

논문 2006-43IE-3-7

인터넷 혼잡 예방을 위한 입력율 예측 기반 동적 큐 관리 기법

(An Active Queue Management Method Based on the Input Traffic Rate Prediction for Internet Congestion Avoidance)

박재성*, 윤현구**

(Jaesung Park and Hyun-Goo Yoon)

요약

본 논문에서는 인터넷 트래픽 입력율의 예측성을 이용하여 큰 시간 스케일 (large time scale)에서 트래픽 입력율 예측을 통한 새로운 동적 큐 관리 기법 (Active Queue Management (AQM))을 제안한다. RED를 비롯한 대부분의 기존 AQM 기법들은 큐 길이를 기반으로 망의 혼잡 정도를 판단하여 패킷 폐기 확률을 설정하고 이에 따라 입력 패킷을 폐기하므로 동적으로 변화하는 망 환경에 제어 인자들이 적절히 적응하지 못하거나 적응시간이 긴 단점을 가진다. 제안 기법은 패킷 측정을 통해 얻은 입력율 정보를 자기 회기 (Auto-Regressive (AR)) 시 계열 모델에 적용하여 향후 트래픽 입력율을 예측하고, 이를 기반으로 향후 망 혼잡 수준을 결정한다. 혼잡이 예측되는 경우 향후 트래픽 입력율이 라우터의 서비스율과 근사하도록 패킷 폐기 확률을 결정함으로써 제안 기법은 패킷 폐기율은 기존 기법과 유사하게 유지하면서 링크 효율을 높이고 평균 큐 길이를 망 환경 변화에 무관하게 안정적으로 유지할 수 있게 해준다. 본 논문에서는 ns-2 시뮬레이터를 이용하여 제안기법과 RED, adaptive RED (ARED), REM, Predictive AQM (PAQM)과의 성능 비교를 통해 다양하게 변화하는 망 환경에서 제안기법의 성능이 평균 큐 길이와 망 적응성 측면에서 우수하다는 사실을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a new active queue management (AQM) scheme by utilizing the predictability of the Internet traffic. The proposed scheme predicts future traffic input rate by using the auto-regressive (AR) time series model and determines the future congestion level by comparing the predicted input rate with the service rate. If the congestion is expected, the packet drop probability is dynamically adjusted to avoid the anticipated congestion level. Unlike the previous AQM schemes which use the queue length variation as the congestion measure, the proposed scheme uses the variation of the traffic input rate as the congestion measure. By predicting the network congestion level, the proposed scheme can adapt more rapidly to the changing network condition and stabilize the average queue length and its variation even if the traffic input level varies widely. Through ns-2 simulation study in varying network environments, we compare the performance among RED, Adaptive RED (ARED), REM, Predicted AQM (PAQM) and the proposed scheme in terms of average queue length and packet drop rate, and show that the proposed scheme is more adaptive to the varying network conditions and has shorter response time.

Keywords: 동적 큐 관리 기법, 망 혼잡 제어, 트래픽 자기 유사성.

I. 서론

인터넷 트래픽은 자기 유사성 특성으로 인해 시간 스

케일에 무관하게 버스티(bursty)한 특성을 가진다^{[7][8]}. 이로 인하여 트래픽 입력율은 장시간 동안의 높은 입력율을 보인 후 장시간 동안의 낮은 입력율을 가지게 되며 이는 망 자원의 효율적인 제어와 서비스 품질 (Quality of Service) 제공에 어려움을 가져온다. 트래픽 입력율이 시간 스케일에 무관하게 버스티하게 변화하면 높은 입력율을 가지는 구간에서는 라우터 큐(Queue) 길이가 증가하고 최악의 경우 입력 패킷이 손실 되며, 반대로 입력율이 낮은 경우에는 큐잉 지연은 감소하게 된

* 정회원, 수원대학교 IT대학 인터넷 정보공학과
(The University of Suwon, IT College, Department of Internet Information Engineering)

** 정회원, 명지전문대학교 컴퓨터 전자과
(Dept. of Computer & Electronic Eng. Myongji College)

접수일자: 2006년6월7일, 수정완료일: 2006년8월23일

다. 이처럼 큐잉 지연이 제어되지 않고 큰 폭으로 변화하게 되면 지연 시간 및 이의 변이에 민감한 멀티미디어 응용의 서비스 품질은 저하되게 된다.

인터넷 트래픽의 자기 유사성은 이처럼 망 자원의 관리를 어렵게 만들지만 자기 유사성 프로세스가 가지는 상관 관계는 새로운 형태의 보다 효율적인 망 자원 관리 및 혼잡 제어 기법에 사용될 수 있으며, 본 논문에서는 자기 유사성 프로세스의 상관 (Correlation) 관계 특성을 이용하여 인터넷 혼잡을 회피하기 위한 동적 큐 관리 (AQM: Active Queue Management) 기법을 제안한다.

AQM 기법은 특정 혼잡 척도를 이용하여 혼잡 수준을 결정하고 결정된 혼잡 수준에 따라 패킷 폐기 확률을 결정하여 망이 혼잡 상태로 천이하기 전에 입력 패킷을 확률적으로 폐기함으로써 망의 혼잡을 방지하고 라우터의 큐잉 지연을 작게 유지하도록 고안되었다^[4]. 그러나 RED^[1], ARED^[14], REM^[13]과 같은 기존 AQM 기법들은 패킷 폐기 확률 결정시 인터넷 트래픽의 특성을 반영하지 않는다. 또한 기존 AQM 기법들은 매 패킷이 입력 될때마다 패킷 폐기 확률을 결정하며, 망의 상태가 변화한 후에 변화된 망 상태를 반영하도록 제어 인자를 적응시킨다. 따라서 입력 트래픽의 변화 시간보다 적응 시간이 빠른 경우, 기존 기법들은 링크 이용률을 높이고 큐 길이의 변화를 작게 유지할 수 있으나 적응 시간이 트래픽 변화율 보다 느린 경우 기존 AQM 기법들은 망의 현재 상황을 반영하지 못하게 되어 FIFO 큐에서와 같은 문제를 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 AQM 기법은 인터넷 트래픽의 자기 상관 특성으로 인한 입력을 예측성을 이용한다. 인터넷 트래픽 측정 및 분석 연구를 통해 주기적으로 측정된 인터넷 트래픽은 확률적으로 변화가 심하지만 ARIMA (auto-regressive moving average) 모델^[16]이나 AR (auto-regressive) 모델^[17]과 같은 시 계열 함수로 모델링이 가능하며 큰 시간 스케일 (large time scale)에서 다음 구간의 트래픽 입력율은 이전 구간의 트래픽 입력율을 이용하여 예측할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 AQM 기법은 입력을 예측을 통해 미래의 혼잡 수준을 예측하고 예측된 혼잡 수준에 따라 이를 예방할 수 있는 만큼의 패킷 폐기 확률을 결정한다. 다른 AQM 기법들과는 달리 제안 기법은 큰 시간 스케일 (large time scale)에서 트래픽 입력율을 미리 예측하여 혼잡이 발생하기 전에 과도한 트래픽이 발생하지 못하도록 트래픽 소스들을 미리 제어함으로써 동적으

