

OPNET을 이용한 자기유사성 트래픽 발생기 설계 및 성능 평가

정희원 한 경 은*, 준회원 정 광 본**, 정희원 이승현***, 김 영 천*

Implementation and Performance Evaluation of Self-Similar Traffic Generator Using OPNET

Kyeong-Eun Han* *Regular Member*, Kwang-Bon Jung** *Associate Member*,
Seung-Hyun Lee***, Young-Chon Kim* *Regular Members*

요 약

최근 인터넷 사용자가 급증함에 따라 전체 인터넷 트래픽의 90% 이상을 차지하는 IP 트래픽이 통신망 성능에 미치는 영향은 매우 크다. 따라서 효율적인 망의 설계와 설계된 망의 정확한 성능 평가를 위하여 IP 트래픽의 특성을 반영한 자기유사성(self-similarity) 트래픽 발생기의 설계는 매우 중요하다. 본 논문에서는 OPNET을 이용하여 자기유사성 트래픽 발생기를 설계한다. 이를 위해 Pareto 분포를 갖는 ON-OFF 소스를 이용하고, 이를 다중화하여 중첩시킴으로써 자기유사성의 특성을 구현하였다. 또한 구현한 자기유사성 트래픽 발생기의 성능 평가를 위하여 다양한 통계학적인 접근방법을 통해 자기유사성의 특성을 분석 검증하고, 입력부하 및 다중화 된 소스의 개수에 따른 영향을 분석하였다. 설계된 자기유사성 트래픽 발생기는 유무선 통신망 모델 구현 및 성능 평가 시 IP 트래픽 발생기로 활용될 수 있으며, 자기유사성 트래픽 모델링에서 요구되는 구체적인 파라미터 값의 결정에도 도움이 될 것으로 기대된다.

Key Words : Self-similarity, traffic generator, OPNET, self-similar traffic, IP traffic

ABSTRACT

Recently, with the exponential growth of the number of Internet users, IP traffic which occupies more than 90 percent of the entire Internet traffic affects significantly to the performance of networks. Therefore, the design of the self-similar traffic generator reflected the feature of IP traffic is very important to design the networks efficiently and evaluate the performance of it correctly. In this paper, we design the self-similar traffic generator using OPNET. In order to implement the self-similar characteristics, ON-OFF sources with Pareto distribution are employed and aggregated. The designed self-similarity traffic generator is evaluated and verified with R/S plot, variance time(VT) plot under the various offered loads and the number of sources. It is expected that the designed self-similar traffic generator can be put to practical use when wire or wireless networks is designed and verified as well as it can be useful to decide the specific parameter value for Internet traffic modeling.

※본 연구는 KOTEF, OIRC 및 IITA의 지원으로 수행되었습니다.

* 전북대학교 컴퓨터공학과 (kahan, yckim@chonbuk.ac.kr), (° : 교신저자)

** 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (jkbom@postech.ac.kr),

*** 전북대학교 정보통신학과 (langly@chonbuk.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-09-389, 접수일자 : 2005년 10월 6일, 최종논문접수일자 : 2006년 2월 5일

I. 서론

현재 전 세계적으로 인터넷 사용자의 수가 폭발적으로 증가함에 따라 인터넷 트래픽은 이미 음성 트래픽을 상회하여 수개월 마다 2배씩 급증하는 추세에 있다. 전체 인터넷 트래픽의 90% 이상을 차지하고 있는 IP 트래픽은 기존의 전화망과 달리 자기유사성(self-similarity), 장기간 의존성(Long-Range Dependence: LRD), 무한 분산(Infinite Variance Syndrome) 등의 특성을 갖는다. 특히 IP 트래픽의 주요 특성인 자기유사성은 다중화의 정도나 측정하는 시간 단위에 관계없이 망 트래픽이 항상 불규칙적인 발생 분포를 나타낸다. 따라서 이러한 자기유사성은 다중화의 정도를 높임에 따라 평균에 수렴하는 특징을 갖는 전통적인 전화망이나 트래픽 생성에 적용되는 수학적 모델들과 달리 예측하기 매우 어려우며 망 설계 및 자원 관리, 트래픽 엔지니어링(Traffic engineering)을 더 어렵게 만드는 요인이 된다.

그러나 현재 대부분의 통신망의 성능 평가는 포아송(Poisson) 프로세스를 기반으로 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 프로세스를 기반으로 하는 기존의 큐잉 분석은 망의 용량 설계 및 성능 예측에 유용할 수 있다. 그러나 자기유사성을 갖는 실제 IP 트래픽의 특성을 정확히 반영하지 못함으로써 망이나 프로토콜 설계에 요구되는 여러 소자들의 용량 및 성능이 잘못 평가됨으로써 결국 재설계해야 하는 결과를 가져올 수 있다. 특히 고속/광대역 망의 경우 재설계 후 운용될 때까지 데이터의 손실률, QoS 보장 및 망의 이용률 관점에서 많은 부작용을 초래할 수 있다. 따라서 효율적인 망의 설계와 설계된 망의 정확한 성능 평가를 위해서는 IP 트래픽의 특성을 반영한 트래픽 생성기 모델이 요구된다.

인터넷 트래픽의 분석에 관한 연구는 1994년 Bellcore에서 인터넷 트래픽의 트레이스(trace)를 기반으로 시작되었으며, 이후 IP 트래픽의 자기유사성을 규명하고 그 특성이 망에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구가 활발히 진행되었다^[1-13]. 논문 [1], [11]은 제안한 수식 및 파라미터를 이용함으로써 자기유사성 트래픽을 생성할 수 있는 도대를 마련하였다. 논문 [1]에서는 자기유사성 트래픽 생성을 위하여 파레토(Pareto) 분포를 갖는 ON-OFF 중첩 모델과 $1/2 < H < 1$ 범위를 갖는 H 를 제안하였다. 또한 이를 기반으로 트래픽을 생성하고 생성된 트래픽이 자기유사성의 특성을 나타냄을 검증하였다. 논문

[11]에서는 컴퓨터에서 자기유사성 트래픽을 생성하기 위한 방법으로 특정값 C 를 제안하였다. 컴퓨터를 통해 발생된 파레토 분포는 컴퓨터 특성상 이산적 분포를 따르므로 실제 파레토 분포와 동일한 형태로 발생시키는 것이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위하여 논문 [11]에서는 제안한 C 를 ON-OFF 구간 결정 식에 적용하고 이를 기반으로 생성된 트래픽이 자기유사성의 특성을 나타냄을 확인하였다.

