

# 자기유사 트래픽 특성을 고려한 차등서비스 망의 성능 평가

정희원 박 정 숙\*, 종신회원 전 용 희\*\*°

## Performance Evaluation of DiffServ Networks Considering Self-Similar Traffic Characteristics

Jeong-Sook Park\* *Regular Member*, Yong-Hee Jeon\*\*° *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 차등서비스 망의 성능 평가 문제를 다룬다. 성공적인 성능 평가를 위하여 적절한 트래픽 모델에 의하여 네트워크상의 실제 트래픽을 정확히 나타낼 수 있는 능력이 필수 요소이다. 실제 트래픽 측정의 성질에 대한 많은 연구 결과는 웹과 텔넷, P2P 트래픽을 포함하여 인터넷 트래픽에 대한 장기간-의존성을 증명하였다. 장기간 의존성은 자기유사성에 의하여 효과적으로 표현될 수 있다. 본 논문에서는 중첩된 On-Off 소스 모델, FFT-FGN 모델과 RMD 모델에 대한 특성 분석을 기반으로, 중첩된 On-Off 소스 모델을 이용하여 자기유사트래픽 발생기를 설계하고 구현한다. 생성된 트래픽의 자기유사성은 TCPdump 데이터의 패킷 도착 간격을 조사하여 확인하였다. 또한 구현된 트래픽 발생기를 차등서비스 망의 성능평가에 적용하여 On/Off 모델의  $\alpha$  값에 대한 성능의 영향과, CBQ(Class-Based Queueing)에 의한 EF(Expedited Forwarding) /BE(Best Effort) 클래스 트래픽의 성능을 관찰한다.

**Key Words** : Self-similar traffic, Performance evaluation, DiffServ network, Traffic modeling

### ABSTRACT

In this paper, we are dealing with the problems of performance evaluation of Differentiated Services(DiffServ) networks. For successful performance evaluation, the ability to accurately represent "real" traffic on the network by suitable traffic models is an essential ingredient. Many research results on the nature of real traffic measurements demonstrated LRD(long-range dependence) property for the Internet traffic including Web, TELNET, and P2P traffic. The LRD can be effectively represented by self-similarity. In this paper, we design and implement self-similar traffic generator using the aggregated On/Off source model, based on the analysis of the On-Off source model, FFT-FGN(Fast Fourier Transform-Fractional Gaussian Noise) model, and RMD(Random Midpoint Displacement) model. We confirmed the self-similarity of our generated traffic by checking the packet inter-arrival time of TCPdump data. Further we applied the implemented traffic generator to the performance evaluation of DiffServ networks and observed the effect of performance to the  $\alpha$  value of the On/Off model, and performance of EF/BE class traffic by CBQ.

\* 한국전자통신연구원 정보보호연구본부 무선보안응용연구팀 (jungsp@etri.re.kr),

\*\* 대구가톨릭대학교 컴퓨터정보통신공학부 (yhjeon@cu.ac.kr)(°:교신저자)

논문번호 : KICS2007-07-323, 접수일자 : 2007년 7월 23일, 최종논문접수일자 : 2008년 4월 24일

## I. 서 론

인터넷 트래픽의 특성은 자기유사성(self-similarity)에 의해 대표적으로 표현될 수 있다<sup>1-5)</sup>. 자기유사성은 트래픽이 시간 규모에 관계없이 군집성(burstiness)을 가지는 특성으로, 상관성(correlation)때문에 해석이 상당히 어렵다. 지금까지의 연구결과에 의하면, 자기유사성은 트래픽의 파일 크기가 대규모라는 점, 멀티미디어 트래픽의 압축 특성, 전송 메커니즘 등에 의한 것으로 밝혀졌다. 자기유사성은 용량 예측 및 설계, 트래픽 제어 및 자원 관리, 네트워크 QoS (Quality of Service) 문제, 트래픽 합성 효과 예측에 영향을 미칠 수 있으므로, 성능 분석에 있어서 이러한 특성화에 대한 연구가 선행되어야 한다<sup>6-9)</sup>.

기존에는 통신망 트래픽을 모델링하기 위해 MMPP (Markov-Modulated Poisson Process) /MMBP(Markov-Modulated Bernoulli Process), IPP(Interrupted Poisson Process)/IBP (Interrupted Bernoulli Process), Fluid flow 모델 등을 사용해 왔다. 이들은 모두 자기상관성을 고려하지 않은 비자기유사(non-self-similar) 모델에 속한다. 그러나 현재 제공되는 많은 인터넷 서비스들은, 기존에 고려되던 통신망 트래픽과는 완전히 다른 성질인 자기유사성(self-similarity)에 가장 근접하다는 것이 밝혀졌다.

따라서 본 논문에서는 인터넷 트래픽의 특성을 나타낼 수 있는 모델링 방안을 도출하고자 한다. 도출된 모델링 방안은 성능 평가에 있어서 트래픽 발생기로 사용된다. 먼저, 인터넷 트래픽의 특성 분석에서는 현재 인터넷에서 제공되는 여러 서비스 및 이들을 합성시킨 트래픽의 특성들이 자기유사성을 가진다는 사실과 이러한 특성은 네트워크의 자원 할당 및 관리 문제 등에 많은 영향을 미칠 수 있다는 선행 연구결과에 기반 하여, 실측된 인터넷 트래픽 특성을 분석하고 이를 가장 근접하게 표현할 수 있는 자기유사 트래픽 모델의 구현에 초점을 두었다. 이를 위하여 인터넷 실측 데이터를 분석하고, 자기유사 트래픽 모델을 위한 추정기를 구현하고 트래픽 모델링 방법을 비교 및 분석 한다. 이의 결과로 생성된 코드는 성능평가에서 인터넷 트래픽을 표현하는 트래픽 발생기로 활용하고자 한다.

## II. 관련 연구

자기유사성은 원래 카오스(Chaos) 이론에 기반 한다. 이런 이론이 통신망의 특성화에 처음으로 도입된

것은 W. E. Leland 연구가 처음이다<sup>11)</sup>. Leland는 Bellcore망에서 수집된 트래픽을 분석하여 LAN 트래픽이 자기유사성을 가진다는 사실을 증명하였다. 이 연구 결과는 인터넷 트래픽의 자기유사성 연구에 대한 시작점이 되었으며, 그 이후에 인터넷 트래픽 특성이 자기유사성을 가진다는 사실이 여러 트래픽 분석 및 추정을 통하여 밝혀졌다. Crovella 등은 WWW 트래픽이 자기유사성을 가짐을 증명하였다<sup>2)</sup>. Erramilli 등의 연구에서는 ISDN 망의 D-채널 시그널링이 자기유사성을 가짐을 밝혔다<sup>4)</sup>. M. W. Garrett 등의 연구는 VBR 비디오 시퀀스의 자기유사성을 밝혀내었다<sup>3)</sup>. 또한 V. Paxson은 수많은 실측 데이터 분석을 통하여 TCP, FTP 및 TELNET 트래픽 또한 자기유사성을 가짐을 증명하였다.

보다 최근의 연구에서는 현재 급속히 늘어나고 있는 P2P(Peer-to-Peer) 트래픽도 자기 유사트래픽 특성을 가지고 있는 것으로 평가되었다<sup>10)</sup>. Kettani 등은 자기-유사 트래픽의 허스트 파라미터의 평가에 대한 연구를 수행하였다<sup>11)</sup>. Rezaul 등은 장기간 의존성의 자기-유사 네트워크 트래픽에 대한 평가를 수행하였다<sup>12)</sup>. 가장 최근의 연구에서는 네트워크 트래픽의 자기-유사 성질로 인한 데이터 네트워크의 성능에 대한 영향을 줄이기 위하여 장기간 의존성을 통제하는 알고리즘을 제안하였다<sup>13)</sup>.

