

Poisson Shot-Noise 모델을 이용한 데이터 센터 네트워크 트래픽 생성 방법 연구 (A Traffic Generation Method for Data Center Network Traffic Using Poisson Shot-Noise Model)

한윤선¹, 유재형², 홍원기^{1,2}

¹ 포항공과대학교 정보전자융합공학부

² 포항공과대학교 컴퓨터공학과

{seon054, styoo, jwkhong}@postech.ac.kr

요 약

현재 데이터 센터 및 클라우드 컴퓨팅 기술의 발달로 인해, 관련된 연구들이 활발히 진행되고 있다. 데이터 센터를 대상으로 하는 대부분의 연구는 시뮬레이션 방법을 통해 방법의 실효성 및 효용성을 검증하고 있다. 하지만, 현재 대부분의 트래픽 생성 방법은 단순히 특정 트래픽의 크기만을 임의로 발생시키거나 인터넷에서 발생하는 트래픽의 특성만을 고려하고 있어, 데이터 센터를 대상으로 하는 시뮬레이션 방법에는 효과적이지 못하다. 따라서, 데이터 센터에서 발생하는 트래픽의 특성을 반영하는 트래픽 모델 및 생성 기법의 필요성이 대두된다. 본 논문에서는 데이터 센터에서 발생하는 네트워크 트래픽의 특성을 반영하여, 유사한 네트워크 트래픽을 가상으로 생성하는 방법을 제안한다. 이 때, 트래픽 생성의 목표는 특정 대상 링크에 흐르는 트래픽의 총량과 그 분산을 만족하도록 트래픽을 생성하는 것이다. 제안하는 방법은 단계는 네트워크 구조 파악, 거시적 특성 주입, 플로우의 5-튜플 결정, 플로우의 크기 결정, 플로우의 지속시간 결정, 트래픽 매트릭스 생성의 6 단계로 이루어진다. 제안하는 방법은 데이터 센터 트래픽의 특성을 반영하기 위한 모델로써 Poisson Shot-Noise 모델을 사용한다. 제안하는 방법은 Python 프로그래밍 언어를 통해 작성되었으며, Mininet 과 iPerf 를 연동 할 수 있도록 구현되었다. 생성된 유사 트래픽은 실제 데이터 센터에서 수집된 트래픽과 유사한 특성을 가지고 있음을 비교하여 검증 하였다.

Keywords: Cloud, Data Center Network, Traffic Generation, Poisson Shot-Noise Model

1. 서론

클라우드 컴퓨팅 기술의 발전과 더불어 대용량 멀티미디어 콘텐츠의 증가, 빅 데이터 분석 기술의 도입 등의 추세에 따라 기업, 정부 기관, 대학 등 다양한 기관 및 단체에서는 데이터 센터를 앞다투어 구축하고 있다. 더불어, 새로이 설치되는 데이터 센터는 기존에 비하여 규모가 커지고 복잡한 형태를 가지는 양상을 보이고 있다 [1]. 이와 더불어, 데이터 센터 및 클라우드 컴퓨팅과 관련하여 새로운 서비스의 개발, 자원 이용률 향상, 설치/운영 비용 감소와 같은 다양한 목적을 달성하기 위한 다양한 관련 연구들이 진행되고 있다. 데이터 센터를 설치 하거나 새로운 방법의 적용에 앞서, 구축을 목표로 하는 데이터 센터의 네트워크의 특성을 검증을 통해 요구사항들이 적절하게 반영되었는지를 판단하기 위한 방법이 필연적으로 요구된다.

새로이 개발 되거나 적용되는 기술들의 영향 및 새롭게 설치 되는 데이터 센터의 특성을 파악하기 위한 방법으로 시뮬레이션을 통한 검증이 널리 사용되고 있다. 데이터 센터를 대상으로 하는 시뮬레이션을 위해서는 가장 우선적으로 해결해야 하는 과제는 실제 응용들이 작동하고 있지 않는 상황에서, 실제 환경과 비슷한 형태의 네트워크 트래픽을 생성하는 것이다. 시뮬레이션 환경에서 실제 데이터 센터에서 작동하는 모든 응용들을 실행하여 실제 트래픽을 생성하는 것은 비효율적이며 실현이 거의 불가능하다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 대부분의 연구에서는 가상으로 네트워크 트래픽을 생성하거나 응용들을 생성하여, 이를 대상 데이터 센터 네트워크에 송출하여 그 양태를 관찰하는 방법이 있다. 하지만, 현재 대부분의 연구에서 사용하고 있는 네트워크 트래픽 시뮬레이션 방법은 일정한 크기의 트래픽을 생성하거나, 굉장히 단순한 모델에 따른 트래픽 생성을 주로 사용하고 있다. 또한, 현재 공개되어 있는 대부분의 트래픽 생성 기법, 도구, 장치들은 인터넷 백본 네트워크에서 발생하는 트래픽의 특성을 반영하도록 설계되어 있다 [2-5]. 따라서, 인터넷 백본 트래픽과 다른 특성을 지니고 있는 데이터 센터 네트워크를 대상으로 하는 경우 적합하지 않다. 따라서, 보다 정확한 데이터 센터 네트워크 특성 검증을 위해서는 데이터 센터 내부에서 발생하는 네트워크 트래픽에 대한 모델과 그 특성을 반영할 수 있는 트래픽 생성 방법이 요구 된다. 또한, 다수의 노드들로 구성되는 데이터 센터 네트워크의 특징을 반영하기 위해서는 일반적으로 단일의 노드 또는 장치로 구성되는 트래픽 생성 방법 및 장치는 데이터 센터 네트워크의 특성 검증 목적으로는 적합하지 않다.