로 급변하는 모든 망 환경에 빠르게 적응하여 평균 큐 길이를 작게 유지하고 전체 링크 효율을 증가시킨다. 제안 기법은 또한 큰 시간 스케일에서 동작하므로 매 패킷 입력마다 제어기가 동작하는 기존 기법들에 비해 구현이 복잡하지 않으며 모델 인자를 얻기 위한 계산량이 작기 때문에 실시간 제어가 가능하고 확장성이 뛰어나다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 기존에 제안된 AQM 기법들을 사용한 혼잡 척도에 따라 비교 분석하고 III장에서는 본 논문에서 제안하는 AQM 기법인 AR 모델을 이용한 트래픽 입력을 예측방법 및 패킷 폐기 확률 결정 방법을 설명한다. IV장에서는 다양한 망 환경에서 ns-2 모의 실험기를 이용하여 제안기법과 기존 기법들과의 성능 비교를 통해 급격한 망 혼잡 수준의 변화에도 제안 기법은 적은 패킷 손실율로 안정적인 큐잉 지연을 제공할 수 있다는 것을 보인 후 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

AQM 기법은 RED를 시작으로 성능 개선 및 기능 추가 측면에서 다양하게 연구되어 왔다. 이들은 망 혼잡을 판별하는 방법과 결정된 혼잡 척도가 패킷 폐기 확률에 반영되는 방법 및 달성하고자 하는 주 목표에 따라 구분할 수 있다.

AQM 기법은 이용되는 망 혼잡 척도에 따라 큐 길이를 이용한 기법과 입력율을 이용하는 기법으로 구분된다. 큐 길이 기반 AQM 기법은 RED를 시작으로 자기 구성 (self-configured) RED^[12], 적응성 (Adaptive) RED (ARED)^[14], SRED^[6]등이 제안되었다. RED는 평균 큐 길이를 기반으로 망의 혼잡 정도를 결정하고 이를 통해 확률적으로 입력 패킷을 폐기시킴으로써 평균 큐잉 지연을 작게 유지하고 동시에 링크 수율 (throughput)을 높이는 것을 목적으로 한다. 패킷 폐기 확률은 평균 큐 길이에 따라 0에서부터 (평균 큐 길이가 RED 파라미터인 최소 버퍼 임계값 \min_{th} 보다 작은 경우) 최대 폐기율 \max_p 까지 (평균 큐 길이가 RED 파라미터 최대 버퍼 임계값 \max_{th} 이상인 경우) 선형적으로 증가한다. 하지만 RED의 평균 큐 길이는 망의 혼잡 수준과 설정된 RED 파라미터 값에 따라 달라진다. 즉, 망의 혼잡 수준이 낮은 경우 큐 길이는 \min_{th} 근처로 유지되고 혼잡 정도가 큰 경우 평균 큐 길이는 \max_{th} 근처로 유지되거나 이보다 커지게 되어 패킷 손

실율이 증가하고 링크 수율이 감소하게 된다. 망 혼잡 수준은 입력 트래픽 양의 시간적인 변동에 따라 동적으로 변화하므로 RED는 자기 유사성 특성을 가진 입력 트래픽에 대하여 원래의 목적을 달성하지 못한다는 단점을 가진다^[5].

자기 구성 RED와 ARED는 RED 파라미터를 망 환경에 동적으로 적응시킴으로써 망 환경 변화에 무관하게 평균 큐 길이를 안정시키는 것을 목표로 한다. ARED의 경우 최대 패킷 폐기 확률을 측정된 큐 길이에 따라 선형적 증가 지수적 감소 방식으로 적응시키고 큐 가중치 (w_q)와 \max_{th} 를 라우터의 최대 버퍼 크기 및 링크 속도에 따라 최적으로 설정해 줌으로써 망의 혼잡 상태와 무관하게 평균 큐 길이를 운영자가 정한 크기 주위에서 변화하게 해 준다. SRED는 평균 큐 길이 안정이 아닌 순시 큐 길이의 안정을 위해 제안되었으며 입력율을 기반으로 혼잡 척도를 결정하는 AVQ^[18] 기법은 가상 큐를 두어서 가상 큐가 오버플로우되는 경우에만 실제 패킷을 폐기한다.

큐 길이와 입력율을 모두 이용하는 방식으로는 REM^[13], PI^[15], 예측 (Predictive) AQM (PAQM)^[11] 기법들이 제안되었다. REM은 큐 길이 및 입력율로 정의되는 가격 함수 (price function)을 이용하여 혼잡 척도와 성능 척도를 구분한다. PI 방식은 TCP 성능 분석 모델을 이용하여 응용 요구사항에 적합한 제어기를 제안하였다. PAQM 기법은 인터넷 트래픽의 자기 유사성 특성을 이용하여 선형 최소 평균 자승 오류 (LMMSE: least minimum mean square error) 기법을 이용한 입력율을 예측기를 고안하고, 예측된 입력율과 원하는 큐 길이와의 비교를 통해 패킷 폐기 확률을 결정한다. 다중화된 입력 트래픽의 버스트 (burst) 특성을 완충시켜 패킷 손실율과 평균 큐 길이 안정이라는 AQM의 기본 목표 달성 이외에 플로우간 자원 사용량의 공정성을 보장하기 위해 플로우별 상태 정보와 큐 길이를 이용하는 FRED^[9], BRED^[10]가 제안되었다.

본 논문에서 제안하는 AQM 기법은 적응성이 있다는 측면에서 ARED와 유사하며, 트래픽 입력율을 혼잡 척도로 이용한다는 점에서 REM과 유사하고, 인터넷 트래픽의 자기 유사성 특성을 이용한다는 측면에서 PAQM과 유사하다. 그러나 ARED 기법은 트래픽 입력율로 인해 변경되는 평균 큐 길이를 혼잡 척도로 이용하고, ARED와 REM은 작은 시간 스케일 (small time scale)에서 동작한다. 따라서 망의 혼잡 수준의 급격한 변화나 플로우의 종단간 지연 특성이 달라지는 경우 위