이러한 연구를 통하여 인터넷 트래픽 대부분이 자기유사성을 가진다는 사실이 이견 없이 받아들여지고 있다. 이에 따라 이러한 특성을 모델링하기 위한 많은 연구들이 시도되었다. Erramilli의 연구에 의하면 트래픽이 자기유사성을 가질 경우, 부하가 50~60% 이상이 되면 지연이 급격히 증가하기 시작하는 경향이 있고 그 수치 또한 경우에 따라 많이 가변적이다<sup>4)</sup>. 기존의 트래픽에서 네트워크의 부하가 80% 정도인 지점을 과부하 지점이라 한 것에 비해서 이는 엄청난 차이를 나타내는 값이다.

인터넷 망의 트래픽이 자기유사성을 나타내는 것은 다음과 같은 원인 때문으로 분석되고 있다. 트래픽의 파일 크기가 heavy-tailed하다는 특성이 그 이유 중의 하나이다. 또 멀티미디어 트래픽의 압축 특성이 그 한 원인으로, MPEG 등의 압축된 스트림 자체가 자기유사성을 가진다. 또한 전송 메커니즘 (TCP)에 의해 자기유사적인 트래픽 특성을 유발한다<sup>9)</sup>.

이러한 자기유사성은 망의 용량 예측 및 설계, 트래픽 제어 및 자원 할당, 네트워크 QoS 문제 및 트래픽 합성 효과 예측에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 자기유사 트래픽 특성은 인터넷 망의 성능에

많은 영향을 미칠 수 있으므로 성능 평가에 있어서 반드시 고려되어야 한다.

### Ⅲ. 트래픽 특성 분석

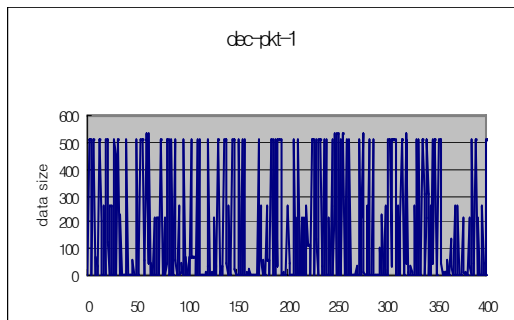
#### 3.1 자기유사성 분석

인터넷에서 각 서비스는 사용 목적 및 내용에 따라 많은 특성차이를 나타내지만, 이를 중첩시킨 트래픽은 자기유사적인 특성을 나타낸다. 그러나 이러한 특성 또한 시간 및 지역적인 성격에 따라 다른 특성을 나타낸다. 따라서 인터넷 트래픽의 특성을 규명하고 보다 근접한 모델링이 이루어지기 위해서는 많은

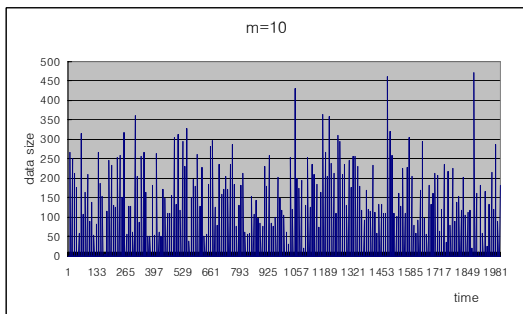
경우에 대하여 실측 데이터를 분석해 볼 필요가 있다.

인터넷 트래픽에 대한 실측 트레이스는 NLNR(The National Laboratory for Applied Network Research), CAIDA(Cooperative Association for Internet Data Analysis), LBL 등에 많이 제공되어 있다<sup>[14-16]</sup>. 본 논문에서는 그 중 몇 개의 표본을 수집하여 트래픽의 자기유사적인 특성을 규명하였다.

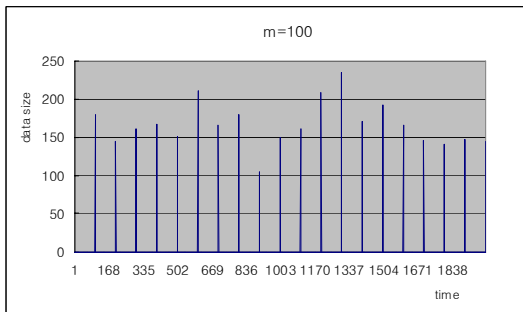
LBL의 트레이스를 사용하여 샘플의 집산화 시 자기유사성의 특성을 분석하였는데, 그림 1 및 그림 2와 같다. 그림 1은 DEC-PKT-1의 표본들을 보여준다. (a)는 자료를 별개로 모두 나열한 경우의 결과이고 (b)는 10개씩 순서대로 집단화한 것이며 (c)는 100개씩 집단화한 경우의 결과를 표현한다. 직관적으로 이들의 특성이 자기유사적인 특성을 표현한다는 것을 알 수 있다.



(a) m=1인 경우의 시간 대 데이터 크기

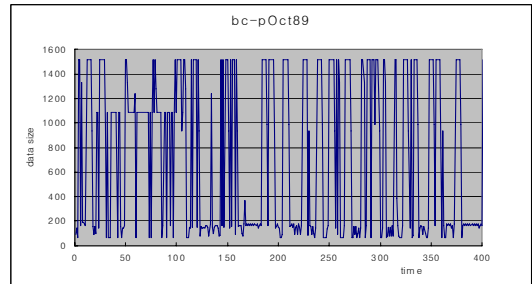


(b) m=10인 경우의 시간 대 데이터 크기

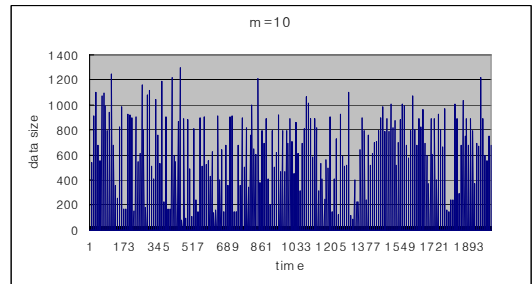


(c) m=100인 경우의 시간 대 데이터 크기

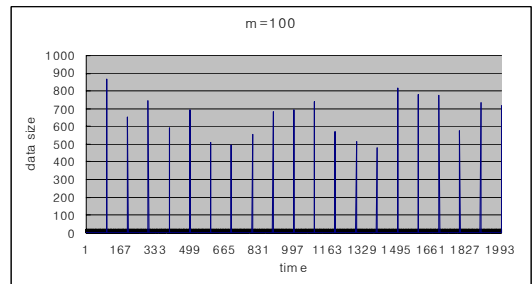
그림 1. DEC-pkt-1 트레이스의 자기유사성



(a) m=1인 경우의 시간 대 데이터 크기



(b) m=10인 경우의 시간 대 데이터 크기



(c) m=100인 경우의 시간 대 데이터 크기

그림 2. BC-pOct89 트레이스의 자기유사성

그림 2는 BC-pOct89 자료로서 그림 1과 비슷한 현상이 발생함을 표현하고 있다. 이것을 R/S plot과 variance-time plot을 통해서 값을 구해보면  $m=100$ 인 경우 BC-pOct89의  $H$ 는 0.841794 정도로 높은 자기유사성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.2 자기유사 트래픽 정의 및 특성

자기유사성은 다음과 같이 정의된다. 어떤 프로세스  $x(t)$ 가 있을 때, 임의의 실수  $a > 0$ 에 대해 프로세스  $a^{-H}x(at)$ 가  $x(t)$ 와 같은 통계적 특성을 가진다면  $x(t)$ 는 파라미터  $H(0.5 \leq H \leq 1)$ 를 가지고 통계적으로 자기유사적이라 한다.  $H$ (Hurst parameter)는 자기유사성의 정도를 나타내는 값으로서,  $0 < H < 1$  사이에 존재한다. 또한  $0 < H < 0.5$ 인 경우는 그 프로세스가 자기유사성이 없음을 나타내며,  $0.5 < H < 1$ 인 경우는 자기유사성이 존재하는데, 1에 근접할수록 그 특성이 강함을 의미한다. 자기유사 프로세스의 평균, 분산 및 자기상관은 수식 (1)~(3)과 같이 정의된다.

$$\text{평균 : } E[x(t)] = \frac{E[x(at)]}{a^H} \quad (1)$$

$$\text{분산 : } Var[x(t)] = \frac{Var[x(at)]}{a^{2H}} \quad (2)$$

$$\text{자기상관 : } R_x(t, s) = \frac{R_x(at, as)}{a^{2H}} \quad (3)$$

자기유사적 프로세스의 중요한 특성으로는 장기간 의존성, heavy-tailed 분포, 스펙트럼 밀도 등이 있다<sup>[7]</sup>.