가장 정확한 네트워크 트래픽 생성 방법은 데이터 센터 또는 네트워크를 구성하는 서버들로부터 실제 트래픽을 수집하여 원하는 형태 또는 특성을 반영하도록 가공하여 사용하는 것이지만, 이 방법의 경우 비효율적이며 생성하는 방법도 복잡하다. 더불어, 트래픽 수집을 위한 장치 및 방법이 필요하며, 정보 보안과 관련된 문제로 인해 실제 데이터를 수집하여 사용하는 것은 매우 어렵다. 이러한 이유로 인해 데이터 센터 네트워크 트래픽이 가지는 특성을 가지도록 임의로 데이터 센터 네트워크 트래픽을 생성하는 방법이 필요하다. 본 고에서는 Poisson Shot-Noise 모델 [6,7]을 이용하여 실제 데이터 센터 내에서 발생하는 네트워크 트래픽과 유사한 플로우 수준에서 관측되는 특성을 가지도록 가상 네트워크 트래픽 생성 기법을 제안한다.

제안하는 트래픽 생성 방법은 여러 선행 연구 [8-10]에서 파악된 데이터 센터 네트워크 트래픽의 특성을 반영하여 유사 네트워크 트래픽을 생성하는 일련의 과정이며, 이때 네트워크 트래픽의 특성을 적용하는 기본 단위는 트래픽 플로우이다. 본 제안 방법의 목적은 특정 대상 링크에 흐르는 트래픽의 총량과 총량의 분산을 만족시키도록 데이터 센터 트래픽을 생성하는 것이다. 트래픽 플로우에 특성을 주입 함으로써 실제 네트워크에서 발생하는 것과 비슷한 특성을 지니도록 하는 것에 본 제안 방법의 핵심이다. 이러한 특성의 종류로는 플로우의 발생 빈도, 시간 별 플로우의 발생 빈도의 차이, 내부 랙에서 흐르는 플로우의 비율, 플로우의 길이, 플로우의 크기가 있다. 제안하는 방법은 일련의 과정을 통해 유사 네트워크 트래픽에 대한 전체 정보를 담고 있는 플로우의 집합을 생성하게 된다. 생성된 플로우 집합을 이용하여 기존에 개발된 트래픽 생성기를 통해 실제 네트워크 패킷을 생성하도록 연동할 수 있도록 설계 되었다. 또한, 생성 과정을 특정 단위 시간 마다 주기적으로 반복 수행하여 시간에 흐름에 따른 네트워크 트래픽의 변화를 표현 할 수 있다. 제안된 방법을 통해 생성된 트래픽 매트릭스를 일련의 도구를 사용하여 트래픽을 생성하였을 경우, 생성된 네트워크 트래픽은 실제 데이터 센터에서 추출된 네트워크 트래픽과 유사한 특성을 가지고 있음을 비교를 통해 검증하였다.

2. 관련 연구

데이터 센터 (Data Center)는 일반적으로 다수의 서버 컴퓨터와 이들 사이의 연결을 위한 네트워크로 구성되는 시설을 지칭한다. 근래에 설치되는 데이터 센터는 수천 개 이상의 서버 컴퓨터로 구성되는 경우가 많으며, 이를 지원하기 위한 대용량 네트워크를 필수적으로 요구한다 [11]. 이러한 네트워크를 구성하기 위해 일반적으로 복수개의 최상위 노드로 구성된 트리 구조의 형태로 구성된다. 데이터 센터 네트워크에서 발생하는 트래픽이 인터넷 백본에서 수집되는 트래픽과 다른 특성을 가지는 가장 큰 이유는 실행되는 응용과 네트워크 구조의 차이에서 기인한다. 그림 1

은 일반적인 데이터 센터 네트워크의 3 계층 구조를 가지는 네트워크 구조를 도식화 한 것이다. 이러한 형태의 네트워크 구조에서 연관성이 높은 가상 머신들을 근거리에 배치하도록 하는데, 이로 인해 근거리에 위치한 노드 사이에 흐르는 트래픽의 비율이 랙 외부로 나가는 비율보다 현저하게 높다 [8]. 더불어 이러한 3 계층으로 이루어진 네트워크 구조는 구성하고 관리함에 있어 제한적인 용량 및 확장성, 높은 설비투자비용 (CAPAX)과 운용비용 (OPEX)등과 같은 한계점을 극복하기 위해, 데이터 센터 네트워크 구성을 위한 새로운 형태의 토폴로지들이 제안되고 있다. 저렴한 스위치를 이용하여 다양한 경로를 생성하는 Clos 네트워크에 기반한 Fat-Tree [11], VL2 [12], PortLand [13]와 같은 토폴로지가 있다. 따라서, 다양한 데이터 센터 네트워크 구조에 대응하는 트래픽 생성 방법이 요구된다.