그러나 실제적으로 망의 성능 평가 수행을 위하여 자기유사성 트래픽 생성기의 설계가 매우 중요함에도 불구하고, 기존의 연구들은 자기유사성 트래픽 특성을 분석하고 발생시킨 트래픽이 자기유사성을 나타냄을 검증하는데 그쳤다.

따라서 본 논문에서는 망 설계자들이 통신망 모델 설계 및 성능 평가 시 IP 트래픽 발생기로 활용할 수 있도록 OPNET을 이용한 자기유사성 트래픽 생성기를 설계한다. 이를 위하여 (1) 자기유사성 트래픽 발생에 필요한 파라미터 값, (2) 설계를 위한 모델링 기법 및 적용 방법, (3) 생성되는 패킷의 길이, (4) 생성기의 On-Off 시간, (5) 자기유사성 측정을 위한 샘플링 방식을 고려하였으며, 이에 적합한 파라미터를 정의하고 설정한다. 이를 기반으로 파레토 분포를 갖는 ON-OFF 소스를 다중화하고 중첩시킴으로써 자기유사성 트래픽 생성기를 구현한다. 설계된 생성기를 통해 발생된 트래픽에 대하여 시간, 자기유사성의 강도, 장기간 의존성 관점의 다양한 통계학적 접근 방법을 통하여 자기유사성을 검증하고, 입력 부하와 다중화된 소스개수에 따른 성능 평가 및 분석을 수행한다. 설계된 자기유사성 트래픽 생성기는 다양한 파라미터 값의 적용이 가능하므로 다양한 강도를 갖는 인터넷 트래픽을 생성할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 자기유사성 트래픽의 특성을 살펴보고 3장에서는 파레토 분포를 이용하여 자기유사성을 갖기 위한 파라미터를 정의한다. 또한 이를 기반으로 OPNET 환경에서 ON-OFF 트래픽모델을 통해 자기유사성 트래픽 발생기 설계 및 검증을 수행한다. 4장에서는 설계한 트래픽의 성능평가를 수행하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 자기유사성

자기유사성은 다중화의 정도 또는 측정하는 시간 단위나 다중화 정도에 관계없이 망 트래픽이 항상

불규칙적인 발생 분포를 나타낸다. 이러한 자기유사성은 장기간 의존성과 깊은 연관을 갖는다. 장기간 의존성은 트래픽의 연속발생(clustering) 또는 버스티(bursty) 특성이 지속되는 것을 의미한다. 이러한 특징은 자기공분산(autocovariance) 관점에서 정의될 수 있다. 장기간 의존성을 정의하기 위한 파라미터들은 다음과 같다^[10, 11].

- $Y(t)$: 누적(cumulative) 프로세스 (packet/byte)
- X_t : $Y(t)$ 의 증분(incremental) 프로세스
 $X_t = Y(t+1) - Y(t)$
- $X_s^{(m)}$: X_t 의 통합(aggreated) 프로세스
 $X_s^{(m)} = \frac{1}{m} [X_{sm-m+1} + X_{sm-m+2} + \dots + X_{sm}]$
- $r(k)$: 자기공분산 함수
 $r(k) = E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)]$

여기서 $X_x^{(m)}$ 는 본래의 이산 계열(series) X_x 에서 추출한 연속적인 m 개의 값들의 평균값을 의미한다. 예를 들어, 본래의 시계열(time series) $X(t)$ 가 [2, 7, 4, 12, 5, 0, 11, 8, 2, 3, 3, 5, 9, 0, 2, 7 ...]이고, $m=2$ 라고 가정하면 이때 통합된 계열(aggreated series)는 각각 2개씩 묶어서 평균 낸 값과 같다. 즉 [4.5, 8.0, 2.5, 9.5, 2.5, 4.0, 4.5, 4.5...]가 된다. 마찬가지로 $m=5$ 이면, 통합된 계열은 [6.0, 4.8, 3.8 ...]가 된다.

만약 $X_x^{(m)}$ 이 독립적이고 이상적으로 분산되었다면, 분산값은 $Var(X_s^{(m)}) = \sigma^2/m$ 으로 정의되며 일반적으로 $1/m$ 의 비율로 감소한다. 그러나 자기유사성의 과정에서는 중첩된 프로세스의 분산값이 $1/m^2$ 보다 더 느린 속도로 0으로 수렴한다. 자기유사성을 갖는 트래픽은 부분적인 트래픽 특성이 전체 트래픽의 특성을 닮기 때문에 원래 생성된 트래픽과 그 트래픽을 시간 관점에서 확장한 트래픽은 동일한 특성을 나타낸다. 즉, $r^{(m)}(k) = r(k)$ 이라고 가정했을 때 이 프로세스는 정확하게 자기유사성을 갖게 되며, 만일 $\lim_{m \rightarrow \infty} r^m(k) = r(k)$ 이라면 점근적인 자기유사성을 갖는다. 트래픽의 자기유사성은 Hurst 파라미터 H 에 의해서도 정의되는데, H 는 자기유사성을 위한 중요한 파라미터로써 통계적인 현상의 지속성(persistence) 및 확률 과정의 장기간 의존성을 평가하는 척도가 된다. 만일 모든 $k > 0$ 고 $t \geq 0$ 인 경우에 대하여 $Y(t) = k^{-H}Y(kt)$ 일 때 트래픽은 자

기유사성을 갖는다. 따라서 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$\begin{aligned} X^{(m)} &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m X(t) = \frac{1}{m} [Y(m) - Y(0)] \\ &= \frac{m^H}{m} [Y(1) - Y(0)] = m^{H-1} X \end{aligned}$$