#### 3.2.1 장기간 의존성(LRD: Long-range dependency)

한 정상 프로세스가 있을 때, 이 프로세스의 자기상관 함수  $r(k)$ 가 더할 수 없다면 ( $\sum_k r(k) = \infty$ ), 이러한 프로세스는 장기간 의존적(LRD)이라 한다. LRD 성질을 가지는 가장 간단한 모델은 자기유사적 모델로 정의할 수 있고, 이러한 LRD 성질은 hyperbolic하게 감소하는 자기상관 함수에 의해 특성화되어질 수 있다.

SRD 프로세스는 자기공분산이 지수적으로 빨리 감소하는 조건을 만족한다.

$$C(k) \sim a^{|k|}, \quad (|k| \rightarrow \infty, 0 < a < 1) \quad (4)$$

반면 LRD 프로세스는 hyperbolic하게 감소하는 자기 공분산값을 가진다.

$$C(k) \sim |k|^{-\beta}, \quad (|k| \rightarrow \infty, 0 < \beta < 1) \quad (5)$$

이때,  $H = 1 - \beta/2$ 이고  $\sum_k C(k) = \infty$ 이다.

#### 3.2.2 Heavy-tailed 분포

Heavy-tailed 분포는 패킷 도착 간 시간이나 버스트 길이와 같은 트래픽 프로세스를 기술하는 확률밀도를 특성화하기 위해 사용되어진다<sup>[17]</sup>. 확률 변수  $X$ 의 분포가 식 (6)을 만족하면 긴 꼬리(heavy-tailed)라고 한다.

$$1 - F(x) = \Pr[X > x] \sim \frac{1}{x^\alpha}, \quad (x \rightarrow \infty, \alpha > 0) \quad (6)$$

일반적으로 긴 꼬리 분포를 가진 확률변수는 높거나 무한인 분산 값을 가진다.

#### 3.2.3 스펙트럼 밀도

장기간 의존성에 관한 식을 주파수 상에서 기술하면, 전력 스펙트럼(power spectrum) 밀도는 원래의 신호에 가까운 전력 법칙을 따른다.

$$S(w) \sim \frac{1}{|w|^\gamma}, \quad (w \rightarrow 0, 0 < \gamma < 1) \quad (7)$$

이에 대한 이산시간 확률과정의 스펙트럼 밀도는 (8)과 같다.

$$S(w) = \sum_{k=-x}^x R(k)e^{-j2kw}, \quad S(0) = \sum_{k=-x}^x R(k) \quad (8)$$

이때  $\gamma = 1 - \beta = 2H - 1$ 이다.

반면, 단기간 의존성(SRD)은  $w \rightarrow 0$ 에 따라 유한이 되는 확률 밀도에 의해 특성화되며,  $\gamma = 0 (H = 0.5)$ 일 때 발생한다.  $S(0)$ 의 값이 무한인 경우는  $R(k)$ 의 값이 큰  $k$ 에 대해 빨리 감소하지 않을 때 발생한다. 또한 이 프로세스에 대해서 중첩 트래픽  $X_t^{(m)}$ 을 정의할 수 있다.  $\{X_t^{(m)}\}$ 은  $\{X_t\}$ 보다  $m$ 배만큼 더 큰 스케일을 사용하여  $\{X_t\}$ 를 볼 수 있도록 하는 것이다. 이러한 자기유사적인 모델은 기존의 모델과는 달리 프로세스  $\{X_t\}$ 와 중첩 프로세스  $\{X_t^{(m)}\}$ 이 같은 자기상관 함수를 가진다.  $\{X_t^{(m)}\}$ 은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$X_t^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=tm-m+1}^{tm} X_i \quad (9)$$

## IV. 자기유사 트래픽 모델링

자기유사적인 트래픽을 생성하는 방법으로는 긴

꼬리 on/off 구간들을 가지는 단순 on/off 프로세스들을 다수 중첩시켜서 자기유사적 프로세스를 구축하는 방법, 큐잉 모델, RMD(Random Midpoint Displacement), Wavelet 계수 계산법, Hosking 방법, FFT(Fast Fourier Transform) 방법 등이 있다<sup>[18-22]</sup>.

4.1 중첩된 ON/OFF 소스 모델

웹을 포함하여 현재 인터넷에서 제공되는 서비스를 위한 파일 구조는 heavy-tailed 분포를 가지며 이러한 특성은 합성된 네트워크 트래픽의 자기유사성을 일으키는 원인을 제공한다. 따라서 네트워크 트래픽을 모델링하기 위한 한 방법으로, heavy-tailed 분포를 가지는 여러 개의 스트림을 중첩시켜서 자기유사성을 가지는 합성 트래픽을 만들어낸다. 이 때 중첩되는 스트림의 수를 증가시킬수록 정확한 자기유사 모델의 표현이 가능한데, 최소 150개 이상의 heavy-tailed 분포를 가지는 스트림의 중첩이 필요할 것으로 알려져 있다.

그러한 대표적인 모델이 Aggregated ON/OFF Source 모델이다<sup>[18]</sup>. 이것은 자기유사 특성 중 heavy-tailed의 특성을 이용한 방법이고, heavy-tailed 분포의 가장 대표적인 예는 파라미터  $k, \alpha(k, \alpha > 0)$ 를 가진 파레토(Pareto) 분포이다. 파레토 분포의 PDF(Probability Density Function) 및 CDF(Cumulative Density Function)는 식 (10), 평균값은 식 (11)과 같이 정의되어진다.

$$f(x) = F(x) = 0, \quad (x \leq k)$$

$$f(x) = \frac{\alpha}{k} \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha+1}, \quad F(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha},$$

$$(x > k, \alpha > 0) \tag{10}$$

$$E[X] = \frac{\alpha}{\alpha - 1} k, \quad \alpha > 1 \tag{11}$$

파라미터  $k$ 는 확률변수가 취할 수 있는 최소값을 표시하고,  $\alpha$ 는 확률변수의 평균 및 분산값을 결정한다.  $\alpha \leq 2$ 이면 분포는 무한 분산값을 가지고,  $\alpha \leq 1$  이면 분포는 무한 평균 및 분산값을 가진다.

$H$ 와  $\alpha$ 의 관계는 식 (12)와 같다.

$$H = \frac{(3 - \alpha)}{2} \tag{12}$$

이 모델에서 각 스트림은 ON과 OFF 구간이 반복되어 나타나며, 이때 ON과 OFF의 구간 길이는

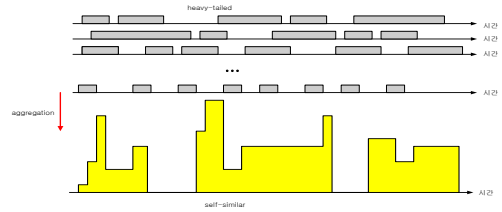


그림 3. 중첩된 ON/OFF 소스 모델

heavy-tailed의 특성을 가진다. 또한 이러한 스트림을 다수 중첩시키면 이때 ON 상태에 있는 프로세스의 카운트 프로세스는 자기유사성을 나타낸다<sup>[23]</sup>. 이 모델의 구현 방법은 그림 3에 의해 설명가능하다.