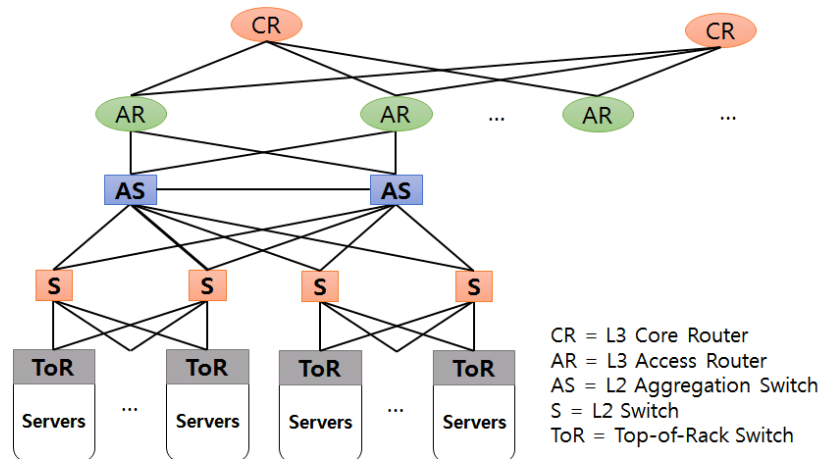


그림 1.3 계층으로 이루어진 데이터 센터 네트워크 구조

데이터 센터의 구축에 대한 인기에도 불구하고, 데이터 센터 네트워크에서 발생하는 트래픽의 특성에 대해서는 많이 알려져 있지 않다. Benson의 연구 [8, 9]에서는 대학 네트워크, 사내 기업 네트워크, 상용 클라우드 네트워크에서 발생하는 트래픽과 SNMP 로그를 수집하여 특성을 분석하였다. Kandula의 연구 [10]에서는 1500여개의 서버 컴퓨터로 구성되는 데이터 센터를 대상으로 2개월 동안 자체 개발한 모니터링 프로그램을 통해 수집한 데이터를 바탕으로 데이터 센터 네트워크의 특성을 분석하였다.

네트워크 트래픽을 수학적으로 표현하기 위한 다양한 모델들이 연구되었다. 이러한 대부분의 모델들은 인터넷 백본에서 수집한 트래픽을 바탕으로, 인터넷 트래픽의 특성을 다각도로 설명하기 위한 설명하기 위해 다양한 수학적 기법 및 모델을 사용한다. 많은 연구에 의해 인터넷 트래픽이 분석되었으며 장기간 종속성 (Long Range Dependence)을 가지며, 점근적인 자가 유사성을 가지는 확률 과정 (Asymptotically Self-Similar Process)임을 발견하였다 [14,15]. 인터넷 트래픽 분석 및 모델에 관한 연구의 분야는 플로우 수준에서 인터넷 트래픽을 분석하는 방법이 있다. 대표적인 방법으로 $M/G/\infty$ 대기 행렬 모델 (Queuing Model)을 이용하여 특정 시간에 활성화된 플로우의 개수를 구하는 모델이 있다. 또한, [6,7]에서는 Poisson Shot-Noise 모델을 이용하여 특정 링크의 트래픽 전송률의 모멘트(Moment)를 구하여 총 플로우 크기의 평균 및 분산, 지속시간의 평균 및 분산을 구할 수 있는 모델을 제안하였다. 본 논문에서도 특정 링크에 흐르는 플로우의 특성을 반영하기 위한 수학적 모델로써 Poisson Shot-Noise 모델을 사용한다.

현재 다양한 트래픽 생성 기법과 도구들이 연구되었으며, 그 중 몇몇의 제품화되어 있다. [7]에서는 네트워크 트래픽 생성 기법에 따라 다양한 트래픽 생성 방법들을 요약하여 몇 가지 범주로 분류하였다. iPerf [8]와 같은 최대 수용 생성(Maximum Throughput Generator)은 종단 사이의 성능 (End to End Performance)를 측정하기 위해 주로 사용된다. 다음으로, 일반적인 트래픽의 통계적인 특성을 반영하기 위해 확률적 모델 (Stochastic Model)에 기반한 생성기법 [9]이 있다. 마지막으로, 실제 네트워크에서 수집되는 트래픽과 통계적으로 유사한 특성을 지니도록 상위 수준의 모델과

자동화된 기법을 사용하는 방법들이 있다. HARPOON [10]은 다양한 플로우 수준의 특성들을 반영하기 위한 트래픽 생성 도구이다. 이외에도 다양한 생성도구들이 존재한다. 하지만, 이러한 네트워크 트래픽 생성 기법 및 도구들은 인터넷 백본 네트워크에서 관찰되는 트래픽을 대상으로 하여, 데이터 센터 네트워크에서 발생하는 트래픽의 특성을 반영하고 있지는 않다.

3. 네트워크 트래픽 모델

본 논문에서는 데이터 센터 트래픽의 특성을 표현하기 위한 수학적 모델로써 Poisson Shot-Noise 모델[6,7]을 사용한다. Poisson Shot-Noise 모델은 네트워크 트래픽의 특성에 대한 두 가지 가정 위에서 성립한다. Poisson Shot-Noise 은 트래픽의 특성을 플로우 수준에서 반영한다. 플로우는 (송신 서버 IP 주소, 수신 서버 IP 주소, 송신 포트 번호, 수신 포트 번호, 프로토콜)이 동일한 패킷의 집합을 지칭한다.

가정 1: 플로우의 발생 빈도는 유한의 값인 λ 를 기대치로 가지는 동질적 프아송 과정 (Homogeneous Poisson Process)의 확률 분포를 따른다.

본 논문에서는 하루의 시간대에 따라 변화하는 네트워크 사용율을 반영하기 위해, 변화하는 기대치를가지는 비동질적 프아송 과정 (Non-homogenous Poisson Process)을 표현해야 한다. 하지만, 시간에 따른 평균 플로우의 발생 빈도의 변화량의 폭은 매우 적으므로 그 영향을 무시하고 동질적 프아송 과정으로 플로우의 발생 빈도를 모델링 하였다. 이때, 동일적 프아송 과정의 평균 기대치는 다음과 같이 표현할 수 있다. 아래과정에서 a 는 플로우 생성 시작 시간 b 는 플로우 생성 종료 시간을 의미하며, $\lambda(t)$ 는 시간 t 에 따른 플로우의 발생 비율 기대치를 반환하는 함수이다.

$$\lambda' = \int_a^b \lambda(t) dt \quad (1)$$

가정 1을 바탕으로 표 1과 같이 모델에 사용되는 기호들을 정의한다.