기법들은 망 환경 변화에 적응하는 시간이 길어진다. 입력 트래픽의 자기 상관 관계를 이용한다는 점에서 제안 기법은 PAQM 기법과 유사하다. PAQM 기법은 LMMSE의 변형인 심플 (simple) 예측기를 사용하며 작은 예측 오류를 얻기 위해 제안 기법보다 많은 모델 인자들 (10-40개)이 필요하다^[11]. 그리고 PAQM은 예측기 모델 인자 계산에 필요한 복잡한 계산량을 줄이기 위해 입력 트래픽의 허스트 계수 (Hurst parameter)를 임의의 값 (0.8)로 고정시켜 사용하고 있다. 또한 PAQM 기법 역시 작은 시간 스케일 (0.02~0.05초)에서 동작하므로 제어기의 적응 시간이 트래픽 변화율 보다 느린 경우 성능 저하가 발생한다. 본 논문에서 제안하는 AQM 기법은 구현이 간단한 AR(1) 모델을 이용하여 큰 시간 스케일에서 트래픽 입력율을 미리 예측하고 예측되는 혼잡 수준을 방지하는데 필요한 만큼의 패킷을 미리 폐기함으로써 동적으로 급변하는 모든 망 환경에 빠르게 적응하여 평균 큐 길이를 작게 유지하고 전체 링크 효율을 증가시킨다. IV장에서는 ns-2 시뮬레이터를 이용하여 제안기법과 큐 기반 AQM 기법인 RED와 ARED, 그리고 입력율 기반 AQM 기법인 REM, PAQM 기법과의 성능 비교를 통해 다양한 망 환경에서 제안 기법은 적은 패킷 손실율로 안정적인 큐잉 지연을 제공할 수 있다는 것을 보인다.

III. 제안 기법

본 장에서는 제안기법인 입력율 예측 기반 동적 큐 관리 기법에 대해 기술한다. 제안기법은 혼잡 척도와 성능 척도를 구분하여 망 혼잡 수준 예측 단계와 패킷 폐기 확률 결정의 두 단계로 구성된다. 망 혼잡 수준 예측 단계에서는 큐 길이 변화에 직접적인 영향을 미치는 입력율을 혼잡 척도로 이용하여 향후 망 혼잡 상태를 예측하고, 링크 이용율을 기반으로 한 패킷 폐기 확률 결정 단계에서는 망의 이용율을 극대화하면서 예측되는 혼잡을 회피할 수 있도록 패킷 폐기 확률을 결정한다. 제안 기법은 라우터 링크별로 적용되며, 개별 플로우에 대한 정보 없이 전체 입력 트래픽 정보만을 이용하여 동작하므로 구현의 복잡성은 망의 크기나 사용자의 수와 무관하다.

1. 망 혼잡 수준 예측

본 논문에서는 AR 시 계열 모델을 이용하여 블록이라 불리는 일정 시간마다 주기적으로 트래픽 입력율을

측정하여 현재 블록의 끝에서 다음 블록의 트래픽 입력을 예측한다. 다른 시 계열 모델에 비해 AR 모델은 모델 구성 인자의 계산이 간단하며 예측 오류가 평균 0인 정규 분포 특성을 보이므로 예측 오류 제어가 용이하다는 장점이 있다. 트래픽 입력을 예측을 위해서는 AR(1) 모델을 사용할 수 있으나 일반성을 위해 본 논문에서는 AR(m) 모델을 이용한 트래픽 입력을 예측 방법을 기술한다. 블록의 크기를 T_b 라고 하고 k 번째 블록의 실제 입력을 $\lambda(k)$, 예측된 입력을 $\hat{\lambda}(k)$ 라고 하면, AR(m) 모델에 따라 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다^[2].

$$\lambda(k) = \hat{\lambda}(k) + e(k). \quad (1)$$

$$\hat{\lambda}(k) = \sum_{i=1}^m a_i \lambda(k-i). \quad (2)$$

a_i 는 모델 인자이며 $e(k)$ 는 k 번째 블록에서의 예측 오류를 나타내며 AR 모델의 특성에 따라 예측오류는 평균이 0이고 분산이 다음과 같은 정규 분포를 따른다.

$$\text{var}(e(k)) = \sigma_{e(k)}^2 = \sigma_{\lambda(k)}^2 \left(1 - \sum_{i=1}^m a_i \rho_{\lambda(k),i}\right). \quad (3)$$

위 식 (3)에서 $\sigma_{\lambda(k)}^2$ 와 $\rho_{\lambda(k),i}$ 는 각각 $\lambda(k)$ 의 분산과 lag- i 자기 상관 함수를 나타내며, 모델 인자 a_i 는 $\lambda(k)$ 의 과거 v 개의 값을 이용한 다음과 같은 선형 방정식을 통해서 얻어진다.

$$\rho_{\lambda(k),h} = \sum_{i=1}^m a_i \rho_{\lambda(k),h-i} \quad (h = v, \dots, v-m+1). \quad (4)$$

v 는 일반적으로 m 의 값과는 무관하며 AR 모델의 메모리라고 불린다. 메모리 크기가 클수록 예측의 정확도는 증가하지만 제어 인자 계산을 위한 계산량이 $O(v)$ 로 증가한다. 또한 메모리 크기를 과도하게 많이 사용하게 되면 과거 값들과 다음 값과의 연관 관계는 감소하게 되므로 메모리를 특정 값 이상으로 증가시키면 계산량에 비해 예측의 정확도 증가율은 미비해진다. 본 논문에서는 다수의 모의 실험과 실제 트래픽 측정 연구를 통한 과거의 연구^[17]를 통해 메모리 크기를 5로 정하였다.

위와 같은 AR(m) 모델에 따라 k 번째 블록의 끝에서 $(k+1)$ 번째 블록의 트래픽 입력은 다음과 같이 예측되고

$$\hat{\lambda}(k+1) = \sum_{i=0}^m a_i \lambda(k-i), \quad (5)$$

예측된 입력과 링크의 서비스율 C 와의 비교를 통해 k 번째 블록의 끝에서 $(k+1)$ 번째 블록의 혼잡 수준 $l(k+1)$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$l(k+1) = \frac{\hat{\lambda}(k+1) - C}{C}. \quad (6)$$

예측된 입력이 링크 서비스율보다 크게 되면 다음 블록에서 혼잡이 예상되며 혼잡 정도는 예측 입력과 서비스율 간의 차이에 비례한다. 반대로 예측 입력이 서비스율 보다 작으면 다음 구간에서는 혼잡 수준이 감소하며, 감소 정도 역시 예측 입력과 서비스율의 차이에 비례한다. 다음 구간의 혼잡 수준은 현재 블록의 끝에서 예측된 입력에 의해 결정되므로 입력 예측 과정에서 발생하는 오류는 혼잡 수준 결정에 영향을 미친다. $(k+1)$ 번째 블록의 실제 혼잡 수준을 $l_r(k+1)$ 이라고 하면 식 (1)과 (6)에 의해 실제 혼잡 수준과 예측된 혼잡 수준은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$l_r(k+1) = l(k+1) + \frac{1}{C} e(k+1). \quad (7)$$