이 모델에서 개별적 ON/OFF 소스는 데이터 통신 망 터미널 모델링에 상당히 유용하다. 이 모델에서의 트래픽 소스는 ON 구간동안  $R$  율로 데이터를 전송하고 OFF 구간동안 유휴 상태로 남아 있게 된다. ON 상태 동안 보내는 시간  $t_{on}$  과 OFF 상태 동안 보내는 시간  $t_{off}$  는 heavy-tailed 분포를 가진다.

4.2 RMD(Random Midpoint Displacement) 모델

RMD는 FGN(Fractional Gaussian Noise)을 구하기 위해 정해진 구간을 재귀적으로 분할하고 끝 점에서의 값들로부터 중앙의 값들을 구축하는 것이다<sup>[20]</sup>. RMD는 일종의 내삽법(interpolation)이다. 즉  $Y_1, Y_2$ 가 있을 때 이의 중간 값은 식 (13)과 같이 계산된다.

$$(Y_1 + Y_2)/2 + offset \tag{13}$$

이때, offset은 가우스 분포에서 얻어지는 변량값이며, 위의 방법을 사용하여 두 끝 값 사이의 값들을 원하는 만큼 구할 수 있다.

RMD는  $[0, T]$  사이의 FBM(Fractional Brownian Motion) 트레이스를 생성하기 위해서  $T$ 를 분할하고 양 끝점간의 중간점에서 원하는 트래픽을 생성하는 이 과정을 반복한다. 양 끝점에서의 값  $Z(a)$ 와  $Z(b)$ 로부터 구간  $[a, b]$ 의 중간위치의 값  $Z\left(\frac{a+b}{2}\right)$ 를 구축할 때, 변위  $Z\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{Z(a)+Z(b)}{2}$ 는 증가치  $Z(b) - Z(a)$ 에는 독립적이며, 이 변위는 평균 0인 가우스 분포를 가진다.

FBM 프로세스  $Z(t)$ 가 구간  $[0, T]$ 에서 계산되어진다면,  $Z(0) = 0$ 으로 두고 평균이 0이고 분산이  $T^{2H}$ 인 가우스 분포로부터  $Z(T)$ 를 표본 추출함

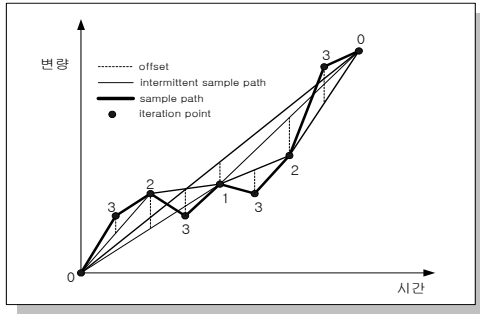


그림 4. RMD의 구현 원리

로써 시작한다. 그 다음  $Z(T/2)$ 는  $Z(0)$ 와  $Z(T)$ 의 평균값인  $\left(\frac{Z(a)+Z(b)}{2}\right)$ 에다 오프셋을 더한 값이다. 오프셋은 초기 스케일링 계수(factor)  $s_1 = 2^{-H} s_0 = 2^{-H} \sqrt{1 - 2^{2H-2}}$ 의  $T^{2H}$ 배로 주어지는 표준 편차를 가진 가우스 확률 변량이다. 그런 후 다음 스케일링 계수를  $1/2^H$ 로 줄이고 두 개의 구간  $(0, T/2)$ 와  $(T/2, T)$ 가 더 나누어지며, 이 과정이 반복된다. 그림 4는 RMD의 구현 원리를 보여준다.

RMD에 의해 생성된 근사적 FBM( $Z(t)$ ) 트레이스는 누적 도착 프로세스  $A(t)$ 로 번역 가능하다.

$$A(t) = Mt + \sqrt{\alpha M} Z(t) \quad (14)$$

$M$ 은 평균이고  $\alpha$ 는 단위시간 구간 안의 셀 수의 분산 대 평균의 비율로 정의되는 첨두화(peakedness) 계수이다. 시간  $t$ 에서  $t+1$ 까지 증분 프로세스는 식 (15)로 정의된다.

$$\bar{A}(t) = M + \sqrt{\alpha M} [Z(t+1) - Z(t)] \quad (15)$$

$\bar{A}(t)$ 발생에 대한 입력은  $M, \alpha, H$ 를 포함하고 결과로 3-파라미터 트래픽 모델링이 된다.

### 4.3 FFT-FGN 모델

자기유사성을 나타내는 성질에는 시간 영역에서의 특성을 살펴보는 방법과 이를 주파수 영역으로 변환하여 그 특성을 살펴보는 두 가지 방법이 존재한다. 일반적으로 자기유사성은 평균 및 분산 외에 자기상관관계를 통하여 보다 뚜렷한 특성규명이 가능한 것으로 알려져 있다. 이러한 자기상관의 특성은 주파수 도메인에서 더 뚜렷이 볼 수 있다<sup>[22]</sup>.

자기유사성이 강할수록 이의 주파수 도메인에서는

특정주파수를 중심으로 해서 집중되는 현상을 관찰할 수 있다. 따라서 시간 도메인보다는 주파수 도메인으로 바꾸어 특성을 고찰하고자 하는 연구결과가 많이 나왔다. 이에 푸리에 변환을 이용하는 방법과 웨이블릿 변환을 이용하는 방법이 있다<sup>[24-27]</sup>. 이러한 변환 방법은 위의 장점 외에도 계산 복잡도도 상당히 향상시킨다는 장점을 가진다. 예로 기존의 모델은  $O(n^2)$ ,  $O(n^3)$  정도였던 것에 비해 푸리에 변환을 이용하는 방법은  $O(n \log n)$ , 웨이블릿 변환은  $O(n)$  정도의 계산 복잡도를 가진다.

본 논문에서는 표본 경로를 두 번의 푸리에 변환을 적용하여 얻는 FFT-FGN 방법을 구현하였다. FFT 방법에 의한 FGN 트래픽 합성 알고리즘은 다음과 같다<sup>[24]</sup>.

- ① 주파수  $2\pi/n$ 에서  $\pi$ 까지에 대한 FGN 프로세스의 전력 스펙트럼에 대응하는  $\{f_1, f_2, \dots, f_{n/2}\}$ 을 구축한다. 이때  $f_i = \tilde{f}\left(\frac{2\pi i}{n}; H\right)$ 이다. 일반적으로  $f(\lambda; H) = A(\lambda; H) [|\lambda|^{-2H-1} + B(\lambda; H)]$ 이고  $A(\lambda; H)$ 와  $B(\lambda; H)$ 는 각각 아래와 같다.

$$A(\lambda; H) = 2\sin(\pi H) \Gamma(2H+1) (1 - \cos \lambda)$$

$$B(\lambda; H) = a_1^d + b_1^d + a_2^d + b_2^d + a_3^d + b_3^d + \frac{a_3^{d'} + b_3^{d'} + a_4^{d'} + b_4^{d'}}{8H\pi}$$

여기서,  $d = -2H - 1$ ,  $d' = -2H$ ,  $\alpha_k = 2k\pi + \lambda$ ,  $b_k = 2k\pi - \lambda$ .

- ② 각  $\{f_i\}$ 에 평균 1을 가진 독립 지수 확률변수를 곱하여 퍼지(fuzzy)화 시킨 결과  $\{\tilde{f}_i\}$ 을 구한다.

- ③ 복소수 열  $\{z_1, \dots, z_{n/2}\}$ 을 구축한다. 이때  $|z_i| = \sqrt{\tilde{f}_i}$ 이고 위상은 0과  $2\pi$ 사이에서 균일하게 분포되어진다.

- ④  $\{z_1, \dots, z_{n/2}\}$ 의 확장 버전  $\{z'_0, \dots, z'_{n-1}\}$ 을 구축한다. 이때 식 (16)을 만족한다.

$$z'_i = \begin{cases} 0, & (i=0) \\ z_i, & (0 < i \leq n/2) \\ z_{n-1}, & (n/2 < i < n) \end{cases} \quad (16)$$

- ⑤ 근사적인 FGN 표본 경로를 얻기 위해  $\{z'_i\}$ 을 역푸리에 변환한다.

