

# TCP-MT네트워크에서 다중 시간 간격을 이용한 혼잡제어 성능 개선에 관한 연구

조현섭<sup>1\*</sup>, 오명관<sup>2</sup>

## A Study on the Performance Improvements of Congestion Control of Multiple Time Scale Under in TCP-MT network

Hyun-Seob Cho<sup>1\*</sup> and Myoung-Kwan Oh<sup>2</sup>

**요약** 자기유사성(self-similarity) TCP 네트워크에서 양방향 트래픽 경로를 통해 동일한 종단 노드 쌍 사이에 전송하는 무선네트워크에서 TCP 성능을 높이는 것이 중요하다. 컴퓨터 네트워크에서 전송제어 프로토콜 상에서 다중시간 간격으로 혼잡제어의 지연을 피드백 루프의 시간간격을 조정하여 명시적 예측을 실행해 제어의 단점을 개선에 관하여 연구한다. 먼저 TCP의 모듈 형 확장에서 Tahoe, Reno, Vegas등 다양한 버전의 TCP에 적용되는 간단한 인터페이스를 통한 함수 호출을 정의하고, 이것이 성능을 크게 향상시키는 것을 입증한다. 두 번째로, 광대역 WAN에서 지연-대역폭의 곱이 높을 경우 더욱 심각해지는 사후 제어의 불확실성 차이를 해소함으로써 MTS TCP가 기반 피드백 제어에 사전성을 부여한다는 것을 입증한다. 세 번째는 트래픽 제어의 3가지 차원인, 즉 추적 능력, 연결 지속 기간, 공정성이 성능에 미치는 영향 등을 비교 분석하여 개선됨을 입증한다.

**Abstract** Measurement of network traffic have shown that the self-similarity is a ubiquitous phenomenon spanning across diverse network environments. In previous work, we have explored the feasibility of exploiting the long-range correlation structure in a self-similar traffic for the congestion control. We have advanced the framework of the multiple time scale congestion control and showed its effectiveness at enhancing performance for the rate-based feedback control. Our contribution is threefold. First, we define a modular extension of the TCP-a function called with a simple interface-that applies to various flavours of the TCP-e.g., Tahoe, Reno, Vegas and show that it significantly improves performance. Second, we show that a multiple time scale TCP endows the underlying feedback control with proactivity by bridging the uncertainty gap associated with reactive controls which is exacerbated by the high delay-bandwidth product in broadband wide area networks. Third, we investigate the influence of the three traffic control dimensions-tracking ability, connection duration, and fairness-on performance.

**Key Words** : TCP, ATM, MTS, 트래픽 혼잡제어, 컴퓨터네트워크

### 1. 서론

컴퓨터 네트워크에서 사용되는 메시지 교환에 관한 규칙을 정의 하는 프로토콜들의 모음을 의미하는 전송제어 프로토콜(TCP: Transmission Control Protocol) 트랜스포트 계층 프로토콜에서 가장 광범위하게 사용되어 왔다. TCP의 가장 중요한 성분은 혼합 제어와 복구를 수행하기

위해 사용된 알고리즘으로서 지속적으로 확장[1,2] 연구되어 왔다.

본 논문에서는 양방향 트래픽을 네트워크 경로를 통해 동일한 종단 노드 쌍 사이의 반대 방향에서 데이터를 전송하는 두 개 또는 그 이상의 TCP 연결로부터 생긴 트래픽 패턴을 사용하고 네트워크의 교환기와 라우터들을 공유하므로 승인의 결과를 초래한다. Per-flow 입출력 반응을 사용하여 LTS 상관 구조를 온라인으로 평가할 때 이는 중요한 요인이 된다. TCP-MT는 연결 지속 기간이 길 때 가장 큰 성능 이득을 제공한다. TCP-MT의 대역폭 공유 반응이 TCP의 반응과 유사하고, 잘 알려진 TCP의 공

<sup>1</sup>청운대학교 디지털방송공학과

<sup>2</sup>대전대학 디지털서비스과

\*교신저자: 조현섭(chohs@chungwoon.ac.kr)

정성 속성에는 긍정적, 부정적 영향을 전혀 미치지 않는다는 것을 입증한다.