$X^{(m)} = m^{H-1}X$ 인 경우 프로세스는 정확하게 자기유사성을 가지며, $\lim_{m \rightarrow \infty} X^{(m)} = m^{H-1}X$ 인 경우에는 점근적인 자기유사성을 갖는다고 한다. 여기서, X 는 망 측정을 위한 프로세스들의 연속적인 시간 간격에서 패킷 또는 바이트의 수이다. 이는 X 가 t 만큼의 간격을 두고 관찰되었다는 것을 나타낸다. 트래픽이 장기간 의존성을 갖는다고 해서 모두 자기유사성을 갖는 트래픽은 아니며, 다만 $1/2 < H < 1$ 인 경우에 프로세스는 장기간 의존성을 갖는 자기유사성 트래픽이라고 할 수 있다. 이때, $H=0.5$ 인 경우 트래픽은 자기유사성을 갖지 못하며, H 가 1에 가까울수록 지속성과 장기간 의존성의 정도가 강해진다.

III. OPNET을 이용한 자기유사성 트래픽 생성기 설계

3.1 시뮬레이션 파라미터 설정

자기유사성 또는 장기간 의존성을 갖는 트래픽은 파레토 분포를 이용하는 다수의 트래픽 소스들을 다중화하여 생성할 수 있다. 다수의 트래픽 소스들은 각각 독립적인 연결로 간주되며, 각각의 연결에 대해 서로 다른 크기의 패킷을 생성한다. 그림 1은 파레토 분포를 갖는 N 개의 ON-OFF 소스에서 발생한 패킷들이 하나의 출력으로 중첩됨으로써 재구성되는 자기유사성의 트래픽 모델을 나타낸다.

패킷은 ON 시간 동안 발생되며 OFF 시간 동안 발생하지 않는다. ON구간에 대한 파레토 분포 시퀀스를 생성하기 위하여 다양한 크기의 패킷 트레인(train)을 사용할 수 있다. 이때 최소 크기의 패킷 트레인은 1로 설정하였으며, 이는 한 개의 패킷을 전송하는 것을 의미한다. 일반적으로 파레토 분포는 다음과 같은 PDF(Probability Density Function)을 갖는다.

$$P(x) = \frac{ab^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \quad x \geq b$$

여기서 α 는 shape 파라미터, b 는 x 의 최소값으로

location 파라미터를 나타낸다. 또한 자기유사성 트래픽을 생성하기 위해서는 α 가 1과 2사이에서 결정되어야 한다. 이때 파레토 분포에 대한 평균값은 $E(x) = \alpha b / (\alpha - 1)$ 이며, 파레토 분포를 생성하기 위한 일반식은 $X_{pareto} = b / U^{1/\alpha}$ 이다. 여기서 U 는 (0, 1] 범위에서 발생하는 균등(Uniform) 분포에 의해 결정되는 값이다. 그러나 실제적으로 컴퓨터는 U 값에 대하여 이산적인 값을 발생하기 때문에 이론적으로 발생하는 X_{pareto} 의 최대값을 생성할 수 없다^[11]. 또한, 파레토 분포에 의한 ON-OFF 트래픽의 생성은 입력 부하를 고려하여 결정되어야 한다. 따라서 주어진 입력 부하에 따른 트래픽을 생성하기 위하여 ON과 OFF의 shape 파라미터와 평균 ON 시간, 입력부하를 기반으로 OFF의 평균값과 OFF 시간의 최소값을 결정해야 한다.

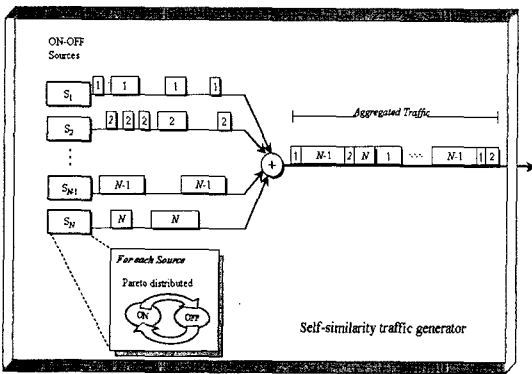


그림 1 자기유사성 트래픽 생성기 모델
Figure 1. Model of self-similar traffic generator

먼저 컴퓨터에 의해서 발생할 수 있는 U 의 최소값을 $S (\neq 0)$ 라고 하면, 이때 최대 X_{pareto} 값 $q = b / S^{1/\alpha}$ 이다^[10, 11]. 따라서 평균값 $E(X)$ 는 다음과 같이 다시 계산될 수 있다.

$$E(X) = \frac{\alpha b}{\alpha - 1} \left[1 - \left(\frac{b}{q} \right)^{\alpha - 1} \right] = \frac{\alpha b}{\alpha - 1} \left[1 - S^{\frac{\alpha - 1}{\alpha}} \right] \quad (1)$$

또한 특정 트래픽 소스 i 에서 ON 시간의 평균값을 \overline{ON}_i , OFF 시간의 평균값을 \overline{OFF}_i 라 할 때, ON-OFF 모델에서 입력부하(L_i)는 식 (2)과 같다.

$$L_i = \overline{ON}_i / (\overline{ON}_i + \overline{OFF}_i) \quad (2)$$

이때, 식 (1)에서 구한 on 구간과 off 구간에 대

한 평균값을 식 (2)에 대입하여 \overline{OFF}_i 에 관하여 정리하면, $b_{on} = 1$ 일 때, 식 (3)을 얻을 수 있다. 이를 통하여 최소 off 구간(b_{off})을 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha_{off} b_{off}}{\alpha_{off} - 1} \left[1 - S^{\frac{\alpha_{off} - 1}{\alpha_{off}}} \right] \\ & = k \frac{\alpha_{on} b_{on}}{\alpha_{on} - 1} \left[1 - S^{\frac{\alpha_{on} - 1}{\alpha_{on}}} \right] \left[\frac{1 - L_i}{L_i} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, α_{on} , α_{off} 는 각각 ON, OFF 상태에서의 shape 파라미터이고, b_{on} , b_{off} 는 각각 ON과 OFF 시간의 최소값을 의미한다.