표 1. 모델에 사용된 심볼(Symbol)과 설명

심볼	설명
T_n	n 번째 플로우의 생성 시간. ($n \in \mathbb{Z}$)
S_n	n 번째 플로우의 크기. (Bytes)
D_n	n 번째 플로우의 지속시간. (s)
$X_n(t - T_n)$	n 번째 플로우의 특정 시간 t 에서의 전송률. (Bytes/s)
$R(t)$	대상 링크의 특정 시간 t 에서의 총 전송률. (Bytes/s)

플로우는 특정 시간 t 에서 $T_n \leq t \leq T_n + D_n$ 의 조건을 만족할 때 활성화 플로우(Active Flow)로 지칭한다. 플로우의 전송률 함수인 $X_n(\cdot)$ 을 Shot으로 지칭하며, $X_n(\cdot)$ 과 S_n , D_n 사이에는 수식 (2)와 같은 관계가 성립하며, S_n 과 D_n 은 서로 종속적인 관계에 있음을 표현할 수 있다 [6,7].

$$\int_0^{D_n} X_n(u) du = S_n, \text{ where } u = T_n - t \quad (2)$$

가정 2: 플로우 전송률 함수(Shot)은 서로 독립적(Independent)이며, 동일한(Identical) 분포를 가진다.

가정 2는 대상 링크에 존재하는 Shot의 형태는 대상 트래픽의 특성과 밀접한 관련을 지니고 있으며, 플로우의 특성에 따라 다른 형태를 보이게 된다. 다양한 응용 및 프로토콜의 분석을 통해 다수의 Shot의 형태를 고려할 수 있지만, 본 논문에서는 모델의 단순화를 위해 Shot을 (a, b) 의 2개의 인자를 지니는 지수함수인 $X_n(t - T_n) = a(t - T_n)^b$ 의 형태만을 고려하였다. 사용한 Shot은

단순한 지수 함수만을 고려하고 있지만, a 와 b 의 인자의 조절을 통해 다양한 형태를 지니도록 간단하게 모델링이 가능하다. 그림 2는 a 와 b 의 값에 따른 shot의 형태를 도식화 한 것이다. 가정 2를 통해 대상 링크에 존재하는 플로우의 총 전송률의 함수인 $R(t)$ 를 수식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 이러한 과정을 따르는 확률과정을 Poisson Shot-Noise 모델로 지칭한다 [6,7].

$$R(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} X_n(t - T_n) \quad (3)$$

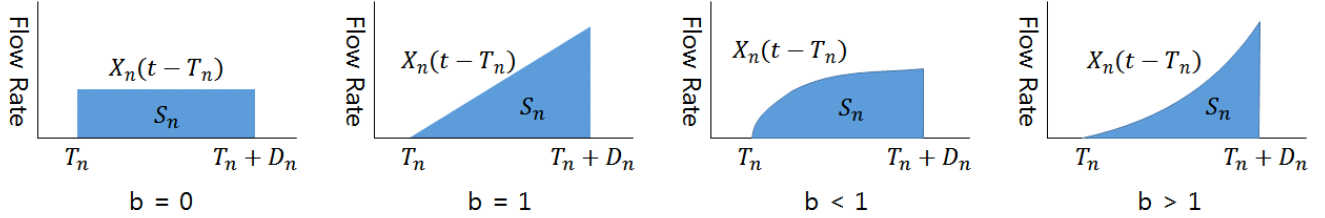


그림 2. 지수 b 의 변화에 따른 다양한 형태의 플로우 전송률 함수 (Shot)

$R(t)$ 의 통계적 특성을 파악하기 위해, $R(t)$ 확률 과정의 모멘트(Moment)들을 구할 필요가 있다. $R(t)$ 를 구하기 위해 Laplace-Stieltjes 변환을 적용하면 다음과 같은 변환된 함수 $\tilde{R}(w)$ 를 수식 (4)와 같이 구할 수 있다 [7]. $\tilde{R}(w)$ 를 이용하여 $R(t)$ 의 1 차, 2 차 모멘트들을 구할 수 있으며, 기대치(Expectation)과 분산(Variance)를 수식 (5), (6)과 같이 표현할 수 있다 [6].

$$\tilde{R}(w) = \exp\left(\lambda \int_0^{D_n} e^{-wX_n(u)} du\right) - \lambda \mathbb{E}[D_n] \quad (4)$$

$$\mathbb{E}[R(t)] = \lambda \mathbb{E}[S_n] \quad (5)$$

$$V_R = \lambda \mathbb{E}\left[\int_0^{D_n} X_n^2(u) du\right] \quad (6)$$

따라서 Poisson Shot-Noise 모델을 이용할 경우 3 가지 인자 값 λ , $\mathbb{E}[S_n]$, $\mathbb{E}[S_n^2/D_n]$, V_R 이 주어지면, 플로우의 전송률 함수를 수식 (7)과 같이 구할 수 있다 [7].

$$X_n(t - T_n) = a(t - T_n)^b, \text{ where } a = \frac{(b+1)S_n}{D_n^{b+1}}, \quad b = k - 1 + \sqrt{k^2 - k}, \quad k = \frac{V_R}{\lambda \mathbb{E}\left[\frac{S_n^2}{D_n}\right]} \quad (7)$$

4. 네트워크 트래픽 생성 기법

제안하는 트래픽 생성 기법은 기존의 인터넷 백본 네트워크에서 발생하는 트래픽이 아닌 데이터 센터 네트워크에서 발생하는 트래픽의 특성들을 반영하여 유사한 트래픽을 생성하는 것을 목표로 한다. 고려하는 특성으로는 생성되어야 하는 플로우의 개수, 플로우의 지속시간, 플로우의 크기, 수신 서버와 송신 서버와 같은 특성들을 반영하게 된다. 데이터 센터 네트워크의 특성을 고려 플로우들의 집합을 생성하고, 송신서버와 수신 서버 경로의 트래픽을 생성하기 위해 트래픽 매트릭스 생성한다. 이렇게 생성된 트래픽 매트릭스를 참조하여 iPerf [16]와 같은 기존의 패킷 기반의 트래픽 생성 도구에 명령을 내림으로써 실제 패킷을 생성하게 된다. 트래픽 매트릭스는 주어진 특정 시간에 데이터 센터 네트워크에 흐르고 있는 모든 트래픽의 크기를 가지고 있으며, (송신 서버, 수신 서버, 트래픽량)의 3 가지 요소로 이루어진 튜플(Tuple)의 집합으로 표현된다. 본 과제에서 제안하는 방법을 수용하기 위한 시스템의 구조는 그림 3에 도식화 되어 있다.