트래픽 입력을 예측 오류는 평균이 0이고 분산이 $\sigma_{e(k+1)}^2$ 인 정규 분포를 따르므로, 예측된 혼잡 수준은 평균이 실제 혼잡 수준이고 예측 오류의 분산이 $\sigma_{e(k+1)}^2/C^2$ 인 정규분포를 따른다. AR 모델을 통해 얻은 예측된 입력을 이용하면 실제 혼잡 수준 $l_r(k+1)$ 의 $(1-\alpha)100\%$ 신뢰 구간을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(l(k+1) - z_{\alpha/2} \frac{\sigma_{e(k+1)}}{C}, l(k+1) + z_{\alpha/2} \frac{\sigma_{e(k+1)}}{C} \right) \quad (8)$$

$z_{\alpha/2}$ 는 정규 분포의 $\alpha/2$ 영역에 해당되는 값을 나타낸다. 따라서 95%의 신뢰 구간의 경우 $z_{0.025} = 1.96$, 99%의 신뢰 구간인 경우 $z_{0.005} = 2.58$ 을 나타낸다. 즉, 링크 대역폭이 클수록 망 혼잡 수준 예측 오류는 작아지게 되며 예측된 혼잡 수준은 실제 혼잡 수준으로 근사화 시킬 수 있다.

2. 패킷 폐기 확률 결정

$l(k+1)$ 은 $(k+1)$ 번째 블록에서 예측되는 혼잡 정도를 나타내므로 패킷 폐기 확률은 예측되는 혼잡 정도

에 따라 증가하거나 감소해야 한다. 본 논문에서는 선형적 제어 함수를 사용하여 예측된 혼잡 수준에 따라 k 번째 블록의 끝에서 $(k+1)$ 번째 블록의 패킷 폐기 확률 $p_d(k+1)$ 을 다음과 같이 결정한다.

$$p_d(k+1) = p_w l(k+1) + p_d(k). \quad (9)$$

$p_w > 0$ 는 모델 인자로서 작은 양의 상수 값을 갖는다. 위의 식에 따라 제안기법은 예측되는 혼잡 정도가 클수록 보다 많은 패킷을 폐기시킴으로써 망이 혼잡 상태로 천이하는 것을 방지하려 하며, 다음 구간에 유휴 자원이 예측되면 그 만큼 더 많은 패킷을 수용하여 망의 이용율을 증가시키려 한다. 모델 인자 p_w 는 망 환경 변화에 대한 제어 기법의 적응 속도와 큐잉 지연 및 링크 이용율에 영향을 준다. p_w 값을 크게 하는 경우 한 블록에서 많은 패킷이 폐기되고 이것이 다음 블록의 underload 상태를 야기시키며, 이는 또 다시 패킷 폐기 확률의 급격한 저하를 초래하여 다음 블록의 overload 상태를 가져오고 이와 같은 현상이 반복된다. 즉, p_w 값이 큰 경우 평균 큐 길이의 변화폭이 커지므로 큐잉 지연의 변화가 커지며 전체 망 이용율은 감소하게 된다. 반면에 모델 인자의 값이 작은 경우 예상되는 망 혼잡 해소에 필요한 패킷보다 적은 양의 패킷이 폐기되므로 망 혼잡을 초래하게 된다. 실험을 통해 선형 제어 함수의 모델 인자는 모든 망 환경에서 0.001 정도의 값이 적당하다는 것을 검증하였다.

IV. 성능 평가

1. 망 혼잡 수준 변화에 대한 적응성

망 트래픽 입력율이 급격히 변화하는 환경에서 각 AQM 기법들의 성능 실험을 위해 혼잡 링크의 최대 버퍼 크기가 17.5Kbytes인 두 라우터가 1.5Mbps 링크로 연결된 덤벨 형태의 망 구조를 이용하였다. PAQM, REM, RED, ARED 기법들을 적용한 경우 각 기법들의 파라미터들은 각각 [11] [13] [14]에서 제안된 최적값을 사용하였고, 제안 기법을 적용하는 경우 블록 크기는 0.5초, 메모리 크기 5인 AR(1) 모델, 및 p_w 는 0.001을 사용하였다. 실험 시작시 2개의 순방향 long-lived TCP 플로우와 한 개의 역방향 long-lived TCP 플로우가 망에서 데이터를 교환하며, 망의 혼잡 수준을 급격하게 증가시키기 위해 실험 시작 25초 후에 최대 윈도우 크기가 20 패킷인 20개의 새로운 플로우들을 0.1초 간격

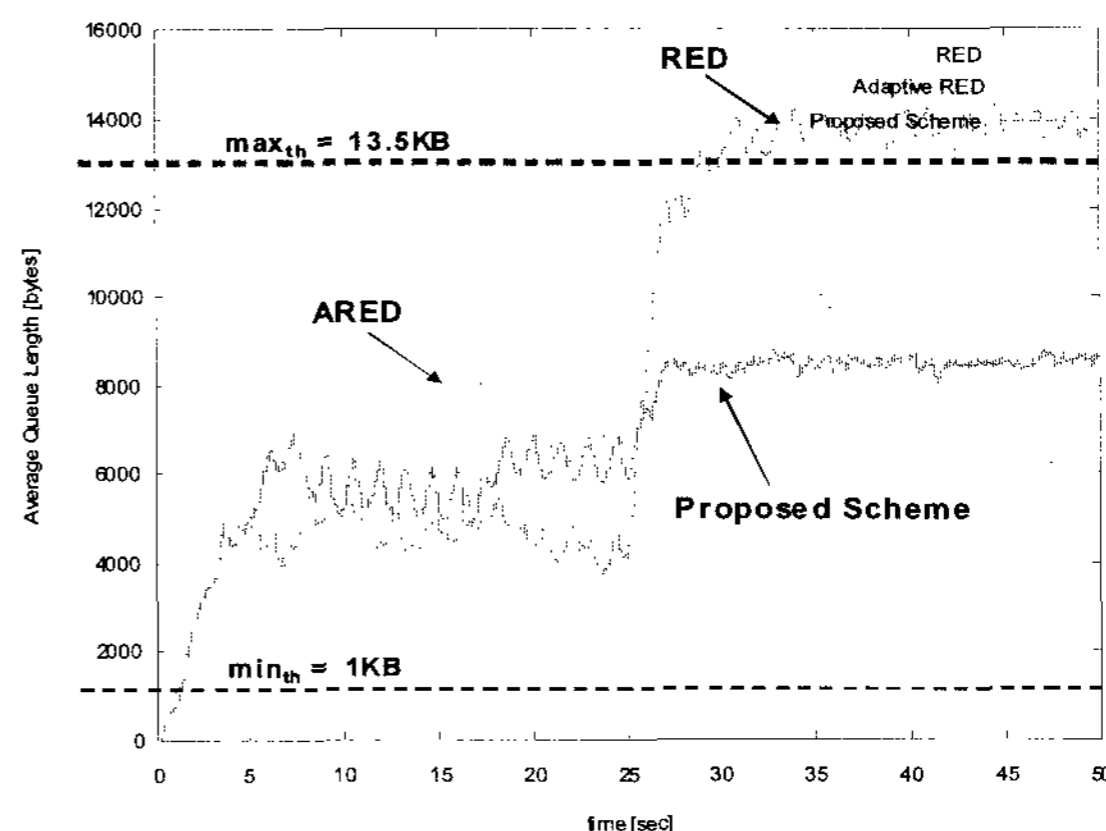


그림 1. 급격한 망 혼잡 수준 변화시 RED, ARED, 제안 기법의 평균 큐 길이 변화도.