파레토 분포가 연속적인 샘플(sample)로 가정된 반면, 컴퓨터는 균등한 분포를 가진 이산적인 값을 생성한다. 따라서 컴퓨터에서 파레토 분포를 따르는 값을 생성할 때, 척도(scale)가 낮은 부분에서 높은 밀도를 나타내는 분포를 갖게 된다. 이를 해결하기 위하여 C 를 식(3)에 곱해준다^[11]. 이때, C 는 S 와 shape 파라미터 α 에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$C = \frac{(1 - S^{1 - \frac{1}{\alpha}})}{(1 - \frac{1}{\alpha})}$$

본 논문에서는 ON 구간과 OFF 구간에 따라 별도의 shape 파라미터 α_{on} , α_{off} 를 가지므로, 각 on, off 구간에 따른 C 를 계산할 수 있다. 이때 각 구간에 대한 C 를 C_{on} , C_{off} 로 정의한다. 따라서 C 를 고려하여 b_{off} 에 대해 다시 정리하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$b_{off} = k \frac{C_{on}}{C_{off}} \frac{\alpha_{off} - 1}{\alpha_{off}} \frac{\alpha_{on} b_{on}}{\alpha_{on} - 1} \frac{[1 - S^{\frac{\alpha_{on} - 1}{\alpha_{on}}}] [1 - L_i]}{[1 - S^{\frac{\alpha_{off} - 1}{\alpha_{off}}}] \left[\frac{1 - L_i}{L_i} \right]}$$

본 논문에서는 자기유사성을 갖는 트래픽 설계를 위하여 $N(=1, 50, 100, 200, 400)$ 개의 독립적이고 동등한 ON-OFF 소스 모델을 중첩시킨다. 각 소스들이 생성하는 입력부하 L_i 는 L/N 으로 동일한 트래픽을 생성하도록 설정하였다. 또한 shape 파라미터 α 는 일반적으로 OFF 시간보다 ON 시간에 더 큰 값을 가져야하므로^[11], on, off 구간에 따라 각각 $\alpha_{on} = 1.2$, $\alpha_{off} = 1.1$ 로 설정하였다. 따라서 $H = (3 - \alpha) / 2$ 의 관계식에서 H 는 ON, OFF 상태

일 때 각각 $H_{on} = 0.9$, $H_{off} = 0.95$ 로 결정된다.

또한 컴퓨터에 의해 발생할 수 있는 최소값 S 는 $1/2^{31}$ 로 설정하였으며, $b_{on} = 1$, $b_{off} = 0.60785$, 계수 $C = (1.19\alpha - 1.166)^{-0.027}$ 로 설정하였다. 각 ON-OFF 소스 모델은 각각 파레토 분포를 따르며, 발생하는 패킷 크기는 IP 패킷 크기 분포에 따라 결정된다. 표 1과 2는 각각 IP 패킷 분포와 트래픽 설계를 위하여 본 논문에서 설정한 파라미터를 나타낸다.

표 1. 패킷 길이 분포^[14]
Table 1. Packet length distribution^[14]

Packet Size(Bytes)	Probability
64	0.03
64 ~ 580	0.17
580	0.18
580 ~ 1518	0.12
1518	0.50
Total	1.00

표 2. self-similar 트래픽 생성을 위한 파라미터
Table 2. Design parameters for self-similar traffic

Parameter	Description	Value
N	Number of sources	1, 50, 100, 200, 400
$\alpha_{on}, \alpha_{off}$	Shape parameters in on/off time	1.2, 1.1
b_{on}, b_{off}	Value of x in Pareto distribution in on/off time	1, 0.60785
C_{on}, C_{off}	Coefficient in on/off time	1.036836, 1.053916
S	Minimum value which can be calculated by computer	$1/2^{31}$
m	Number of aggregated time series	100~600

3.2 OPNET을 이용한 자기유사성 트래픽 생성기 구현

앞 절에서 자기유사성 트래픽 설계를 위하여 설정한 파라미터 값을 기반으로 OPNET 환경에서 트래픽 생성기를 구현하였다. 그림 2와 3은 OPNET을 이용하여 구현된 자기유사성을 갖는 트래픽의 노드 모델과 프로세스 모델을 나타낸다.

그림 2에서 트래픽 생성기 노드 모델은 하나의 'integrator' 프로세스와 200개의 'genN' 프로세스로 구성된다 ($N=1,2, \dots, 200$). 각 'genN' 프로세스는 파레토 분포를 따라 발생하는 동일한 양의 트래픽을

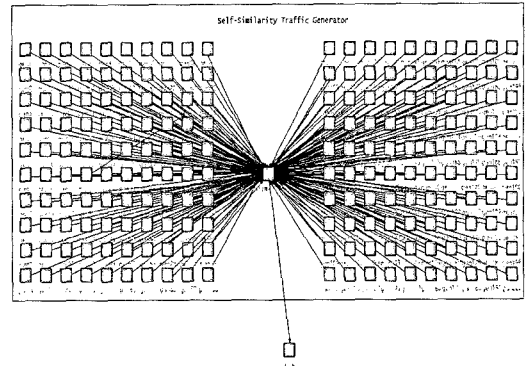


그림 2. OPNET에서 다중화된 ON-OFF 소스 노드 모델
Figure 2. ON-OFF source node model in OPNET

생성하여 'integrator' 프로세스에게 전달한다. 이때, 각각의 'genN' 프로세스들은 각각 독립적으로 연결된다. 'integrator' 프로세스는 'genN'으로부터 발생하여 유입된 소스 트래픽들을 중첩시키는 역할을 수행한다. 따라서 'integrator' 프로세스는 소스 트래픽들을 통합하여 자기유사성 트래픽을 발생시킨다.