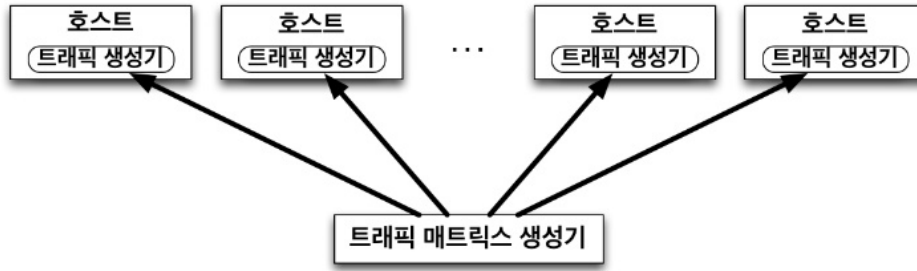


그림 3. 제안 트래픽 생성 시스템 구조

제안하는 방법은 트래픽 매트릭스를 생성하기 위해 6 단계를 거치게 된다. 각각의 단계는 네트워크 구조 파악, 거시적 특성 주입, 플로우의 5-튜플 결정, 플로우의 크기 결정, 플로우의 지속시간 결정, 트래픽 매트릭스 생성의 과정을 거치게 된다. 다양한 데이터 센터 네트워크 특성을 반영하여 특정 시간 대의 트래픽 매트릭스를 생성하고, 이를 참조하여 네트워크 패킷을 생성한다. 이러한 과정을 반복하여 실제 데이터 센터 네트워크에서 발생하는 것과 유사한 트래픽을 생성하게 된다. 트래픽을 생성하기 위해서는 대상 네트워크의 특정 링크의 플로우 발생 비율 λ , 링크에 흐르는 트래픽의 기대값 $\mathbb{E}[R(t)]$ 와 분산 V_R 을 입력으로 받아 이를 만족하도록 트래픽을 생성하게 된다.

4.1 네트워크 구조 파악

트래픽 매트릭스를 생성하기 위한 첫 번째 단계는 네트워크 구조 파악 단계로써 생성되어야 하는 트래픽 매트릭스의 대상이 되는 네트워크의 토폴로지 정보를 분석하여 대상 네트워크의 특성을 파악하기 위한 단계이다. 네트워크 토폴로지 정보를 표현하기 위해서, 그래프 구조를 사용하며 이는 $G(V, E)$ 로 표현된다. G 에서 Vertex의 집합을 지칭하는 V 는 호스트, 스위치, 라우터에 해당하며, Edge의 집합에 해당하는 E 는 각 Vertex 사이의 링크를 의미한다. 이 단계에서는 그래프 G 뿐만 아니라 각 장치 및 링크의 능력을 표현하기 위해 추가적인 메타 데이터를 입력으로 받아 들이는데, 이는 V 와 E 에 대해 장치의 종류, 링크 용량과 같은 정보들을 포함하게 된다.

입력을 통해 추출하게 되는 관계정보는 랙을 이루는 호스트 집합, 서버넷을 이루는 호스트 집합이 있다. 이러한 정보를 표현하기 위해, 출력으로 $Hosts()$ 와 $HList(s, d)$ 함수를 반환한다. $Hosts()$ 함수는 대상 네트워크의 전체 호스트의 리스트를 반환하며, $HList(s, d)$ 는 주어진 호스트 s 에서 d 만큼의 홉 거리(Hop count)를 가지는 호스트의 리스트를 반환하는 함수이다. $HList(s, d)$ 함수를 사용하여 동일한 논리적 특성을 가지는 호스트들을 파악할 수 있다. 예를 들어, 호스트 A와 동일한 랙에 위치한 호스트들은 $HList(A, 1)$ 을 통해 파악할 수 있다. $Hosts()$ 와 $HList(s, d)$ 의 관계는 그림 4에 도식화 되어 있다.