## 2. TCP에서 다중 시간 간격 제어

### 2.1 MTS 혼잡제어

MTS 혼잡제어의 프레임워크는  $n \geq 1$ 에 대해서  $n$ -레벨 시간 혼잡제어를 허용하며,  $n$  분리된 시간 규모에서 추출된 정보들은 가장 낮은 시간 규모, 즉  $n=1$ 에서 피드백 혼잡제어의 출력 반응을 조절한다. 성능을 개선에서  $n > 1$ 보다 크다 해도 LTS 모듈이 비활성 화되면, 혼잡제어는 원래의 피드백 혼잡 제어 수준으로 떨어지게 된다. 그림 2-1과 같이 피드백 혼잡제어에서 트래픽 제어 반응을 조절하는 데 LTS 상관 구조를 두 가지로 구분하여 적용시킨다. 첫 번째 방법은 선택적 기울기제어(SSC; selective slope control)로서, 그림2-1과 같이 예측된 LTS 네트워크 상태를 선행 증가/지수 감소 혼잡제어의 단계에서 선행 증가 곡선의 기울기를 조정하는 것이다. 만약 네트워크 경쟁이 낮은 편이라면 기울기가 증가하고, 네트워크 경쟁이 높으면 반대가 된다. SSC는 지속적인 네트워크 상태를 통해 기울기를 변경함으로써, 불안정성을 유발하지 않고서도 피드백 혼잡제어의 대역폭을 점유하는 적극적인 동작을 조절할 수 있고, RTT 나 피드백 루프를 차수 크기 이상으로 초과하는 LTS에서도 기울기는 안정적으로 유지된다.

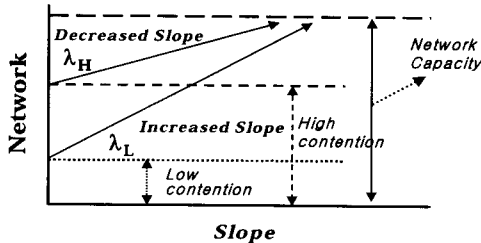


그림 2-1. 고 경쟁 및 저 경쟁의 선행증가에서의 선택적 기울기 조정

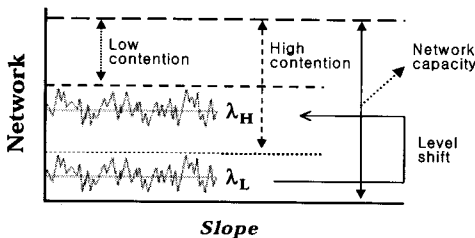


그림 2-2. 고경합 및 저경합간의 선택적 'DC' 레벨조정

피드백 트래픽 제어에서 LTS 상관 구조를 활용하는 선택적 레벨 제어(SLC; selective level control)방법으로서 LTS 네트워크 상태 함수 형태로 출력 전송율을 부가적으로 조정한다. 즉 네트워크 경쟁이 낮은 편이면 'DC' 레벨을 높이고, 경쟁이 높아지면 그 반대로 한다. 그림 2-2와 같이 SLC는 혼잡 제어를 위한 방식으로 재전송이 불가능할 때 적용 패킷 레벨의 순방향 오류 정정이 적용된다. 실시간 멀티미디어 트래픽 제어에서 MPEG1 프레임의 도착 및 디코딩을 지원하기 위한 SLC를 사용한다.

### 2.1 TCP 피드백 제어

메타컨트롤에서 나타나는 최대 적응성 매개변수  $A$ 는 고정된 순위 값으로 설정되며 보통 네트워크 상태의 함수로서 동적으로 조정된다. 정적인 네트워크 환경에서는  $A$ 가 잘 정의되며, 정적과 비슷한 조건에서  $A^*$ 로 수렴하는 대칭적 제어 규칙은 식 (2.1)과 같다.

$$\frac{dA}{dt} = \begin{cases} \nu, & d\gamma_\ell/dA_\ell > 0, \ell \in [1, h] \\ -\nu, & d\gamma_\ell/dA_\ell < 0, \ell \in [1, h] \end{cases} \quad (2.1)$$