Fig 1. Comparison of average queue length variation according to the abrupt changes of congestion level (RED, ARED, Proposed Method).

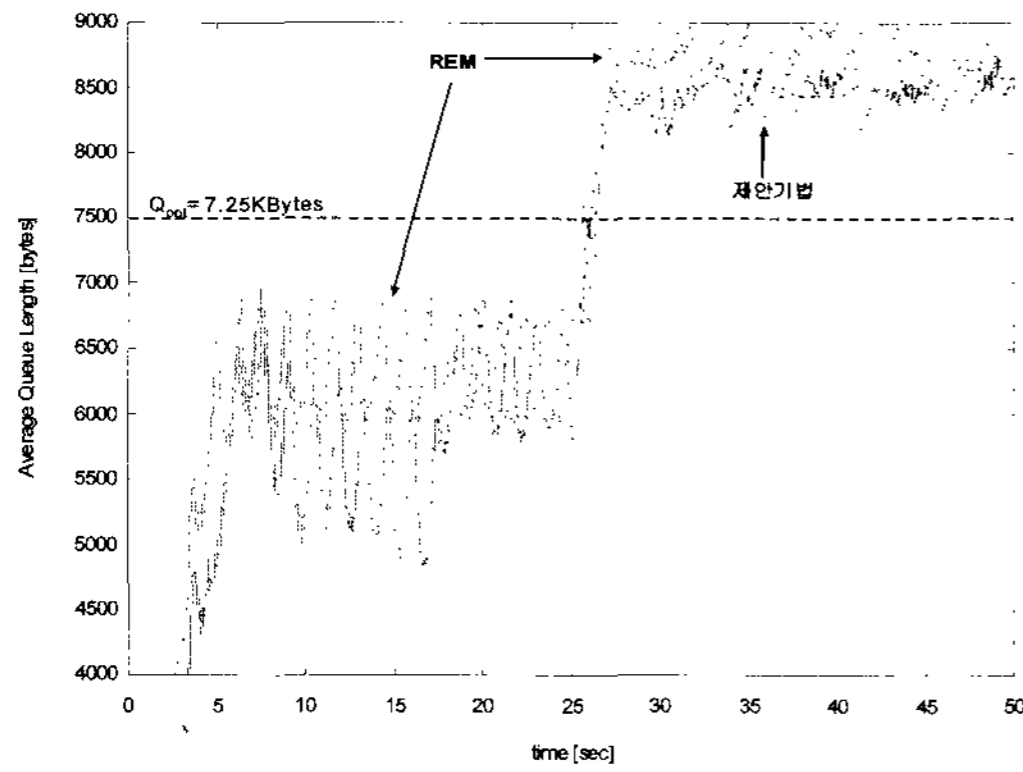
표 1. 급격한 망 혼잡 수준 변화시 평균 패킷 손실률 비교

Table 1. Comparison of packet drop rate when congestion level changes abruptly.

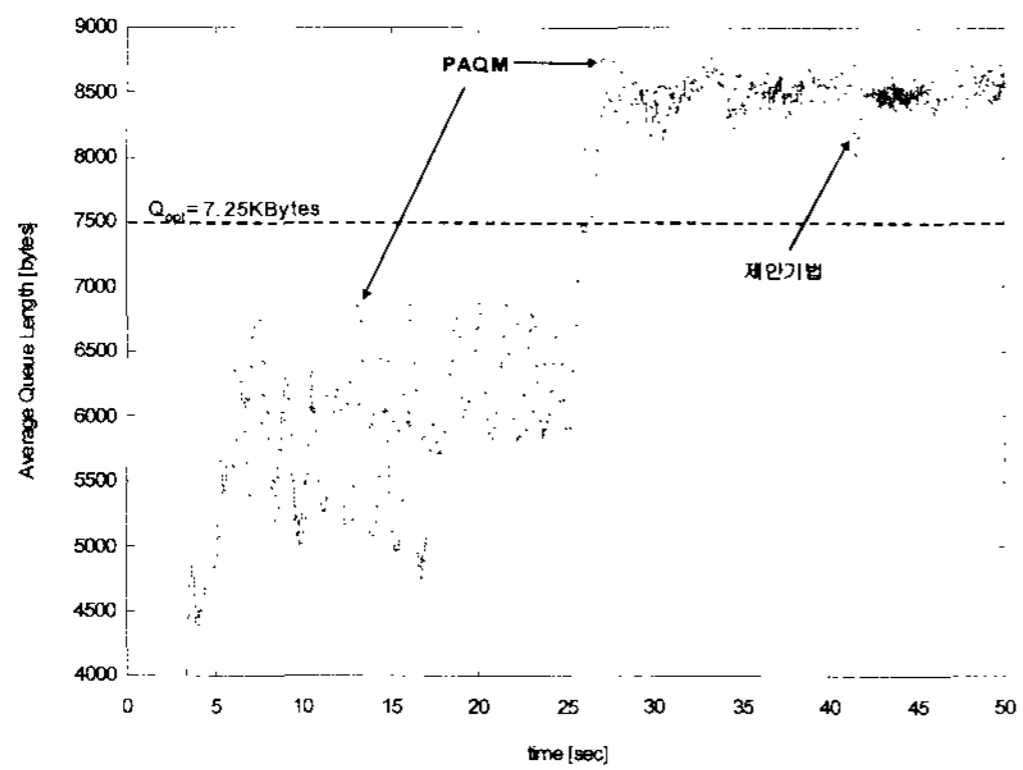
Drop율	RED	ARED	REM	PAQM	제안
1st half	0.0028	0.0022	0.0025	0.0024	0.0025
2nd half	0.0463	0.0437	0.0478	0.0482	0.0449
total	0.0357	0.0337	0.0368	0.0371	0.0346

으로 생성시켰다.