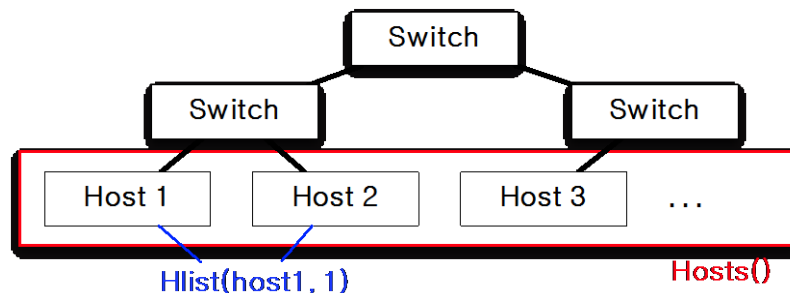


그림 4. Hosts()와 HList(s, d) 함수의 도식화

4.2 거시적 트래픽 특성 주입

이 단계는 생성되어야 하는 플로우의 개수를 결정하기 위한 단계이다. 일반적으로, 데이터 센

터 네트워크는 시간대 별로 다른 사용량을 보여준다. 그림 5는 대한민국의 상용 데이터 센터에서 외부로 나가거나 유입되는 트래픽량의 변화를 보여준다. 따라서 시간에 따라 데이터 센터의 사용량을 변화에 따라, 생성되어야 하는 플로우의 개수에 영향을 미치게 된다. 예를 들어, 주간의 데이터 센터 사용량은 새벽 시간 보다 많은 패턴을 보여준다. 본 논문에서는 시간대별 사용량 변화에 따른 플로우 발생 빈도의 변화를 수식 (1)으로 통해 표현하였다. 이러한 트래픽의 변동량을 고려하여 생성되어야 하는 플로우의 개수를 생성하기 위해, λ 와 $U(t)$ 를 입력으로 받아 들인다. λ 는 단위 시간(초) 동안 데이터 센터의 평균 플로우 생성 개수를 지칭하며, $U(t)$ 는 특정 시간대 t 에서 생성되는 플로우의 개수를 λ 와 비교하였을 때 비율을 지칭한다. 본 단계의 출력은 주어진 시간 t 에서 생성되어야 하는 플로우의 개수 λ' 로 표현되며, 프아송 확률 분포(Poisson distribution)를 따르는 난수 생성을 통해 얻을 수 있다.

$$\lambda' \sim f(k; \lambda \cdot U(t)) = \lambda \int_a^b u(t) dt = \Pr(X = k) \quad (8)$$

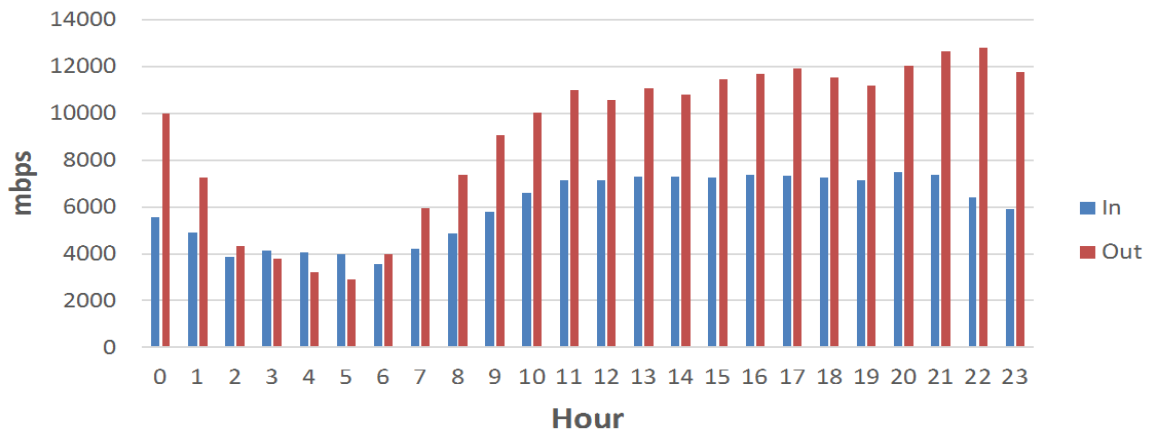


그림 5. 시간대 별 데이터 센터 트래픽 입출력 량의 변화

플로우의 각 플로우 발생 시간 차이(Flow Inter-Arrival Time)은 $1/\lambda$ 를 기대치로 가지는 지수분포(Exponential Distribution)를 따르는 난수 생성을 통해 구할 수 있다. 플로우 생성 시간 차이는 수식 (9)와 같이 모델링 할 수 있다. [17]에 따르면 인터넷 트래픽의 경우 플로우의 발생 시간 차이는 형상 모수 (Shape Parameter)가 1에 근접하는 와이불 확률 분포 (Weibull Distribution)를 따른다고 알려져 있지만, 주어진 링크 사용률이 1에 근접함에 따라 지수 분포 함수로 수렴한다 [17].

$$T_{n+1} - T_n = x \sim f(x; \lambda) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (9)$$

4.3 플로우의 5-튜플 결정

거시적 트래픽 특성 주입 단계를 통해, 주어진 시간 t 에 생성되어야 하는 플로우의 개수를 결정하였다. 이 과정에서는 생성되어야 하는 각각의 플로우를 생성하는 과정으로써, 플로우를 결정하는 5 가지 속성인 (송신 호스트, 수신 호스트, 송신 포트, 수신 포트, 프로토콜)을 결정하게 된다. 따라서, n 번째에 해당하는 플로우를 f_n 이라 표현 할 때, 주어진 시간 t 에 활성화된 플로우의 집합 F_t 은 수식 (10)과 같이 표현된다.

$$F_t = \bigcup_{n \in \mathbb{Z}} \{f_n \mid T_n \leq t \leq T_n + D_n\} \quad (10)$$

이 과정의 다른 중요한 입력은 R_{int} 와 R_{tcp} 이다. R_{int} 는 대상 트래픽 네트워크에서 전체 플로우 대비 랙 내부에서 흐르는 플로우의 비율을 지칭한다. [8,9]에서는 약 80%의 플로우가 랙 내부에서 흐르는 것을 관찰 하였다. R_{tcp} 는 전체 플로우에서 TCP 프로토콜을 사용하는 플로우의 비율을 지

칭한다. R_{int} 와 R_{tcp} 는 주어진 랙 내부에서 흐르는 플로우의 개수와 사용하는 프로토콜을 결정하기 위해 사용된다.