식 (2.1)에서  $\nu > 0$ 은 조정 인수이다. 제어 동작은 현재 측정된 경쟁 레벨  $L_1 = \ell \in [1, h]$ 의 조건에 부합되며,  $d\gamma_\ell/dA_\ell$ 은 동일한 레벨  $\ell, \ell \in [1, h]$ 로 분류되는 최근 시간 블록에서 계산할 수 있다. 네트워크 시스템이 단일모드 로드-처리를 곡선을 갖는다는 차원에서 혼잡에 민감한 경우, 안정성을 보장하기 위해서는 비대칭성이 필요하다. 그렇지 않은 경우 충분히  $\nu > 0$ 을 작게 함으로서 점차적으로 안정성을 실현하는 데 충분하다. SSC의 메타컨트롤을 관리하는 제어 규칙과 TCP 피드백 제어가 결합한 멀티레벨 피드백 제어 시스템이 안정 상태를 유지하는 이유는  $T_L$ 과  $T_S$ 간에 큰 시차가 존재하기 때문이다. TCP 혼잡제어가 활성화되는 동안  $A$ 는 시간  $T_L$ 의 간격에 대해 일정한 값을 유지함으로써 선행 증가/지수 감소 제어 및  $T_S \ll T_L$ 의 안정성에 의해 각  $T_L$  간격마다 안정성이 유지된다. 기울기 레벨 매개변수  $A$ 는 시작할 때 기본적으로  $A(0) = a$ 로 설정된다.  $A$ 는 항상 양수 값을 가지며  $a$ 보다 크므로  $A$ 는 시간이 지나면서 증가하므로  $[a, A]$  범위의 값을 갖는 역 선행 스케줄에 따라 개별적인 적응성 레벨이 설정된다.

### 2.3 TCP에서 버전과 SSC 결합

본 절에서는 다양한 TCP 버전, 즉 Tahoe, Reno, Vegas, TCP Rate라고 부르는 전송율 기반 확장에 SSC

를 결합하는 다양한 형태를 고려하며, 또한 광범위하게 적용하기 위해 ATM 전송 율 기반 혼잡제어에 결합을 보였다. 그림 2-3, 2-4, 2-5, 2-6은 TCP 각 버전에 대한 패킷의 흐름 및 UDP에 따른 대역폭의 변화를 실험에 의해 나타내었다. TCP Reno와 MTS 결합은 서로 다른 2가지 형태, 즉 혼잡 회피 구성 요소와 Slow-Start 구성 요소로 이루어지며, Slow-Start가 추가적인 최적화로 사용된다. 간단한 확장을 통해 이러한 동일한 결합을 TCP Tahoe에서도 적용될 수 있다.

혼잡회피는 TCP Reno의 단계에서는 적극성 상수  $a$ 를 혼잡 윈도우 변경의 기울기라고 하면 즉  $a=1$ 일 때  $cwnd \leftarrow cwnd + (a/cwnd)$ 로 된다. 이러한 결합은  $a$ 를  $\epsilon(\hat{L}_2)$ 으로 대체하고 선형 증가 단계의 기울기에 영향을 미침으로써 전반적인 네트워크 상태에 도움이 된다. Slow-Start : 타임아웃이 발생할 때마다 윈도우 크기  $cwnd$ 와 현재의 트래픽 레벨  $L_1$ 은  $cwnd = cwnd(L_1)$ 이 된다. 또 Slow-Start 임계값을  $ssthresh \leftarrow cwnd(\hat{L}_2)$ 로 설정하며  $cwnd$ 을 위해 예상 트래픽 레벨  $\hat{L}_2$ 가 인덱스 역할을 한다. Reno의 Fast Recovery 메커니즘에 의해 결합을 구현함으로써 Tahoe와 달리 보다 강력한 최적화가 가능했다.