그림 1은 RED, ARED, 제안 기법이 사용된 경우 시간에 따른 평균 큐 길이의 변화를 나타낸다. RED의 경우 망 환경에 따라 RED 인자들이 적응하지 않으므로 평균 큐 길이는 패킷 손실률에 따라 변화하고 트래픽 입력율이 높은 경우 평균 큐 길이는 최대 버퍼 임계값 근처에서 변화하게 된다. ARED의 경우 망의 부하가 급증하는 25초에서 평균 큐 길이는 급격하게 증가하지만, ARED가 망 환경 변화를 감지하여 새로운 환경에 적합하도록 최대 패킷 폐기 확률을 적응시킨 후 평균 큐 길이는 ARED가 목표로 하는 $(\min_{th} + \max_{th})/2$ 인 7.25Kbytes 근처로 감소하게 된다. 제안 기법 역시 트래픽 부하가 급증하면 평균 큐 길이는 증가하게 된다. 그러나 제안기법 적용시 평균 큐 길이는 RED와 ARED의 최대 버퍼 임계값 수준으로 급증하지 않으며 망 환경 변화에 적응하는 시간이 ARED에 비해 매우 짧다. ARED의 경우 큐 관리 기법이 망 혼잡 수준을 검출하여 큐 길이를 안정화시키기까지는 약 10초 정도 소요되는 반면, 제안 기법은 AR 모델의 메모리 크기와 블록 크기의 곱인 약 2.5초 이후에 평균 큐 길이를 안정



(a) REM v.s. 제안기법



(b) PAQM v.s. 제안기법

그림 2. 급격한 망 혼잡 수준 변화시 REM, PAQM과 제안 기법의 평균 큐 길이 비교

Fig 2. Comparison of average queue length variation according to abrupt changes of congestion level (RED, ARED, Proposed Method).

화 시킨다. 더욱이 망의 혼잡 수준이 급격히 변화한 25초 이후 평균 큐 길이와 표준 편차는 ARED의 경우 9.9Kbytes, 2.2KBytes인데 비해 제안 기법은 8.4Kbytes, 0.5KByte로서 제안기법이 보다 안정적인 서비스를 제공하였다.

그림 2는 동일 실험 환경에서 REM, PAQM, 제안 기법의 평균 큐 길이 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 트래픽 입력을 혼잡 척도로 사용하는 제안기법과 트래픽 입력을 및 큐 길이를 모두 혼잡 척도로 사용하는 REM, PAQM 기법은 모두 RED나 ARED에 비해 급격한 망 혼잡 수준 변화에도 강한 적응성을 나타낸다. 또한 표 1에서 보는 바와 같이 패킷 손실율도 망이 혼잡하지 않은 구간과 혼잡한 구간 모두에서 REM, PAQM, 제안기법은 RED, ARED와 유사한 패킷 손실율을 나타낸다. 따라서 이들 기법들은 망 혼잡 수준의 급격한 변화에도 과도한 패킷 손실을 발생시키지 않으

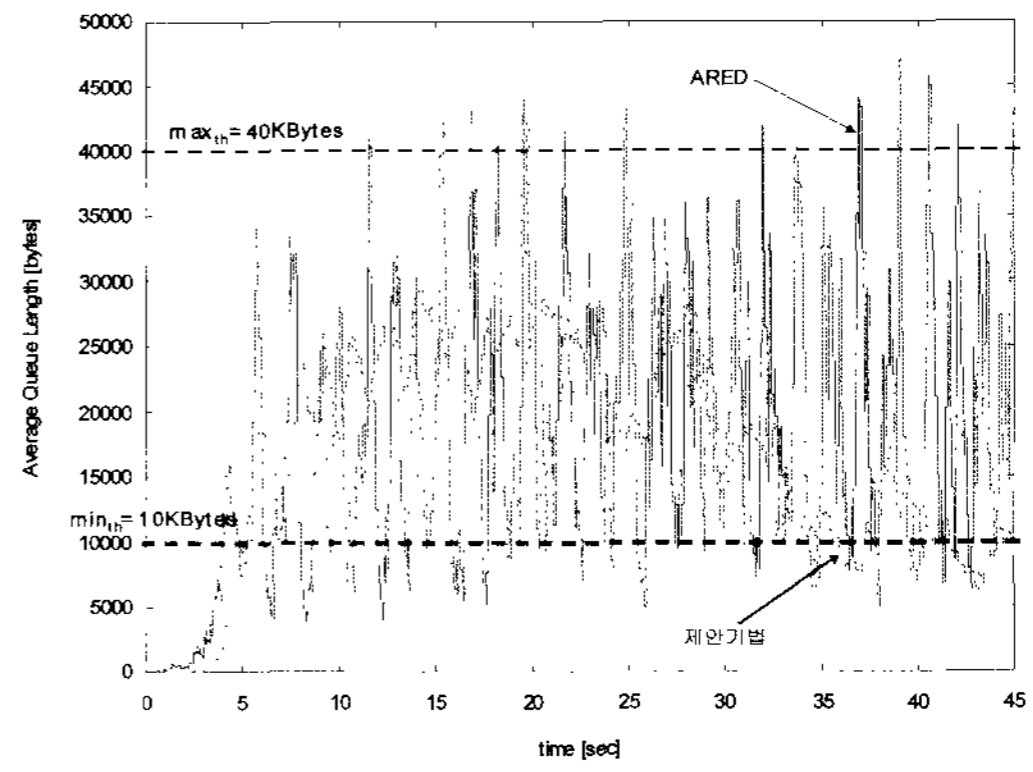


그림 3. ARED와 제안기법의 시간에 따른 평균 큐 길이 변화도

Fig 3. Comparison of average queue length variation between ARED and the proposed scheme.

면서 평균 큐 길이를 안정적으로 유지한다. 위 AQM 기법들 중 제안기법과 가장 유사한 성능을 나타내는 기법은 PAQM이다. PAQM의 경우 입력을 예측하고, 이것을 유지하고자 하는 큐 길이 (Q_{opt})와 비교하여 패킷 폐기 확률을 결정하기 때문에 제안기법과 성능이 유사하게 나타났다. 하지만 PAQM은 작은 시간 스케일 (0.02-0.05초)에서 동작하며, 예측기의 신뢰성있는 동작을 위해 많은 수의 (10-15개) 모델 인자들을 유지해야 한다. 또한 [11]에서는 예측기 구현의 복잡성을 완화시키기 위해 입력 트래픽의 허스트 (Hurst) 계수 값을 임의로 고정시켜서 사용하므로 망 환경 변화에 대한 적응성이 작다. 따라서 큰 시간 스케일에서 적은 모델 인자 (1개)로 동작하는 제안 기법이 확장성과 구현의 용이성 측면에서 PAQM보다 우월하다.