각 플로우를 생성하기 위한 첫 번째 과정은 송신 호스트와 수신 호스트를 결정하는 것이다. 송신 호스트 s 는 전체 호스트들 중에서 하나를 임의로 선택한다. 송신 호스트 d 는 $B(\infty, R_{int})$ 의 분포를 따르는 베르누이 시행(Bernoulli trial)을 통해 결정하게 된다. 이때 d 가 같은 랙에 위치한다면, $HList(s, 1)$ 을 통해 반환되는 호스트 중 하나를 임의로 선택한다. d 가 랙 외부에 위치하고 있다면, $\{Hosts() - HList(s, 1)\}$ 중에서 하나의 호스트를 임의로 선택한다. 송신 포트와 수신포트는 각각 (1, 65535)의 범위에서 임의로 선택하게 된다. 마지막으로, $B(\infty, R_{tcp})$ 를 따르는 베르누이 시행을 통해 해당 플로우가 TCP 또는 UDP를 사용하는 지 여부를 결정하게 된다. 이때, 플로우의 중복을 막기 위해서, 새롭게 속성을 결정하는 플로우 f_n 은 특정시간 t 에 존재하는 다른 플로우와 5 튜플이 동일해서는 안 된다. 중복 조건을 만족하지 못한다면 송신 호스트를 결정하는 과정부터 다시 반복함으로써 중복되지 않은 플로우 속성을 결정한다.

4.4 플로우의 크기 결정

[8, 9]에서는 80%의 플로우가 10KB 이하의 크기를 가지고 있음을 관찰 하였다. 더불어, 트래픽의 상위 10%에 해당하는 플로우들에 의해 발생함을 관찰하였다. 이러한 특성을 가장 잘 표현하는 확률 분포는 파레토 확률 분포 (Pareto Distribution)이다. 파레토 확률 분포 함수의 인자로 사용되는 형상 모수 (shape parameter) α 와 척도 모수 (scale parameter) M 를 결정함으로써 플로우의 지속시간에 해당하는 확률 분포함수를 결정 할 수 있다. 플로우의 크기에 해당하는 확률 변수 (Random variable) D 는 수식 (11) 같은 분포를 따르게 된다.

$$S_n \sim \bar{F}(x) = \Pr(X > x) = \begin{cases} \left(\frac{x}{M}\right)^\alpha & \text{for } x \geq M \\ 1 & \text{for } x \leq M \end{cases} \quad (11)$$

파레토 확률 분포 함수의 조화 평균은 수식 (12)와 같이 주어진다. 이때, 입력 인자로써 조화 평균 $\mathbb{H}[S_n]$ 을 파레토 분포의 조화 평균(Harmonic Mean)으로 설정하고 척도 모수 함수인 M 을 일반적인 TCP 패킷의 최소 사이즈인 80 Bytes로 결정하면, 형상모수 $\alpha = \frac{M}{\mathbb{H}[S_n] - M}$ 을 구할 수 있다. 이 때, 형상 모수를 구하기 위한 인자로써 조화 평균을 사용하는 이유는 파레토 확률 분포의 경우 $\alpha > 1$ 경우에 한하여 기대값을 구할 수 있기 때문이다. 또한, 실험적으로 플로우의 크기 분포의 경우 한정된 최대값을 가지도록 하여 낮은 형상모수를 사용하여 난수를 생성할 경우 보다 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인 하였다. 파레토 확률 분포의 특성으로 생성되는 플로우의 크기는 무한한 값을 가질 수 있기 때문에, 특정 크기(1,000,000 Bytes)이상의 난수가 발생한 경우 무시하고 새로운 난수를 생성하도록 설계하였다.

$$\mathbb{H}[S_n] = M \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (12)$$

4.5 플로우의 지속 시간 결정

플로우의 지속시간과 크기는 서로 독립적이지 않으며, 비례관계(Proportional relationship)에 있지 만 정비례 하지는 않는다. 따라서, 플로우의 지속시간과 크기에 관한 결합분포함수를 구해야 하는데, 지속시간과 크기 사이의 관계의 확률분포를 보여주는 결합분포함수(Joint distribution)을 모델링 하는 것은 매우 어렵다. 본 논문의 목표는 특정 대상 링크에서 흐르는 트래픽의 총량과 그 분산을 만족시키는 트래픽을 생성하는 것이므로, S_n 과 D_n 사이의 정확한 관계 대하여 고려할 필요가 없다.

플로우의 지속시간에 관하여 [8, 9]에서 80%의 플로우가 11 초 이하의 지속시간을 가지고 있고, 0.1%에 해당하는 플로우들은 200 초이상 지속된다는 것을 관찰 하였다. 이러한 특성을 잘 반영하는 것은 플로우의 크기 결정에 사용된 파레토 확률 분포 함수이다. 플로우의 최소 지속시간을

0.01 으로 설정하고, 플로우 크기 결정에서와 동일한 방법을 통해 지속시간에 대한 난수를 생성할 수 있다. 이 때, 파레토 확률 분포의 형상 모수는 조화 평균이 아닌 기대값인 $\mathbb{E}[D_n]$ 과 수식 (13)을 사용하여 결정하였다.

$$\mathbb{E}[D_n] = \frac{\alpha}{\alpha - 1} M \quad (13)$$

4.6 트래픽 매트릭스 생성

트래픽 매트릭스는 특정 단위시간 동안 호스트 사이에 흐르는 트래픽의 크기를 표현하는 것으로서, 일반적으로 (송신 호스트, 수신 호스트, 크기)로 표현된다. 앞선 과정들을 거쳐, 특정 시간대에 존재하는 플로우들을 생성하였으며 이를 이용하여 플로우 매트릭스를 생성하게 된다. 플로우 생성정보에는 송신 호스트, 수신 호스트 정보와 단위 시간 동안 전송되어야 하는 트래픽의 크기가 명시되어 있다. 따라서 이를 종합하여 트래픽 매트릭스를 생성하게 된다. 특정시간 구간 $[t_1, t_2]$ 에서 각 호스트들 사이의 트래픽을 표현하는 트래픽 매트릭스 T 의 각 요소는 수식 (14)를 통해 구할 수 있다. 이렇게 생성된 T 를 참조하여, 널리 사용되고 있는 Maximum Throughput Traffic Generator 인 iPerf [16]을 통해 호스트들 사이의 실제 트래픽을 생성하게 된다.

$$T_{i,j} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \int_{t_1}^{t_2} X_n(t - T_n) dt, \text{ where } f_n\text{'s source host: } i \text{ and destination host: } j \quad (14)$$

5. 구현 및 검증

제안된 방법이 데이터 센터에서 발생하는 트래픽과 유사한 트래픽을 생성하는지 검증하기 위해, Mininet [18]과 iPerf [16]과 연동할 수 있도록 Python 프로그래밍 언어를 이용하여 구현 하였다. Mininet 은 스위치 및 호스트들을 가상으로 생성할 수 있도록 하는 에뮬레이터 이며, iPerf 는 Mininet 과 연동하여 트래픽을 생성할 수 있게 해주는 도구이다.