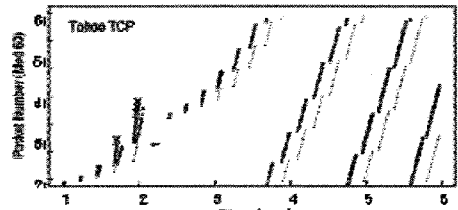
### 2.4 TCP Vegas, TCP Rate

TCP Vegas는 사전에 지정된 목표 한계  $\alpha < Diff < \beta$ 에서 실제 전송 율과 예상 전송 율 간에 측정된 차이 Diff를 유지하면서 네트워크에 추가적인 데이터를 유지하려고 한다. 여기에는 타임아웃 및 재전송을 줄임으로써 보다 지속적인 흐름을 보장하는 사전 준비성의 측정도 포함된다. TCP Vegas와의 결합은 수정된 혼잡 회피 메커니즘을 통해 구현되며  $Diff < \alpha$ 일 때 선형 증가 기울기를 조절한다. 따라서 이벤트 트리거의 경우를 제외하고는 결합 형태는 Reno 및 Tahoe와 동일하다. TCP Rate는 TCP Reno를 전송 율 기반을 확장한 것으로 표 1에서와 같이 지연 변이를 기준으로 Reno의 혼잡 회피 절차를 수정한다.

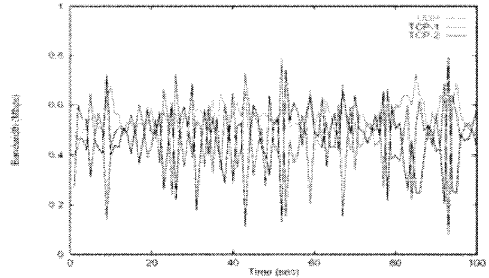
Table. 1 Multiple TCP-MT connections

SSC	n=2	n=6	n=10	n=14	n=18
Total Thr.	1621.1	1761.0	1691.0	1535.8	1253.0
Avg. Thr.	810.5	293.0	168.2	107.7	68.3
Max. Thr.	811.8	301.3	177.4	191.2	77.5
Min. Thr.	808.7	285.7	153.3	92.3	53.8

제어 규칙에서  $0 < a < b$ 이고  $\Delta RTT$ 는 연속된 두 RTT 값의 차이를 나타내며  $\tau$ 은 해당 ACK 패킷의 패킷 간격을 나타낸다. 결합은 증가 부분의 상수  $a$ 를  $\epsilon(\hat{L}_2)$ 로 대체하고 네트워크 상태 측면에서 기반 피드백 혼잡제어의 추적 능력이 뛰어날수록 SSC 결합으로 얻는 성능상의 이점이 커진다.