또 하나의 주파수 도메인 알고리즘인 웨이블렛 변환에 의존하는 방법은 FFT와 마찬가지로 샘플들의 주파수 스펙트럼의 특성에 의해 자기유사성을 파악하기 위한 방법이다<sup>21)</sup>. 이 방법은 자기상관성이 주파수 영역에서 보다 잘 표현된다는 특성을 사용하며 주파수 영역에서 샘플 생성 후 웨이블렛 변환을 적용하여 시간 영역의 트래픽을 생성 시킨다. 계산시간은  $O(n)$ 으로 효율적이고 다중 프랙털(multi-fractal) 현상을 포착하는 것이 가능하지만(즉, LRD와 SRD 동시에 표현 가능), 파라미터 추정이 어려운 문제점이 있다.

4.4 모델 비교

본 논문에서는 앞에서 기술한 바와 같이 RMD, 중첩된 ON/OFF 소스 모델, FFT-FGN 등 세 가지 방법을 사용하여 모델링하였다. 본 절에서는 이들의 성능을 분석하여 본 논문에서 적용하기 위한 기준으로 검증하고자 한다.

먼저, 계산 복잡도 측면에서는 FFT-FGN과 RMD가  $O(n \log n)$ 으로 우수하다. 다음으로 FFT-FGN과 RMD는 근사적인 자기유사 모델링인 반면, 중첩된 ON/OFF 소스 모델은 개별 소스를 모델링하고 이를 합성한 결과를 출력 시퀀스로 사용함으로써 다른 두 방법에 비해서 보다 정확한 모델링 방법이라고 할 수 있다. 세 번째로, 위의 방법들은 모두 카운트 프로세스(count process)인데, 이를 도착 간 시간 간격으로 변환하기 위한 방법이 어렵다. 이것은 이들 모델에 대해 직접적으로 변환할 수 있는 방법의 난이도가 너무 높아서 구현하기 힘들기 때문이다. 가장 간단하게 균일 분포로 구하는 방법도 있지만, 이러한 경우는 모델링의 자기유사성이 보존되는가에 대한 보장이 없다. 마지막으로, 시뮬레이션에서도 마찬가지로 이 모델링 결과들을 측정에 적용하기 위해서는 모델링의 결과 값이 거의 실시간적으로 출력될 수 있어야 한다. 그러나 FFT-FGN과 RMD는 이 조건을 만족시키지 않는다. FFT-FGN은 한 번에 구할 수 있는 샘플 경로의 샘플 개수가 제한되어 있고, 경로 내의 모든 값을 사용하였을 경우에는 다시 샘플 경로를 구할 수 있는 시간을 확보하여야 한다. 따라서 연속성을 보장하기 위해서는 병렬 처리 구조가 되어야 한다. RMD도 마찬가지로 내삽법을 사용하여 특정 시간 구간내의 샘플 개수를 임의의 개수만큼 구하도록 만들어진 방법이기 때문에 FFT-FGN과 같은 문제를 가진다. 따라서 위의 비교를 통해 판단을 한다면, 위의 모델링 방법 중 본 논문에 적

용할 수 있는 방법으로는 중첩된 ON/OFF 모델이 가장 적합한 것으로 판단된다.

V. 성능평가

5.1 테스트베드 구성

실험을 위해 구성된 테스트베드는 그림 5에서 보는 같이, 최대 5개의 라우터로 구성되고 각 라우터에는 하나의 호스트가 부착되는 형태를 가진다. 본 테스트베드의 호스트와 라우터는 LINUX 기반의 Pentium PC로 구축되어 있다. 호스트는 트래픽 발생기 및 수신기의 역할을 하고, 라우터에 의해 DiffServ의 기능이 구현된다.

본 테스트베드 구성에 사용된 장비는 다음의 특징을 가진다.

- 라우터 간의 링크 : ATM 링크(155Mbps)
- 호스트와 라우터 사이의 링크 : Fast Ethernet (100Mbps)
- PVC 대역폭: 약 42.4Mbps정도(100,000 ATM 셀에 해당)
- 라우터의 성능: Pentium PC
- 호스트의 성능: Pentium PC
- DiffServ는 IPv4에서 동작
- 물리망은 ATM에서 동작(IPOA로 구현)

PVC(Permanent Virtual Circuit)의 대역폭을 약 42.4Mbps로 둔 것은 이 정도의 대역폭으로도 본 논문의 목적을 위한 실험으로는 충분한 값으로 판단되기 때문이다. 또한 본 실험을 위해 구성되어 있는 테스트베드는 상기의 장비 외에 FreeBSD 기반의 라우터들 및 호스트들로 구성되어 3개의 스위치에 의해 상호 연결되어 있다. 따라서 라우터 사이의 물리적 링크는 155Mbps를 경로별로 별도로 사용되는 것이 아니라 SVC(Switched Virtual Circuit)에 의해 여러 경로가 공유하므로, 이 스위치를 그대로 사용할 경우엔 대역폭 계산이나 예측이 쉽지 않기 때문이다.

또한 인터페이스의 MTU를 1500bytes로 제한하였

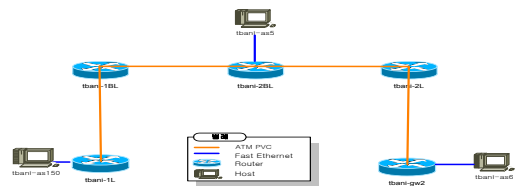


그림 5. 네트워크의 IP 레벨 토폴로지

으며, 출력 인터페이스의 버퍼 크기를 100으로 설정하였다. 본 실험에 사용한 수치들은 오버 헤드량을 제외한 값이다. 오버헤드에는 TCP/UDP 헤더, IP 헤더, MAC(Medium Access Control) 헤더 등이 포함되며, 이 양은 트래픽의 약 11%에 해당된다.

5.2 DiffServ 도메인 구성

이 실험을 위하여 DiffServ 도메인은 그림 6과 같이 라우터를 구성하였다. 여기에서 가운데 있는 라우터는 모두 코어 기능을 수행하고, 호스트에 부착된 라우터는 에지 라우터의 기능을 수행하거나, 호스트에서 EF(Expedited Forwarding) 및 BE(Best Effort) 클래스를 구분하는 DSCP(DS Code Point) 코드를 마킹하는 경우에는 코어 라우터의 기능을 하도록 설정하였다.

또한 도메인 구성을 위해서는 각 라우터 내부의 DiffServ 구성요소들을 설정하여야 한다. 그림 7은 한 노드 내에서 패킷을 처리하는 메커니즘을 설명하고 있다. 입력 인터페이스 쪽의 큐 선택 메커니즘은 입력 패킷을 저장시킬 수 있는 큐의 선택을 의미하고, 출력 인터페이스 쪽의 큐 선택 메커니즘은 네트워크 인터페이스로 패킷을 뺏아내기 위한 큐를 선택하는 것을 의미한다. 큐 관리 메커니즘은 각 큐마다 또는 각 클래스별로 별도로 운영될 수 있다.

