCP with Larger Initial Windows," ACM Computer Communication Review, 28(3), July, 1998.

김 상 미

e-mail : smkim@peacesoft.anyang.ac.kr
 2002년 안양대학교 정보통신공학과(학사)
 2002년~현재 안양대학교 정보통신공학과 석사과정
 관심분야 : 고성능 TCP, VoIP

최 선 완

e-mail : sunchoi@aycc.anyang.ac.kr
 1984년 홍익대학교 전자계산학과(학사)
 1986년 한국과학기술원 전산학(석사)
 1996년 한국과학기술원 전산학(박사)
 1986년~1996년 한국전자통신연구원 선임 연구원
 1996년~현재 안양대학교 정보통신공학과 조교수
 2000년~현재 VoIP Forum 운영위원
 2001년 정보통신부지정 IETF VoIP 분야 표준전문가
 관심분야 : VoIP, 인터넷 실시간 프로토콜

한 선 영

e-mail : syhan@cclab.konkuk.ac.kr
 1977년 서울대학교 전산학과(학사)
 1979년 한국과학기술원 전산학(석사)
 1988년 한국과학기술원 전산학(박사)
 1981년~현재 건국대학교 전산학과 교수
 관심분야 : 인터넷 프로토콜, 네트워크 멀티미디어