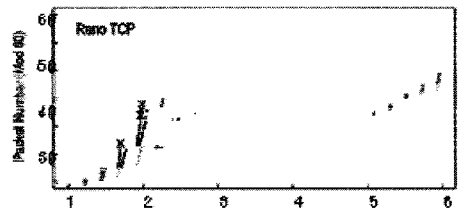


(a) TCP Tahoe 곡선

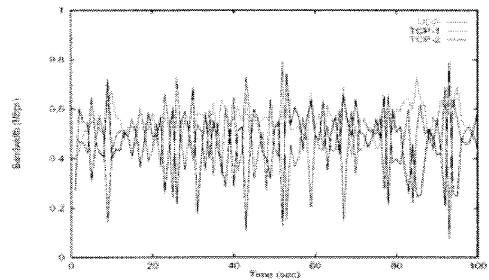


(b) TCPUDP-Tahoe 대역폭

그림 2-3. TCP Tahoe 곡선과 TCPUDP-Tahoe의 대역폭

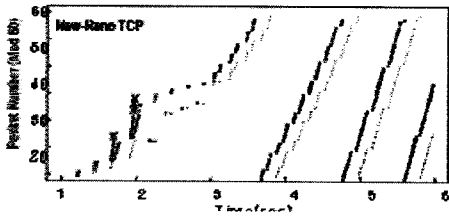


(a) TCP Reno 곡선

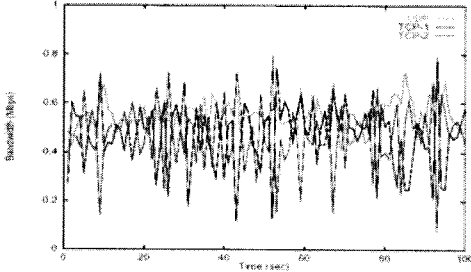


(b) TCPUDP-Reno 대역폭

그림 2-4. TCP Reno 곡선과 TCPUDP-Reno의 대역폭

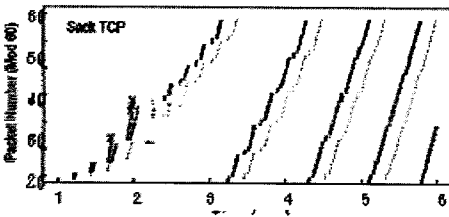


(a) TCP New-Reno 곡선

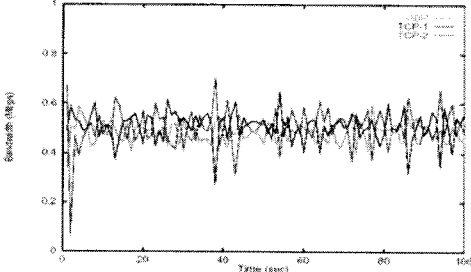


(b) TCPUDP-NewReno 대역폭

그림 2-5. TCP New-Reno 곡선과 DP-NewReno의 대역폭



(a) TCP Sack 곡선



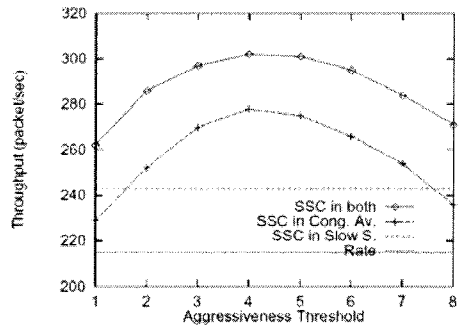
(b) TCPUDP-Sack 대역폭

그림 2-6. TCP Sack 곡선과 TCPUDP-Sack의 대역폭

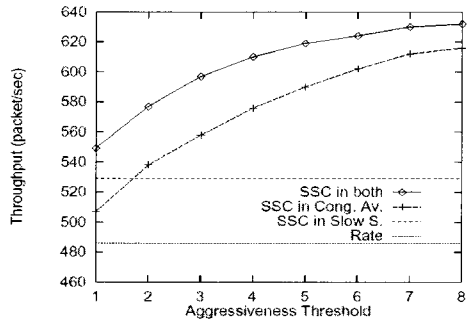
### 3. 시뮬레이션 결과 및 분석

네트워크 구성이 단일 모드 처리율 곡선을 지향하면 최고 처리율을 찾는 작업은 더 복잡하다. 즉 적극성을 무조건 적용하지도 배제하지도 않는 것이 최상의 방법으로서 네트워크 구성이 하나의 정적 처리율 상태에서 다른 상태로 전이하는 비정적인 상황에서도 SSC의 적응성은

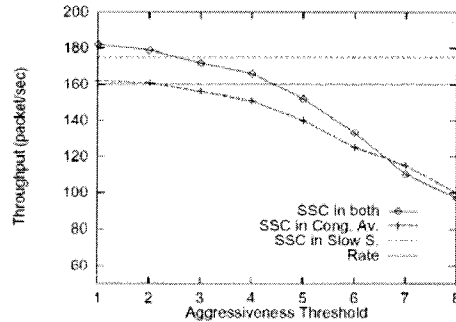
도움이 된다. 그림 3-1은 TCP Rate 백그라운드 트래픽 5Mbps, 2.5Mbps, 7.5Mbps의 처리율 대비 적극성 임계값 함수 형태의 처리율 곡선을 나타낸 것으로서 TCP Reno가 TCP Rate로 바뀐 것만이 다를 뿐이다. 처리율 곡선의 굴곡 뿐 아니라 성능까지 증가하는데 이는 부분적으로 TCP Rate의 우수한 추적 능력 때문이다. 이 추적 능력은 SSC로 하여금 LTS 상관 구조를 보다 효과적으로 추출할 수 있게 하며, 그림 3-1은 SSC를 Slow-Start, 혼잡 회피, 그리고 Slow-Start와 혼잡 회피 두 단계 모두에 적용한 경우에 대한 한계 효과를 나타낸다.