그림 3은 'genN'의 프로세스 모델을 나타낸다. 'genN' 프로세스는 'init', 'on', 'off'의 세 가지 상태(state)로 구성되며 각 상태에서 입력부하, 패킷 크기, 결정된 b_{on} , b_{off} 값을 기반으로 요구되는 ON 시간과 OFF 시간을 결정한다. 패킷은 ON 시간동안에만 생성된다. 'genN'의 시작 시간(start time)은 설계자에 의해 정의된다. 각 상태에서 수행되는 기능은 다음과 같다.

- 'init' 상태: 정의된 시작 시간에 인터럽트를 수행하여 'on' 상태로 천이한다.
- 'on' 상태: 결정된 b_{off} 와 발생된 패킷 크기를 기반으로 ON 시간과 OFF 시간을 계산한다. ON 시간에 해당하는 패킷을 생성하여 전송한다. 이때, ON 시간 후에 인터럽트를 수행하도록 설정함으로써 'off' 상태로 천이한다 ('ACTIVE_TO_INACTIVE').
- 'off' 상태: 결정된 OFF 시간동안 아무것도 수행하지 않는다. OFF 시간 후에 인터럽트를 수행하도록 설정함으로써 'on' 상태로 천이한다 ('INACTIVE_TO_ACTIVE').

이때, ON 시간에 발생하는 패킷의 양은 생성되는 패킷의 길이에 비례하며, ON 시간과 OFF 시간은 수식 (2)와 같이 서로 밀접한 연관이 있다. 즉,

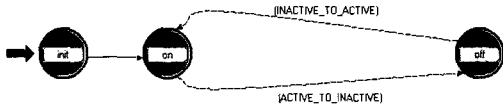


그림 3. ON-OFF 프로세스 모델의 상태도
Figure 3. ON-OFF process model in OPNET

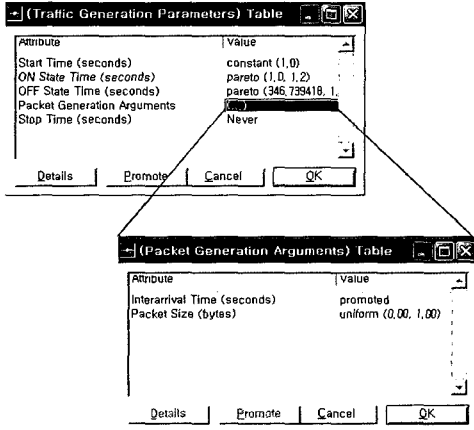


그림 4. OPNET에서 트래픽 발생 파라미터 설정 테이블
Figure 4. Traffic generation parameters table in OPNET

ON 시간이 길면, 이에 대응하는 OFF 시간도 길어지며 ON 시간이 짧으면 이에 대응하는 OFF 시간도 상대적으로 짧다. 또한 생성되는 패킷의 크기는 on 상태에서 결정된 ON 시간과 패킷 크기의 곱 ($time_{on} \times packet_size$)에 의해 결정된다.

그림 4는 자기유사성 트래픽을 생성하기 위해 설정된 트래픽 파라미터를 나타낸다. ON 시간의 Pareto (location, shape)는 각각 (1.0, 1.2)으로 설정되었으며, 이를 기반으로 OFF 시간의 location 파라미터가 결정된다. ON-OFF 프로세스 모델은 다음과 같이 수도 코드(Pseudo Code)로 나타낼 수 있다.

Pseudo Code

```

ON : Enter Execs
Link capacity is assumed as 1Gbps

if(current state is not ON_TO_ON)
    Change the state from ON_TO_OFF to ON_TO_ON
end if

if(current state is not ON_TO_ON)
    The magnitude of ip_packet is determined randomly
    by uniform distribution.
    magnitude of 3% of ip_packet is 40 bytes
    magnitude of 17% of ip_packet is 310bytes
    magnitude of 18% of ip_packet is 580bytes
    
```

magnitude of 12% of ip_packet is 1040bytes
magnitude of 50% of ip_packet is 1500bytes

The duration of ON_period and OFF_period are determined randomly by Pareto distribution.

Then, the actual time of ON_period and OFF_period in OPNET are calculated by dividing with link capacity

Sends the ip_packet during ON_period time.

```

ON_period time later, change the state from
ON_TO_ON to ON_TO_OFF
end if
    
```

```

OFF : Enter Execs
if(it is not over duration of simulation)
    Actual duration of ON_period later, change the state
    from ON_TO_OFF to ON_TO_ON
end if
    
```

PASS : Enter Execs

Receive the packets from each node and collect the information needed and destroy that.

IV. 성능 평가 및 분석

본 논문에서는 설계한 트래픽의 자기유사성을 검증하기 위하여 트래픽의 형태를 통한 자기발견적인 (Heuristic) 방법을 비롯하여 R/S plot, VT(Variance Time) plot 기법들을 사용하였다.

4.1 자기발견적 방법에 따른 검증

앞서 기술한 바와 같이 포아송 프로세스 기반의 트래픽은 측정하는 시간 단위 또는 다중화 정도의 증가에 따라 버스트의 특성을 잃고 평균에 수렴하는 특성을 갖는다. 반면 자기유사성 트래픽은 이와 관계없이 버스트한 성질을 그대로 유지한다. 따라서 그림 5와 같이 자기유사성 트래픽을 검증하기 위한 가장 일반적인 자기발견적 방법으로 시간 척도나 다중화의 정도에 따른 단위 시간당 발생한 패킷의 수 또는 단위 시간당 패킷의 바이트 수가 이용된다.

그림 5는 설계된 트래픽 생성기에서 발생하는 패킷의 개수를 시간 척도에 따라 측정했을 때 특성을 나타낸다. 그림 5-(a), (b), (c)에서 각각의 단위시간은 0.01초, 0.1초, 1초로 설정하였고 각 시간 단위에 대해 10,000개의 데이터 포인트를 갖도록 하였다. 따라서 각 단위 시간당 동일한 개수의 데이터

포인트를 얻기 위한 총 시간은 각각 10초, 100초, 1000초이다. 그림 5에서 발생한 트래픽 시간 척도에 관계없이 버스트 특성을 가지고 거의 동일한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 설계된 트래픽 생성기가 실제로 자기유사성 트래픽을 생성함을 입증한다.