입력 인터페이스의 큐 선택 메커니즘으로는 주로 DSMark를 이용한다. DSMark는 IPv4 헤더 내의 TOS 필드 값에 따라서 큐를 선택할 수 있도록 하는 방식이다. 출력 인터페이스의 큐 선택 메커니즘으로는 PQ(Priority Queueing), WFQ(Weighted Fair Queueing), WRR(Weighted Round-Robin), RIO(Round Robin with I/O), CBQ 등을 이용할 수 있다. 큐 관리 메

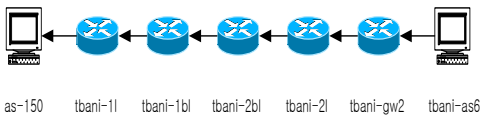


그림 6. 도메인 구성

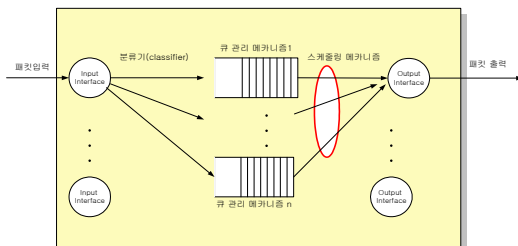


그림 7. 노드 내의 패킷 처리 메커니즘

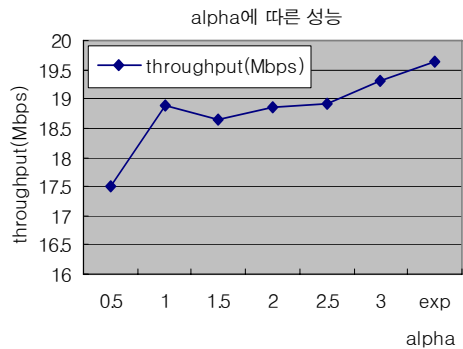
커니즘으로는 TBF(Token Bucket Filtering)나 RED(Random Early Detection), GRED(Generalized RED)와 같은 메커니즘을 사용한다.

5.3 성능 평가

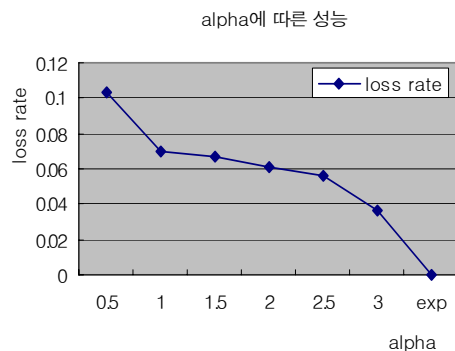
자기유사적인 트래픽이 다른 트래픽 흐름에 어떤 영향을 미칠지 다음의 실험을 통하여 관찰하였다. 자기유사 모델은 Aggregated On/Off 모델을 사용하였다. 이 모델에서 사용되는 두 가지 변수는  $k$ 와  $\alpha$  (alpha) 값이다(4.1 참조).  $k$ 는 생성되는 변수의 최하한 값을 의미하는 것으로 실험을 위해서는 우리가 얻고자 하는 시간 규모를 고려하여 적절한 값을 설정할 필요가 있다.

먼저, 개발한 모델이 자기유사성을 반영하는지 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. EF 대역폭을 18Mbps, BE 대역폭을 6Mbps로 설정한 후 EF 트래픽을 20Mbps를 30초간 부과하였다. 또한  $t\_interval$ 은 0.03초로 설정하였다. 여기서  $t\_interval$ : 트래픽의 버스트 단위를 시간으로 나타낸 것이다.

그 결과를 그림 8에 나타내었는데,  $\alpha$  값이 커질수록 기존의 지수모델에 가깝게 되어 처리율은 점점



(a) 처리율(Mbps)



(b) 패킷 손실률

그림 8.  $\alpha$  값에 따른 네트워크의 성능



더 20에 가깝게 되고 손실률 또한 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 본 실험에서 개발한 모델은 자기유사성을 잘 반영한다고 판단내릴 수 있다.

자기유사 트래픽에 대한 실험 항목은 하나의 TCP CBR 스트림에 대해 UDP인 자기유사 트래픽 한 스트림을 동시에 부과시킬 때  $H$ 를 0.5부터 시작해 0.9까지 증가시켜 가면서 성능을 관찰하고, 하나의 UDP CBR 스트림에 대해 UDP인 자기유사 트래픽 한 스트림을 동시에 부과시킬 때  $H$ 를 0.5부터 시작해 0.9까지 증가시켜 가면서 성능을 관찰하는 것이다.

이에 대한 실험 결과, 자기유사 트래픽과 CBR인 TCP/UDP 스트림을 중첩하였을 때 자기유사 트래픽이 BE 클래스일 경우는 CBR 트래픽의 성능이 영향을 받지 않는다. 자기유사 트래픽이 EF 클래스에 속하는 경우는, 비 DiffServ 도메인에서와 마찬가지로 UDP 보다는 TCP 트래픽이 성능이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한  $H$  값이 증가함에 따라 큰 버스트로 인하여 CBR 스트림의 성능에 많은 영향을 미치는 것이 확인되었다. 이 문제를 해결하기 위하여 본 실험에서는 기준치를 초과한 EF 트래픽에 대하여 폐기시키는 대신 BE 클래스로 QoS를 강등시키는 경우 성능이 우수함을 확인하였다.

다음 실험은 BE에 할당되는 링크의 용량을 고정하고 EF에 할당되는 링크 용량을 변화시켜가면서 EF의 대역폭이 잘 보장되는지 관측하는 실험이다. 본 실험에서는 BE 트래픽을 과부하로 걸고 EF 트래픽을 할당된 대역폭의 100%로 걸었을 경우, EF 대역폭이 잘 보장되는지 관찰하고, 성능이 기대치보다 많이 낮게 나올 경우 이들의 성능이 향상될 수 있도록 라우터 파라미터를 조정하기 위한 것이다. 본 실험에서 사용한 라우터 내의 구조는 그림 9와 같다. 기본적으로는 CBQ(Class-Based Queuing)를 적용하여 EF와 BE 클래스로 구분할 수 있게 하였으며, EF 클래스의 큐잉 관리는 TBFB에 의해서, BE는 RED에 의해서 수행되도록 하였다.

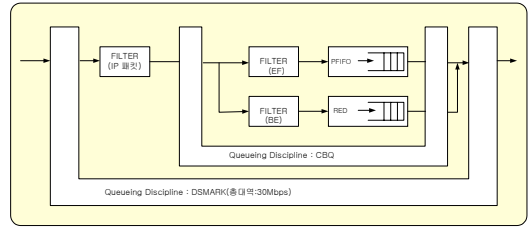


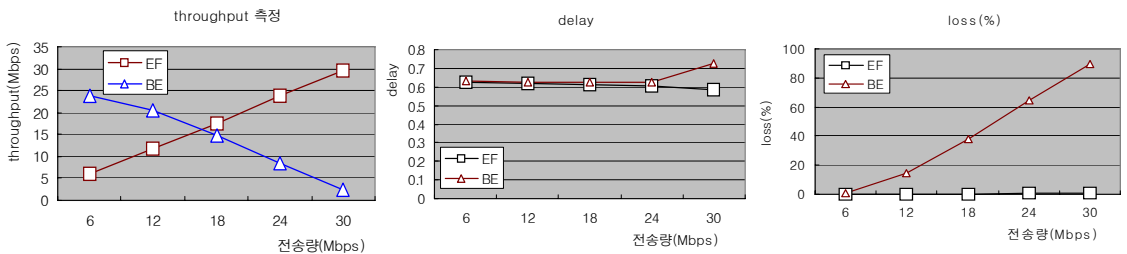
그림 9. 링크용량에 따른 성능 실험을 위한 큐잉 구조

표 1. CBQ 메커니즘 적용시의 파라미터

|                  | EF                      |                  | BE              |  |
|------------------|-------------------------|------------------|-----------------|--|
| 파라미터             | 설정값                     | 파라미터             | 설정값             |  |
| Bandwidth (Mbps) | 6, 12, 18, 24, 30       | Bandwidth (Mbps) | 6               |  |
| Maxburst         | 10                      | Weight(Mbps)     | 0.6             |  |
| Limit (PFIFO)    | 5                       | Avpkt            | 1000            |  |
| Avpkt            | 1000                    | Maxburst         | 21              |  |
| Weight (Mbps)    | 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 | Limit            | 60KB            |  |
| Bounded          | Yes                     | Min              | 15KB            |  |
| 패킷 크기(bytes)     | 1500                    | Max              | 45KB            |  |
|                  |                         | Burst            | 20              |  |
|                  |                         | Probability      | 0.4             |  |
|                  |                         | Bounded          | Yes, No(borrow) |  |

이 실험에 사용된 큐잉 메커니즘의 파라미터는 표 1과 같다. Weight는 bandwidth의 1/10 정도로 설정하였다.