(a) TCP Rate 백그라운드 트래픽 5Mbps의 처리율



(b) TCP Rate 백그라운드 트래픽 2.5Mbps의 처리율



(c) TCP Rate 백그라운드 트래픽 7.5Mbps의 처리율

그림 3-1. TCP Rate. 3가지 레벨의 백그라운드

트래픽 5Mbps(a), 2.5Mbps(b), 7.5Mbps(c)의 적극성 임계값 함수 형태의 처리율 곡선

### 3.1 추적 능력

기반 피드백 혼잡제어의 추적 능력은 무시할 수 없는 영향을 성능에 미칠 수 있으며, SSC의 효과에도 영향을 미친다. 피드백 혼잡제어가 네트워크 상태 추적을 잘 할수록 LTS 상관 구조가 더 정확해지고 보다 효과적인 제어 활동이 수행된다. TCP에 대한 TCP-MT의 이러한 종속성은 TCP의 접속 단위마다 출력 반응을 사용하여 LTS의 네트워크 경쟁을 측정하는 SSC 때문이다. 오버헤드 관점에서 보면 네트워크에 검증 패킷을 전송하여 상태를 측정하거나 그렇지 않으면 네트워크 협력을 가정하는 별도의 상태를 측정하는 모듈을 만드는 것보다 이 방법이 더 효율적이다. 본 논문에서는 TCP Reno, Vegas, Rate의 추적 능력을 측정하여 병목 링크 G1, G2에서 집합 백그라운드 트래픽의 신뢰 처리율의 상관 계수를 각각 계산한다. 효과적인 추적이 이루어질 경우에 가용 대역폭이 높아짐으로서 백그라운드 트래픽 레벨이 낮을 경우 신뢰 처리율은 높아지고 그 반대의 경우는 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 완벽한 추적이 수행되는 경우 상관 계수는 -1로 계산되므로 Reno, Vegas, Rate의 계수 값은 그림 3-2와 같다. TCP Rate가 가장 우수한 추적 능력을 보이고 있으며, 그 다음으로 Vegas, Reno 순이다. Reno의 추적 능력 감소는 가용 대역폭의 빠르고 정확한 식별이 방해받는 Reno의 선형 증가 단계를 감안하기 때문이다. 시뮬레이션 결과로부터 얻을 수 있는 또 다른 특징은 왕복시간이 증가하는 경우에 추적 기능은 감소한다는 것으로서 사후 제어의 특징인 피드백 정보의 노후성 때문이다.

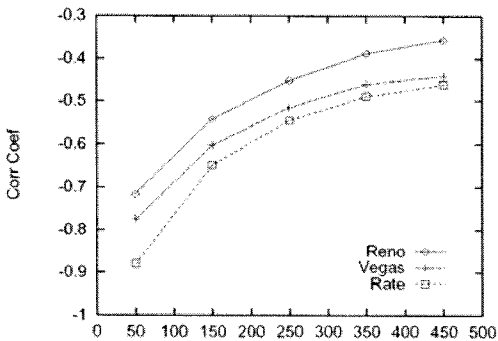


그림 3-2. TCP Reno, Vegas, Rate의 상관 계수 관점에서의 추적 능력

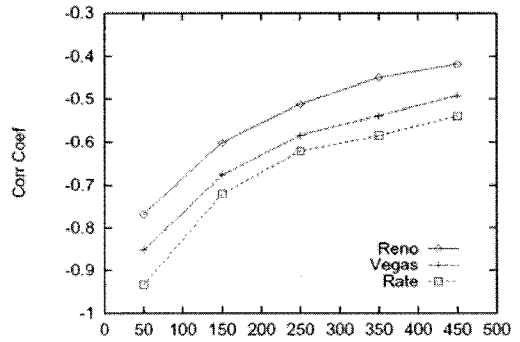


그림 3-3. TCP Reno, Vegas, Rate에 SSC가 적용된 경우 추적 능력이 향상되는 시너지 효과

그림 3-3은 동일한 설정에서 SSC가 TCP Reno, Vegas, Rate와 각각 결합된 경우의 상관 계수를 나타내고 있으며, 모든 곡선이 -1을 향하고 있음을 알 수 있다. 이것은 조치의 시기적절성이 개선되어 TCP-MT가 TCP보다 추적 능력이 향상되는 결합의 시너지 효과를 나타낸다.