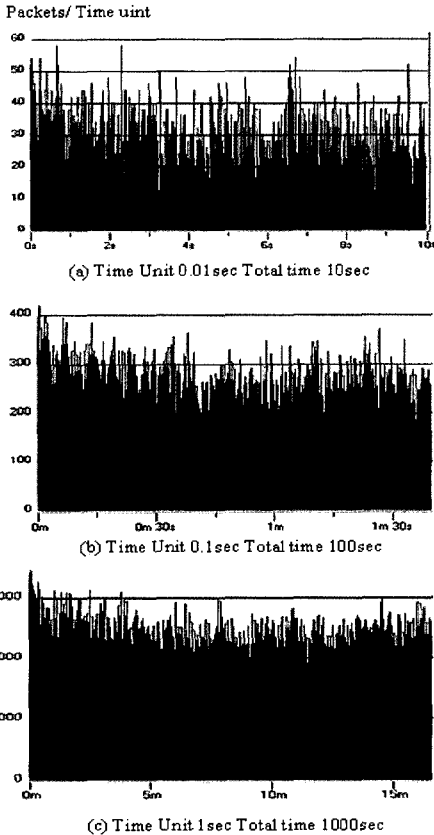


그림 5 시간 척도에 대한 설계된 자기유사성 트래픽 특성
Figure 5. Characteristic of designed self-similar traffic under time scale

4.2 RS plot에 따른 검증

R/S plot은 시간 영역에서 Hurst 영향에 따른 자기유사성의 강도를 측정하기 위하여 사용되는 일반적인 방법으로 $\log(n)$ 에 대한 $\log(R(n)/S(n))$ 의 값으로 정의된다. 여기서, n 은 자연수로서 데이터 포인트의 샘플링 간격을 의미하며, $R(n)$ 과 $S(n)$ 은 각각 조정된 범위 내에서 프로세스의 통계적 수치와 샘플(sample)의 표준 편차를 나타낸다^[1-4]. 샘플의 평균값을 $\bar{X}(n)$ 라 할 때, 샘플 정규화 프로세스 W_k 와 $R(n)/S(n)$ 에 관한 식은 식 (4), 식 (5)와 같이 정의된다.

$$W_k = (X_1 + X_2 + \dots + X_k) - k\bar{X}(n), \quad (k \geq 1) \tag{4}$$

$$R(n)/S(n) = [\max(0, W_1, W_2, \dots, W_n) - \min(0, W_1, W_2, \dots, W_n)]/S(n) \tag{5}$$

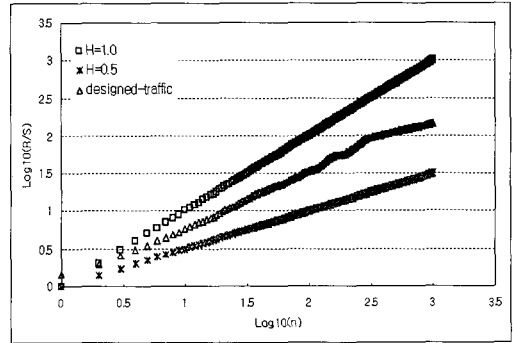


그림 6. 설계한 트래픽의 R/S plot
Figure 6. R/S plot of designed traffic

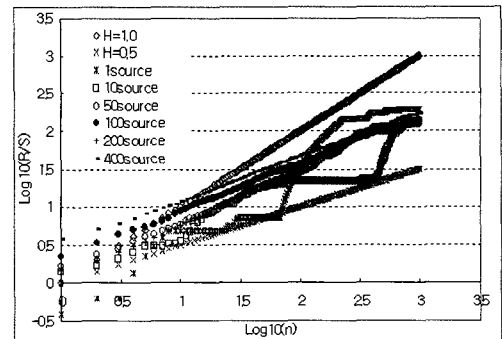


그림 7. 다중화 개수에 따른 R/S plot
Figure 7. R/S plot of the # of source

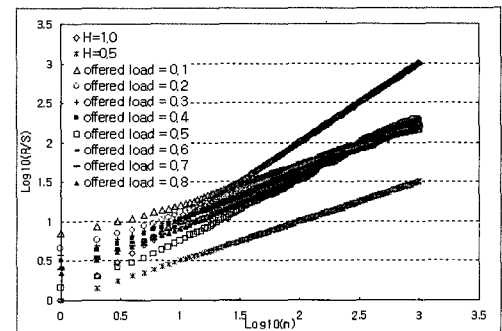


그림 8. 입력부하에 따른 R/S plot
Figure 8. R/S plot of the offered load

그림 6, 7, 8은 설계된 트래픽 생성기의 R/S plot을 나타낸다. 그림 6에서는 설계된 생성기에서 발생

하는 트래픽을 측정하여 R/S plot으로 나타냈을 때, 그 기울기가 0.5와 1 사이에 존재하는 것을 보여준다. R/S plot에서 기울기는 Hurst 파라미터 H 를 의미하며, 발생한 트래픽이 자기유사성을 갖기 위해서는 $0.5 < H < 1$ 값을 가져야한다. 그래프에서 알 수 있듯이 실제 발생한 트래픽의 Hurst 파라미터가 0.5와 1 사이에 존재하므로 설계한 트래픽은 자기유사성을 갖는다. 또한 H 가 1에 가까워짐에 따라 장기간 의존성의 정도는 증가한다.

그림 7은 다중화 된 소스의 수(N)에 따른 R/S plot을 나타내며 소스를 1, 50, 100, 200, 400개로 변화시켜가며 결과를 측정하였다. 소스의 개수가 증가 할수록 기울기는 0.5에 가까워지지만 여전히 자기유사성을 갖는 범위 안에 존재함을 확인할 수 있다. 다중화된 on-off 소스의 개수가 50 미만의 경우, H 가 0.5와 1 사이에 존재하나 $\log(n)$ 에 따라 H 값이 불안정한 양상을 보였다. 반면, 다중화된 on-off 소스가 50개 이상인 경우에 $\log(n)$ 에 관계 없이 기울기가 일정한 값을 보였다. 따라서 안정화된 자기유사성 트래픽을 생성하기 위하여 최소한 50개 이상의 on-off 소스 다중화가 필요함을 확인할 수 있었다.