2. 평균 큐 길이 변화

본 절에서는 다수의 트래픽 플로우들이 혼잡 링크를 양 방향으로 공유하는 망 환경에서 제안 기법의 성능을 평균 큐 길이의 변화 측면에서 평가한다. 실험을 위한 트래픽 플로우들은 다음과 같이 설정하였다. 순방향으로는 평균 패킷 크기 1000Byte, 왕복 지연 시간 250msec인 100개의 long-lived FTP 플로우가 대역폭 15Mbps, 최대 버퍼 크기 80Kbytes인 혼잡 링크를 공유하고, 역방향으로는 동일 조건인 50개의 long-lived FTP 플로우가 혼잡 링크를 공유한다. 또한 20개의 웹 플로우를 1초 간격으로 양 방향으로 생성하여 혼잡 링크를 공유하도록 하였다. 공정한 비교를 위해 각 AQM 기법들에 사용되는 파라미터 값들은 각 논문에서 제안하는 최적값을 사용하였다^{[11][13][14]}

그림 3은 혼잡 링크에 ARED와 제안 기법을 적용한 경우 시간에 따른 평균 큐 길이 변화를 나타낸다. ARED는 망 환경에 따라 w_q 값을 적응시키지만 평균 큐 길이가 수시로 \max_{th} 이상으로 천이하는 경우가 발생한다. 따라서 랜덤 패킷 폐기보다는 버퍼 오버플로우에 의한 패킷 폐기로 인해 RED에서와 같이 평균 큐 길이가 \min_{th} 이하, \max_{th} 이상으로 진동하는 문제가 발생하는 반면 제안 기법을 사용하는 경우 평균 큐 길이는 항상 (\min_{th}, \max_{th}) 사이에서 안정적으로 유지된다.

그림 4는 제안 기법과 REM, PAQM이 각각 적용된 경우 시간에 따른 평균 큐 길이의 변화를 보여준다. 공정한 비교를 위해 각 기법이 목표로 하는 평균 큐 길이는 ARED의 \min_{th} (10Kbytes)와 \max_{th} (40Kbytes)의 중간값이 25Kbytes로 설정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 제안기법과 REM의 경우 평균 큐 길이는 각각 17.8Kbytes, 16.2Kbytes로서 비슷하였으며, 이들은 모두

PAQM의 30.9Kbytes 보다 작다. 또한 제안 기법과 REM과는 달리 PAQM의 경우 망에 새로운 플로우들이 추가되어 혼잡 수준이 점진적으로 증가함에 따라 Q_{opt} (25Kbytes) 값을 만족시키지 못하였으며 평균 큐 길이가 \max_{th} 를 넘는 경우도 발생한다. 각 기법의 평균 패킷 손실율의 경우 PAQM은 2% REM은 1.4%로서 제안 기법의 4%보다는 낮지만 2%의 패킷 손실율은 작은 평균 큐 길이를 유지하는 이득을 상쇄할 만큼 크지 않다.

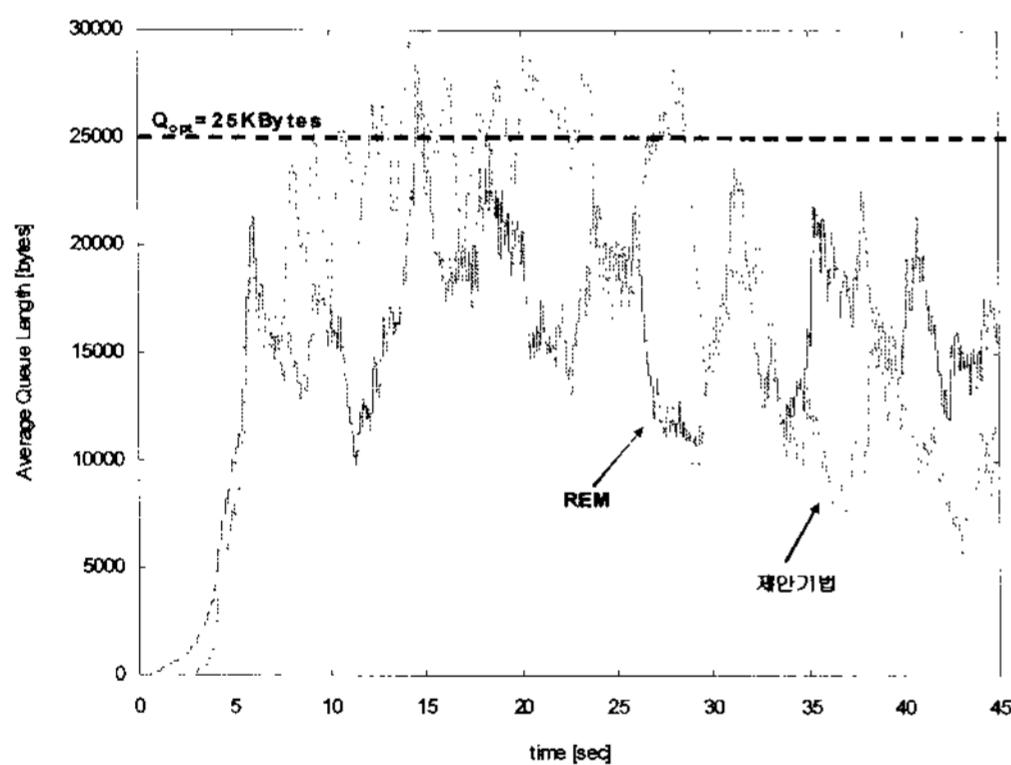
V. 결 론

본 논문에서는 인터넷 트래픽의 입력을 예측 특성을 이용한 동적 큐 관리 기법을 제안하였다. 제안 기법은 주기적인 패킷 측정을 통해 입력 트래픽을 AR 시 계열 모델로 모델링 한 후 현재 블록의 끝에서 다음 블록의 트래픽 입력을 예측한다. 예측된 입력에 따라 다음 블록의 혼잡 수준이 결정되며, 입력을 최대화시키기 위한 다음 구간의 패킷 폐기 확률은 예측된 혼잡 수준에 따라 설정된다.