그림 10은 UDP 트래픽에 대해 BE의 대역폭을 6Mbps로 고정하고 EF의 대역폭을 6-30Mbps까지 변화시키고 트래픽을 부과하였을 때의 성능이다. EF대역폭이 BE에 의해 침범되는지를 관찰하기 위하여 BE 트래픽은 24Mbps로 전송하였다. 또한 EF는 할당된 대역폭만큼만 전송하여 성능이 보장되는지 관찰하였다.



(a) EF 트래픽과 BE 트래픽의 전송률 비교 (b) EF 트래픽과 BE 트래픽의 중단간 지연 비교 (c) EF 트래픽과 BE 트래픽의 손실률 비교  
그림 10. 할당된 링크 용량에 따른 성능

(a)에서 보는 바와 같이 EF 트래픽이 낮은 경우에는 BE 트래픽이 남는 대역폭까지 활용하므로 BE의 전송률이 높지만 EF 트래픽의 양이 증가할수록 BE의 전송률은 낮아진다. 그러나 어떤 경우에는 EF의 전송률이 BE에 의해 침범되지 않는다는 것을 관찰할 수 있었다.

## VI. 맺음말

본 논문에서는 인터넷 트래픽의 특성인 자기유사성에 관하여 연구하였다. 우선 인터넷 상에서 실측 트래이스들을 분석함으로써 자기유사성의 경향을 확인하였다. 그 결과 거의 모든 트래이스에서  $H$  값이 0.6~0.9 정도로 높은 자기유사적 특성을 나타내었다. 또한 트래이스마다 그 패턴이 다양한 경향을 나타내어 하나의 일반적인 경향을 끌어낸다는 것은 어려웠다.

자기유사성은 장기간 의존성, heavy-tailed 분포, 스펙트럼 밀도에 의해 그 특성을 표현할 수 있는데, 이 중 heavy-tailed 분포가 구현에 쉽게 접근 가능하다는 점 때문에 많이 사용된다. 자기유사 모델은 FBM 및 FGN, F-ARIMA 등이 대표적인데, 그 중 FGN 등이 가장 신뢰적인 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서도 FGN을 모델링하는 방법들만을 고려하였다. FGN 특성을 표현하기 위한 트래픽 모델링 방법에는 지금까지 여러 모델이 제안되어 있는데, 그 중 FFT-FGN, RMD, 중첩된 ON/OFF 모델이 대표적이다.

FGN 트래픽 경로를 구현하기 위한 방법들 간의 비교는 주로 방법들 자체의 계산 복잡도와 실제의 자기유사 트래픽을 어느 정도 정확히 표현할 수 있는가에 의존한다. 계산 복잡도 측면에서는 RMD와 FFT가 타 방법들에 비해 우수하다. 그러나 이 방법들은 일정 개수의 샘플을 미리 구한 다음 그 값들을 사용하기 때문에 실시간적인 환경에 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 본 논문의 목적을 위해서는 중첩된 On/Off 소스 모델을 사용하는 것이 가장 바람직하다고 판단되어 이 모델을 이용하여 자기유사 트래픽을 생성하기 위한 트래픽 발생기를 OPNET으로 구현하였다. 구현된 자기유사 트래픽 발생기의 트래픽 데이터는 TCPdump를 사용하여 패킷 도착 간격을 조사하였으며, 자기유사 특성이 잘 만족됨이 확인되었다<sup>28)</sup>.

본 논문에서 구현된 트래픽 발생기를 이용하여 차등 서비스 망에 대한 성능평가를 수행하였다. 인터넷 QoS의 성능을 측정에 의해 평가하기 위해 하나의

DiffServ 도메인을 LINUX 기반의 테스트베드에서 구축하고 성능 평가를 수행하였다. 실험은 DiffServ의 EF 클래스와 BE 클래스를 대상으로 하여 다양한 시나리오에 따른 성능을 관찰하고 QoS 측면에서 그 성능을 평가하였다. 즉, DiffServ에서는 어떠한 경우에도 EF 클래스의 성능이 보장되어야 하며 이를 이해 본 논문에서는 다양한 실험을 수행하였다.

실험 항목은 TCP/UDP 트래픽에 대해 링크 용량 할당에 따른 성능, 패킷 크기에 따른 성능, 버스트 크기에 따른 성능, 스케줄링 메커니즘에 따른 성능, 라우터 개수에 따른 성능, 양방향 전송에 따른 성능, 다양한 형태의 트래픽 합성에 따른 성능을 고려하였다. 지면 관계상 이에 대한 성능평가 결과를 전부 제시할 수는 없지만, 이의 결과를 요약하면 다음과 같다.

프로토콜별 특성을 살펴보면, UDP의 성능은 버스트 특성 및 패킷 크기에 대해 모두 민감한 경향을 나타낸다. 반면 TCP의 성능은 패킷 크기에는 크게 영향을 받지 않고 버스트 특성에만 민감한 경향을 가진다. 링크 용량과 부과되는 트래픽 부하량에 따른 실험에서는 BE 트래픽으로 인해 EF 대역폭이 영향을 받는지 아니면 보장이 잘 되는지를 측정하였다. 실험 결과는 TCP/UDP 모두에 대해서 BE의 영향을 거의 받지 않음이 밝혀졌다. 대신 많은 큐잉 파라미터의 튜닝이 필요했는데, 위의 실험 결과를 만족시킬 수 있는 조건은 EF 클래스의 큐 구조가 수용할 수 있는 버스트 크기가 일정한 값 이상이 되어야 한다는 것이다. 또한 그 값이 크면 성능도 어느 정도는 향상이 되어졌다. 이것은 EF 트래픽에 대해서도 큐잉이 절대적으로 필요하다는 의미가 되기도 한다. 하지만 큐 크기가 커지는 것은 트래픽의 지연을 만족시키지 못할 경우도 있다는 것을 의미할 수도 있고, 반면 이러한 지연을 만족시키기 위해 버퍼 크기에 제한을 두는 것은 손실이 많이 발생한다는 것을 의미할 수도 있다. 그러므로 EF의 대역폭이 보장받는 범위 내에서는 다른 자원은 최소화되도록 설계되어야 한다. 이러한 조건이라면 라우터 구조 내의 메커니즘에는 성능이 크게 영향을 받지 않는 것으로 실험 결과 나타났다.

또 한 가지 EF의 QoS 성능에 영향을 미치는 요인은 트래픽을 중첩시킬 때의 문제이다. 이미 BE는 EF의 대역폭에 별 영향을 미치지 않음을 실험결과로 확인하였기 때문에, 이번에는 EF 트래픽만 고려하여 스트림 중첩에 따른 성능을 실험하였다. 그 결과, TCP는 UDP에 의해 영향을 받는다. 특히 UDP는 원

하는 처리율을 그 클래스의 최대 대역폭까지 활용할 수 있는 반면 TCP의 경우에는 UDP 트래픽이 크면 전송이 제대로 수행되지 않는 현상도 발견할 수 있었다. 그러므로 TCP의 전송이 제대로 이루어지기 위해서는 에지 라우터에서 이러한 현상이 발생하지 않도록 UDP 스트림을 제어할 필요도 있다. 또 자기유사 트래픽과의 합성 실험에서는 트래픽이 과부하로 걸릴 경우는 자기유사 트래픽의 처리율이 기대치보다 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경우 경계치를 넘어선 트래픽을 폐기시키지 않고 BE 클래스로 내려 보내는 메커니즘을 이용할 경우 훨씬 성능이 효율적이라는 것을 확인할 수 있었다.