그림 8은 입력 부하에 따른 R/S plot을 나타낸다. 입력 부하가 증가함에 따라 R/S plot은 좀 더 안정적이며 기울기가 1에 가까워진다. 이는 입력 부하가 증가함에 따라 자기유사성이 크게 나타나는 것을 반영한다. 입력부하가 증가함에 따라 특정 범위 내의 샘플의 수가 증가하고 이러한 샘플 수의 증가는 상대적으로 $R(n)/S(n)$ 에 대한 수식에서 X 와 W 를 증가시키게 되므로 기울기가 증가하게 된다. 실제 인터넷 트래픽에서도 입력 부하가 증가함에 따라 자기유사성의 강도가 커지므로^[2], 이러한 특성이 설계한 트래픽에도 반영됨을 확인할 수 있었다.

4.3 VT plot에 따른 검증

장기간 의존성의 정도는 트래픽의 버스트 특성을 반영하므로 자기유사성과 밀접한 관계가 있다. VT plot은 통합된 프로세스 $X_k^{(m)}$ 의 분산에 대한 분석을 수행함으로써 장기간 의존성의 정도를 측정하기 위한 방법이다. VT plot은 $\log(m)$ 에 대한 $\log(\text{var}(X_k^{(m)}))$ 값으로 나타낸다. 여기서, m 은 100이며, $\text{var}(X_k^{(m)})$ 은 $\text{Var}(X_k)/m^\beta$ 으로 치환이 가능하다. 따라서 이를 기반으로 VT plot의 기울기 $-\beta$ 와 H 의 관계는 $H=1-\beta/2$ 와 같이 결정된다. 따

라서 이러한 관계식을 기반으로 생성된 트래픽의 Hurst 파라미터 H 를 추정하기 위하여 VT plot을 이용할 수 있다.

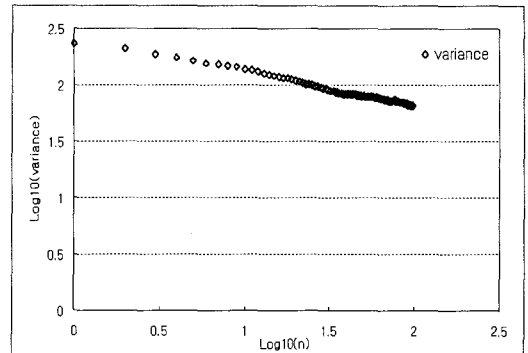


그림 9. 설계한 트래픽의 VT plot
Figure 9. VT plot of designed traffic

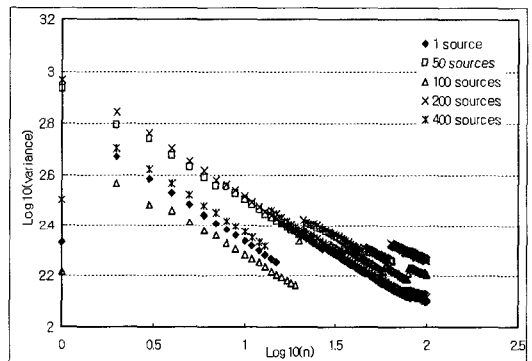


그림 10. 다중화 개수에 따른 VT plot
Figure 10. VT plot of the # of source

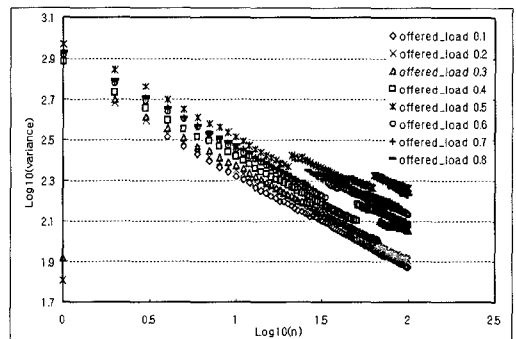


그림 11. 입력 부하에 따른 VT plot
Figure 11. VT plot of the offered load

그림 9, 10, 11은 설계된 트래픽 생성기의 VT plot을 나타낸다. 발생한 트래픽이 자기유사성을 갖기 위해서는 β 가 0과 1 사이에 존재하여야 한다.

그림 9에서 설계된 자기유사성 트래픽을 VT plot으로 나타냈을 때, 측정된 기울기(-β)는 -0.25임을 알 수 있다. 설계된 트래픽 생성기는 Hurst 파라미터를 $H=0.9$ 로 설정하여 트래픽을 발생시켰다. 따라서 H 와 기울기 β 에 대한 관계식을 이용하면 $\beta=0.2$ 를 구할 수 있다. 반면 실제 발생한 트래픽에서 측정된 기울기 β 는 0.25이므로, 실제의 Hurst 파라미터 H 는 0.875의 값을 갖는다. 따라서 설계된 자기유사성 트래픽 생성기는 분산 관점에서 기울기에 대한 성능은 80%이고, 산출된 H 관점에서 볼 때는 97.2%의 성능을 갖는다. 이는 R/S plot과 일치된 결과를 나타낸다.

그림 10은 다중화 된 소스의 수에 따른 VT plot을 나타낸다. 소스의 개수를 1, 50, 100, 200, 400으로 변화시켜가며 이에 따른 결과를 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 1개의 소스에서 발생한 트래픽과 다중화된 소스로부터 발생한 트래픽이 버스트의 특성을 계속 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 자기발견적 방법을 통하여 확인하였던 자기유사성 트래픽의 버스트한 특성을 재확인하는 결과이다.