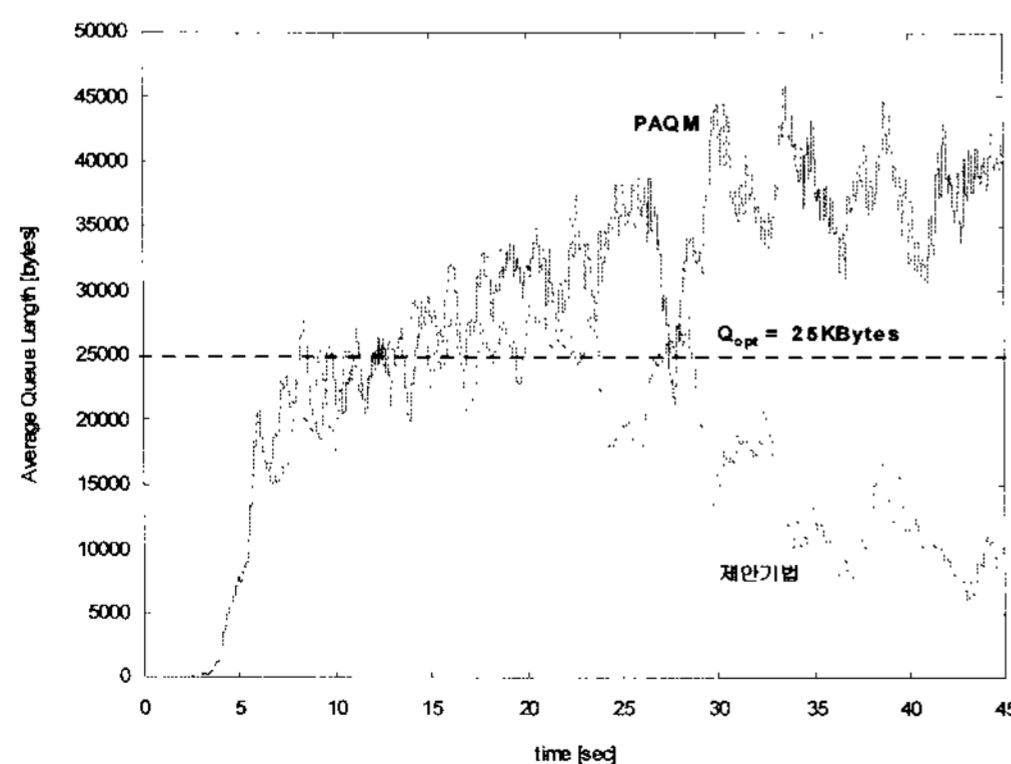
제안 기법은 동적으로 변화하는 트래픽 특성을 이용하여 망의 혼잡이 발생하기 전에 트래픽 소스에게 망 혼잡 신호를 전달하여 혼잡을 예방한다. 따라서 제안기법은 기존의 적응성 있는 AQM 기법들보다 입력 트래픽 변화에 보다 빠르게 적응하여 보다 안정적인 서비스를 제공한다. ns-2를 이용한 모의 실험을 통해 다양한 망 환경에서 제안 기법은 패킷 손실율을 RED나 ARED 수준으로 유지하면서 평균 큐 길이를 이들보다 작게 유지할 수 있다는 것을 보였다. 제안 기법은 또한 매 패킷 별로 패킷 폐기 확률을 결정하지 않고 각 블록별로 패킷 폐기 확률을 큰 시간 스케일에서 한번 결정하므로 라우터의 처리 부담이 작으며, 라우터 링크별로 적용되어 개별 플로우에 대한 정보 없이 전체 입력 트래픽 정보만을 이용하여 동작하므로 구현의 복잡성은 망의 크기나 사용자의 수와 무관하다.

참 고 문 헌

- [1] S. Floyd, et al., "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1, No. 4, pp. 397-413, August, 1993.
- [2] John M. Gottman, *Time-series Analysis*, Cambridge University Press, 1981.
- [3] ns-2 simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



(a) REM v.s. 제안기법



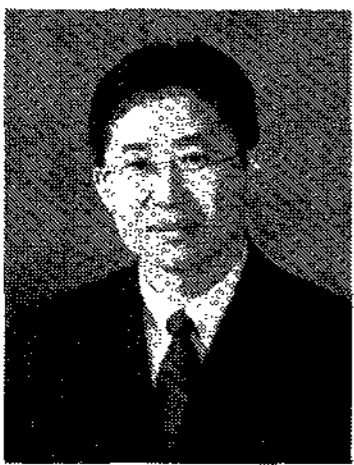
(b) PAQM v.s. 제안기법

그림 4. REM, PAQM과 제안기법의 시간에 따른 평균 큐 길이 변화도

Fig 4. Comparison of average queue length variation among REM, PAQM and the proposed scheme.

- [4] B. Braden, et al., "Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet", IETF RFC2309, April, 1998.
- [5] M. May, et al., "Reasons Not to Deploy RED", in the Proc. of 7th IWQoS'99, pp. 260-262, June 1999.
- [6] T. Ottomon, et al., "SRED: Stabilized RED", in the Proc of INFOCOM'99, pp. 1346-1355, March 1999.
- [7] W. E. Leland, et al., "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic", in the Proc. of ACM SIGCOMM '93, pp. 183-193, September 1993.
- [8] V. Paxson, et al., "Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, No. 3, pp. 226-244, June 1995.
- [9] W. Lin, et al., "Dynamics of Random Early Detection", in the Proc. of ACM SIGCOMM '97, pp. 127-137, September 1997.
- [10] F. M. Anjum, et al., "Fair Bandwidth Sharing Among Adaptive and Non-Adaptive Flows in the Internet", in the Proc. of IEEE INFOCOM'99, pp. 1412-1420, March 1999.
- [11] Y. Gao, et al., "On Exploiting Traffic Predictability in Active Queue Management", in the Proc. of IEEE INFOCOM '02, pp. 1630-1639, June 2002.
- [12] W. -C. Feng, et al., "A Self-Configuring RED Gateway", in the Proc. of INFOCOM'99 pp. 1320-1328, March 1999.
- [13] S. Athuraliya, et al., "REM: Active Queue Management", *IEEE Network*, Vol. 15, Issue 3, pp. 48-53, May/June 2001.
- [14] Sally Floyd, et al., "Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management", Technical Report August 1, 2001, available at <http://www.icir.org/floyd/papers/adaptiveRed.pdf>.
- [15] C. Hollot, et al., "On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows", in the Proc. of IEEE INFOCOM '01, pp. 1726-1734, April 2001.
- [16] B. Krithikaivasan, et al., "Adaptive Bandwidth Provisioning Envelope based on Discrete Temporal Network Measurements", in the Proc. of INFOCOM '04, pp. 1786-1796, March 2004.
- [17] B. Y. Choi, et al., "Adaptive Random Sampling for Traffic Load Measurement", in the Proc. of IEEE ICC '03, pp. 1552-1556, May 2003.
- [18] S. Kunniyur, et al., "Analysis and Design of an Adaptive Virtual Queue (AVQ) Algorithm for Active Queue Management", in the Proc. of ACM SIGCOMM 2001, August 2001.

 저 자 소 개



박재성(정회원)
 1995년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1997년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2001년 연세대학교 전기전자공학과
 박사 졸업.

2001년~2002년 Univ. Minnesota Post Doc.

2002년~2005년 LG전자 선임연구원

2005년~현재 수원대학교 인터넷정보공학과
 전임강사

<주관심분야 : 4세대 무선 통신망>



윤현구(정회원)
 1995년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1997년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2002년 연세대학교 전기전자
 공학과 박사 졸업.

2002년~2004년 (주) 현대시스콤 선임연구원

2004년~현재 명지전문대학 컴퓨터전자과 조교수

<주관심분야 : 무선인터넷, 디지털통신>