지금까지의 실험 결과로 미루어 본다면 EF 클래스의 QoS 보장은 BE에 의한 영향은 거의 무시할 수 있을 만큼이지만, EF 클래스 내부의 트래픽 합성에 의해 성능에 많은 영향을 받는다고 판단내릴 수 있다. 그러므로 EF 클래스 내부의 트래픽 패턴에 대해 훨씬 더 다양한 형태의 시나리오를 만들어 정밀한 측정을 수행할 필요가 있다고 판단된다.

라우터의 트래픽 수용 능력은 QoS 보장과 밀접한 관련성을 가진다. 이러한 트래픽 수용 능력은 라우터의 내부 메커니즘 및 메커니즘 구성에 사용된 수치의 의해 결정되지만, 이러한 수치는 개별 라우터 레벨에서가 아니라 여러 노드를 거치는 구조에 의해 만족될 수 있어야 한다. DiffServ 구조는 기본적으로는 영역 내부에서 QoS가 만족될 수 있도록 구현된다. 중단간에 QoS가 보장되도록 하는 메커니즘이 필요하지만, 이것은 영역 간에는 SLA 협상은 기술적인 관점이 아니라 정책적인 관점이므로 본 논문의 영역에 포함되지 않는다. 그러므로 영역 레벨로 QoS를 보장하는 것이 타당성이 있다고 보여진다.

향후 자기유사 트래픽 모델을 이용하여 대규모 망의 성능 모의실험을 위한 시뮬레이터 설계를 수행하고자 한다.

### 참 고 문 헌

[1] W. E. Leland and Murad S. Taqqu, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic(Extended Version)", 1994.  
 [2] M. Crovella and A. Beswtavros, "Self-similarity in World-Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes", *Proc. Of ACM Sigmetrics Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, May 1996.  
 [3] Garret, M., and Willinger, W., "Analysis,

Modeling and Generation of Self-similar VBR Video Traffic," *Proceedings, SIGCOMM 94*, August 1994.

[4] A. Erramilli, O. Narayan and W. Willinger, "Experimental Queueing Analysis with Long-range Dependent Packet", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, April 1996.  
 [5] V. Paxson and S. Floyd, "Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, June 1995.  
 [6] S. Giordano, M. Pagano, R. Pannocchia and F. Russo, "A New Call Admission Control Scheme Based on the Self Similar Nature of Multimedia Traffic", *Proc. of ICC'96*, Vol.3, June 1996.  
 [7] N. Likhanov and R.R. Mazumdar, "Cell Loss Asymptotics in Buffers fed with a large number of Independent Stationary Sources", *Proc. of INFOCOM'98*, Vol. 1, Marc. 1998.  
 [8] S. Giordano, M. Pagano, F. Russo and S. Tartarelli, "Efficient Estimation of Buffer Occupancy in ATM Systems Loaded by Self-Similar Traffic", *Proc. of IEEE ATM'97 Workshop*, May 1997.  
 [9] Z. Sahinoglu and S. Tekinay, "On Multimedia Networks : Self-Similar Traffic and Network Performance", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 37 No. 1, pp.48-52, Jan. 1999.  
 [10] 주성돈, 이채우, "P2P 트래픽의 특성 분석과 트래픽 모델링", *한국통신학회논문지* 제 29권 제 2B호, pp.279-288, 2004년 2월.  
 [11] H. Kettani and J. A. Gubner, "A Novel Approach to the Estimation of the Hurst Parameter in Self-Similar Traffic", *Proc. of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks(LCN 2002)*, pp.160-165, Tampa, Florida, Nov. 2002.  
 [12] Karim M. Rezaul, Algirdas Pakstas, Robert Gilchrist, Thomas M. Chen, "HEAF: A Novel Estimator for Long-Range Dependent Self-similar Network Traffic(LNCS 4003)", *Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking(NEW2AN)*, pp.34-45, May 29-June 2, 2006.  
 [13] Karim Mohammed Rezaul and Vic Grout, "On Reducing the Degree of Long-range Dependent Network Traffic Using the CoLoRaDe Algorithm", *International Journal of Computer*

Science and Network Security(IJCSNS), Vol. 7, No. 4, pp.80-86, April 2007.

- [14] NLANR, <http://moat.nlanr.net/Traces>.
- [15] CAIDA, <http://www.caida.org>.
- [16] LBL, <http://www.ita.ee.lbl.org>.
- [17] W. Stallings, High\_Speed Networks : TCP/IP and ATM Design Principles, *Prentice-Hall*, 1998.
- [18] D. Duffy, A. McIntosh, M. Rosenstein and W. Willinger, "Statistical Analysis of CCSN/SS7 Traffic Data from Working CCS Subnetworks", *IEEE Jour. On Selected Areas in Communications*, April 1994.
- [19] D.R. Cox, "Long-Range Dependence: A Review", in Statistics: An Appraisal, Proc. Pf 50<sup>th</sup> Anniversary Conference, *Iowa State University Press*, pp.55-74, 1984.
- [20] W.C. Lau, A. Erramilli, J. L. Wang and W. Willinger, "Self-Similar Traffic Generation: The Random Midpoint Displacement Algorithm and Its Properties", 1995.
- [21] P. Flandrin, "Wavelet Analysis and Synthesis of Fractional Brownian Motion", 1992.
- [22] V. Paxson, "Fast Approximation of Self- Similar Network Traffic", 1995.
- [23] K. Nichols and B. Carpenter, "Definition of Differentiated Services Per Domain Behaviors and Rules for their Specification", *IETF Internet Draft*, June 2000.
- [24] T. Ferrari, "Differentiated Services: Experiment Report", *TF-TANT Task Force*, May 2000.
- [25] G. Almes and S. Kalidindi, "A one-way delay metric for IPPM", *RFC 2679*, Sept. 1999.
- [26] G. Almes and S. Kalidindi, "A one-way packet loss metric for IPPM", *RFC 2680*, Sept. 1999
- [27] G. Almes and S. Kalidindi, "A round trip delay metric for IPPM", *RFC 2681*, Sept. 1999. 0
- [28] J. Roberts, U. Mocci and J. Virtmo, Broadband network teletraffic: Performance evaluation and design of broadband multi-service networks, *Springer*, 1996.

**박 정 숙 (Jeong-Sook Park)**

정회원



1994년 2월 효성여자대학교 전자계산학과 학사  
 1996년 8월 대구효성가톨릭대학교 전산통계학과 석사  
 2001년 2월 대구가톨릭대학교 전산통계학과 박사  
 2001년 2월~현재 한국전자통신연구원 근무

<관심분야> 성능평가, 인터넷 트래픽 측정, 신뢰보안 컴퓨팅

**전 용 희 (Yong-Hee Jeon)**

종신회원



1971년 3월~1978년 2월 고려대학교 전기전자전공학과  
 1985년 8월~1987년 8월 미국 플로리다공대 대학원 컴퓨터공학과  
 1987년 8월~1992년 12월 미국 노스캐롤라이나주립대 대학원 Elec. and Comp. Eng. MS, Ph. D.

1978년 1월~1978년 11월 삼성중공업(주)  
 1978년 11월~1985년 7월 한국전력기술(주)  
 1979년 6월~1980년 6월 벨기에 벨가통신사 연수  
 1989년 1월~1989년 6월 미국 노스캐롤라이나주립대 Dept of Elec. and Comp. Eng. TA  
 1989년 7월~1992년 9월 미국 노스캐롤라이나주립대 부설 CCSP (Center For Comm. & Signal Processing) RA  
 1992년 10월~1994년 2월 한국전자통신연구원 광대역 통신망연구부 선임연구원  
 1994년 3월~현재 대구가톨릭대학교 컴퓨터·정보통신 공학부 교수  
 2001년 1월~2006년 12월 한국통신학회 학회지 편집위원  
 2001년 3월~2003년 2월 대구가톨릭대학교 공과대학장 역임  
 2004년 2월~2005년 2월 한국전자통신연구원 정보보호 연구단 초빙연구원  
 2008년 1월~ 현재 한국정보보호학회 부회장  
 <관심분야> 네트워크 보안, BcN QoS & Security, 웹 모델링 및 대응 기술, 통신망 성능분석