그림 11은 입력부하에 따른 VT plot을 나타낸다. 입력부하가 증가함에 따라 기울기는 거의 0.25로 유사한 형태를 나타낸다. 이는 자기유사성의 강도가 입력부하와는 무관함을 의미한다. 그러나 입력부하가 높은 경우(0.5이상) 장기간 의존성의 정도가 더 강한 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

통신 서비스가 음성서비스 위주에서 인터넷 및 멀티미디어 서비스로 급속히 이행됨에 따라 통신망 역시 인터넷 서비스를 효율적으로 수용할 수 있도록 망구조 및 기능의 고도화를 요구하고 있다. 따라서 현재의 인터넷은 망의 신뢰성을 보장하면서 고속, 대용량의 전송 능력을 갖는 지능형 차세대 인터넷으로 발전되고 있다. 그러나 인터넷을 통한 다양한 서비스 제공과 서비스 품질 및 신뢰성을 보장할 수 있는 통신망 설계를 위해서는 전체 인터넷 트래픽의 90%이상을 차지하는 IP 트래픽의 특징을 반영한 통신망의 성능 평가가 요구된다. 따라서 효율적인 망의 설계와 설계된 망의 정확한 성능 평가를 위하여 IP 트래픽의 특성이 고려된 자기유사성 트래픽 발생기의 설계는 매우 중요하다.

본 논문에서는 OPNET 환경에서 자기유사성을

구현하고 적절한 파라미터를 추출하여 자기유사성을 갖는 트래픽 발생기를 설계하였다. 자기유사성을 구현하기 위하여 필요한 shape, location 파라미터를 결정하고, 이를 기반으로 파레토 분포를 갖는 ON-OFF 소스를 중첩시키는 방법을 사용하였다. 설계한 자기유사성 트래픽 발생기를 기반으로 자기발견적인 방법, R/S plot, VT plot 기법을 이용하여 자기유사성에 관한 검증을 수행하였다. 또한 입력부하와 다중화 된 소스 수에 따른 성능 평가를 수행하였으며, 이를 통해 설계한 트래픽 발생기의 H 가 0.875로 $0.5 < H < 1$ 조건을 만족시킴을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 트래픽의 개형과 R/S, VT plot의 기울기를 통해 설계된 트래픽이 자기유사성 트래픽의 조건을 만족시킴을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 자기유사성 트래픽 모델링에 요구되는 구체적인 파라미터 값을 제시하고 이를 구현함으로써, 앞으로 새로운 서비스를 수용할 수 있는 차세대 유무선 통신망 모델 구현 및 성능 평가에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic(Extended Version)", *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, Vol. 2, pp.1-15, Feb. 1994.
- [2] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, D. V. Wilson, "Self-Similarity Through High-Variability : Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, Vol. 5, pp. 71-86, Feb. 1997.
- [3] J. M. Bareló, L. I. Cerdà, J. García, "Conceptes fonamentals de xarxes de computadors. Un enfocament analític," http://people.ac.upc.es/joseb/CURSO_DOCT_joseb_TM_SelfSim.pdf
- [4] P. Pruthi, "Heavy-Tailed ON/OFF Source Behavior and Self-Similar Traffic", *ICC'95*, 1995.
- [5] A. Adas, A. Mukherjee, "On Resource Management and QoS Guarantees for long range dependent traffic," *IEEE INFOCOM'95*, pp. 779-787, 1995.

[6] R. Addie, M. Zukerman, T. Neam, "Fractal traffic: measurements, modeling and performance evaluation," *IEEE INFOCOM'95*, pp.977-984, 1995.

[7] N. Likhanov, B. Tsybakov. "Analysis of an ATM buffer with self-similar("fractal") input traffic," *IEEE INFOCOM'95*, pp.985-992, 1995.

[8] Kihong Park, Gitae Kim, Mark Crovella, "On the Effect of Traffic Self-Similarity on Network Performance," <http://citeseer.ist.psu.edu/88701.html>

[9] Thomas Karagiannis, Mart Molle, Michalis Faloutsos, "Long-Range Dependence: Ten Years of Internet Traffic Modeling," *Internet Computing September/October 2004*, Vol.8, pp.57-64.

[10] Glen Kramer, "Self-similar Network Traffic: the notion and effects of self-similarity and long range dependence," Presentation slides <http://www.csif.cs.ucdavis.edu/~kramer/publications.html>

[11] Glen Kramer, "On generating self-similar traffic using pseudo-Pareto distribution," Technical brief. <http://www.csif.cs.ucdavis.edu/~kramer/publications>

[12] M. Crovella and A. Bestavros, "Analysis, Modeling and Generation of Self-similar VBR Video Traffic," In Proc. ACM SIGCOMM'94, pp.269-280, 1994.

[13] C. Huang, M. Devetsikiotis, I. Lambadaris, and A. Kaye., "Modeling and Simulation of Self-similar Variable Bit Rate Compressed Video: A Unified Approach," In Proc. ACM SIGCOMM'95, pp.114-125, 1995.

[14] S. McCreary, et.al., "Trends in Wide Area IP Traffic Patterns," Cooperative Association for Internet Data Analysis, <http://www.caida.org>

한 경 은 (Kyeong-Eun Han)

정회원



2001년 2월 전북대학교 컴퓨터 공학과 졸업
2003년 2월 전북대학교 컴퓨터 공학과 석사
2004년 3월~현재 전북대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 광통신공학, WDM-PON, EPON, 매체접 근제어프로토콜, 네트워크 프로토콜

정 광 본 (Kwang-Bon Jung)

준회원



2006년 2월 전북대학교 컴퓨터 공학과 졸업
2006년 3월~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 네트워크 운용, 시스템 관리, 네트워크 보안

이 승 현 (Seung-Hyun Lee)

정회원



2004년 2월 원광대학교 컴퓨터 공학과 졸업
2006년 2월 전북대학교 컴퓨터 공학과 석사
<관심분야> 광통신공학, WDM 네트워크, 보호 복구, SoC 설계

김 영 천 (Young-Chon Kim)

정회원

한국통신학회 논문지 제19권 제2호 참조
현재 전북대학교 컴퓨터공학과 교수