## 5. 결론

다중 시간간격 TCP의 가장 중요한 속성은 피드백 루프와 관련된 왕복시간이 늘어나면 피드백이 전달하는 상태 정보가 노후 됨으로서 TCP가 취한 사후 혼잡 제어 조치의 효과가 떨어지는데 이와 같은 현상은 지연-대역폭의 굵이나 지연 또는 대역폭과 비례하여 증가되었다. 선택적 기율기 제어의 적극성 스케줄을 연결 지속 시간 및 개방 루프와 폐쇄 루프에 적용한 결과 선택적 기율기 제어가 연결 지속 시간이 늘어남에 따라 성능 이득도 향상되었다. 이러한 결과로부터 정확한 지속 기간 및 priori 정보의 유무에 따라 짧은 연결에서도 성능 이득을 향상시킬 수 있음을 입증하였고, SSC 내에서 최대 기율기 레벨 A를 동적으로 조정하는 메타컨트롤의 역할로서 최대 적극성의 정적 설정 및 동적 설정에 따른 처리율 성능이 A = 6일 경우에 최적의 정적 최대 적극성 값을 가지고 있었다. 대기 시간 연결, 패킷 크기, 윈도우 크기와 관련하여 선택적 기율기 제어도 TCP와 마찬가지로 동일한 공정성 문제에 있어서 TCP-MT 연결의 개수가 증가하더라도 대역폭은 최대-최소 측면에서 공정하게 공유되었으며, 각 처리율의 분포는 좁은 범위 내에서 유지되고 TCP-MT 연결 개수가 늘어남에 따라 개별 공유 폭은 줄어들고 동시에 피드백 혼잡제어 연결의 수가 증가하면서 전체적으로 성능향상이 되었다.

### 참고문헌

[1] N. Poojary, S. V. Krishnamurthy, and S. Dao. Medium Access Control in a Network of Ad Hoc Mobile Nodes with Heterogeneous Power Capabilities. In IEEE International Conference on Communications (ICC 2001), Vol. 3, pp. 872-877, 2001.

[2] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain. Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment. In INFOCOM 2000, Vol. 2, pp. 404-413, March 2000.

[3] C. Lee, J. Jang, E.K. Park, S. Makkic. A simulation study of TCP performance over IEEE 1394 home networks. Computer Communications Vol. 26, pp. 670-678, 2003.

[4] T. Tuan and K. Park. Multiple time scale redundancy for QoS-sensitive transport of real-time traffic. To appear in Proc. IEEE INFOCOM '00, 2000.

[5] K. Park, W. Wang. QoS-sensitive transport of real-time MPEG video using adaptive forward error correction. In Proc. IEEE Multimedia Systems '99, pp. 426-432, 1999.

[6] K. Park and W. Willinger, editors. Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation. To be published by Wiley Interscience, 1999

### 오 명 관(Myoung-Kwan Oh)

[정회원]



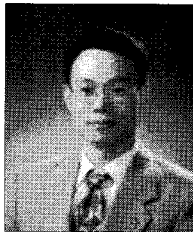
- 1990년 2월 : 충북대학교 컴퓨터 공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 충북대학교 컴퓨터 공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 충북대학교 컴퓨터 공학과 (공학박사)
- 1994년 9월 ~ 1999년 2월 : 고려정보테크(주) 선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 혜전대학 디지털서비스과 부교수

<관심분야>

패턴인식, 영상처리, 컴퓨터비전 등

### 조 현 섭(Hyun-Seob Cho)

[종신회원]



- 1990.2 원광대학교 공과대학 전기공학과 졸업
- 1992.2 원광대학교 공과대학 전기공학과(석사)
- 1996.2 원광대학교 공과대학 전기공학과(박사)
- 1996.1 ~ 1997.6 Department of Electrical and Computer Engineering, University of California Irvine(UCI) 연구원
- 1998.1 ~ 현재 한국전력기술인협회 고급감리원(전력감리)
- 1998.10 ~ 현재 중소기업청 기술경쟁력 평가위원
- 1997.3 ~ 현재 청운대학교 부교수

<관심분야>

전기공학, 공장자동화, 응용전자