입력 인자 추출 및 비교에 사용된 데이터 센터 네트워크 트래픽은 [8]에서 사용된 것과 동일한 것으로서, 미국에 위치한 모 대학의 데이터 센터에서 실제로 수집된 것이다. 수집된 트래픽은 500 여대의 호스트들로 구성된 데이터 센터의 Aggregation Switch 에서 수집된 것이며, 대상 링크를 통과하는 총 986,087 개 패킷의 헤더 정보를 저장하고 있다. 수집된 패킷의 헤더 정보를 분석하여, 동일한 5-튜플 값을 가지는 유사 패킷을 집합을 동일한 플로우로 분류 하였다. 이 때, 비정상적으로 종료되거나 단일 패킷으로 구성된 플로우는 분석 대상에서 제외하였다. 수집된 트래픽의 처음 플로우의 생성 시간과 마지막 플로우의 종료시간의 차이는 200.14 초였다. 도착시간과 플로우 수준에서 분석결과, 8565 개의 정상적으로 종료된 TCP 와 UDP 플로우를 포함하고 있었으며 총 84,680,965 Bytes 의 트래픽 크기를 보였다. 정상적으로 종료된 8565 개의 플로우를 대상으로 $\mathbb{E}[S_n]$ 과 $\mathbb{E}[S_n^2/D_n]$ 을 추출 하였다. 분석 결과를 바탕으로 유사한 트래픽을 가상으로 생성하기 위해 추출한 인자는 표 2 에 정리되어 있다. 추출된 정보를 바탕으로 플로우의 전송률 함수, $X_n(t - T_n) = a(t - T_n)^{6.09}$ ($b=6.09$)으로 모델링 할 수 있다.

표 2. 수집된 트래픽 분석을 통해 추출한 값

이름	값	설명
λ	266.37 flows/s	수식 (1)을 통해 유추한 평균 플로우 발생률
$\mathbb{E}[S_n]$	10861.51 Bytes/s	플로우의 크기의 관측된 산술 평균
V_f	145854933571	대상 링크의 관측된 분산
$\mathbb{E}[S_n^2/D_n]$	6442388302	플로우 크기의 제곱/지속시간의 기대치
$\mathbb{H}[S_n]$	437.998 Bytes	플로우 크기의 조화평균
$\mathbb{E}[D_n]$	1.983496048 s	플로우 지속시간의 기대값

생성되는 플로우의 크기와 지속시간의 분포를 검증하기 위해, 가성으로 생성된 8500 개의 플로우를 데이터 센터에서 추출된 플로우들과 비교를 하였다. 생성된 플로우는 총 89,860,347 Bytes의 크기를 가지고 있다. 그림 6은 플로우 크기의 누적 확률 분포를 그림 7은 플로우 지속시간의 누적 확률 분포를 보인다. 그림 7의 경우 플로우 크기는 로그를 취하였다. 그림 6에서 생성된 플로우의 최대값으로 15 초를 설정하여, 그 보다 긴 플로우는 고려되지 않았다. 에서 플로우 크기의 경우 로그 스케일로 그려져 있어, 플로우 크기의 분포가 정상 스케일에서는 비슷하게 분포함을 확인 할 수 있다. 파레토 확률 분포가 정확하게 플로우의 플로우의 크기와 지속시간을 정확하게 모델링 하지 않지만, 비슷한 형상을 가지도록 모델링 할 수 있다고 알려져 있다 [14]. 본 실험에서 플로우의 지속 시간 확률 분포가 상이한 형태를 보이는 것은, 사용된 트래픽이 학내 망에서 추출되었으며, 대부분의 트래픽이 파일 서비스로 인해 발생한 트래픽이라 그 차이가 더 심화된 것으로 분석된다.

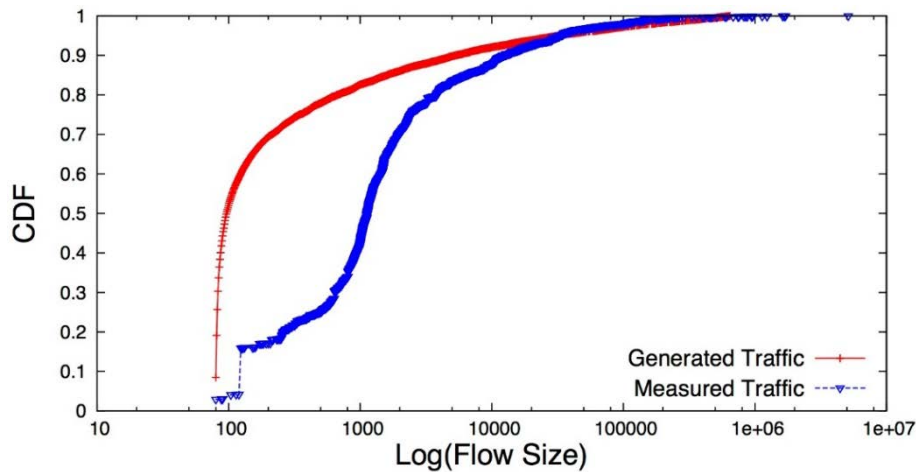


그림 6. 플로우 크기의 누적 확률 분포

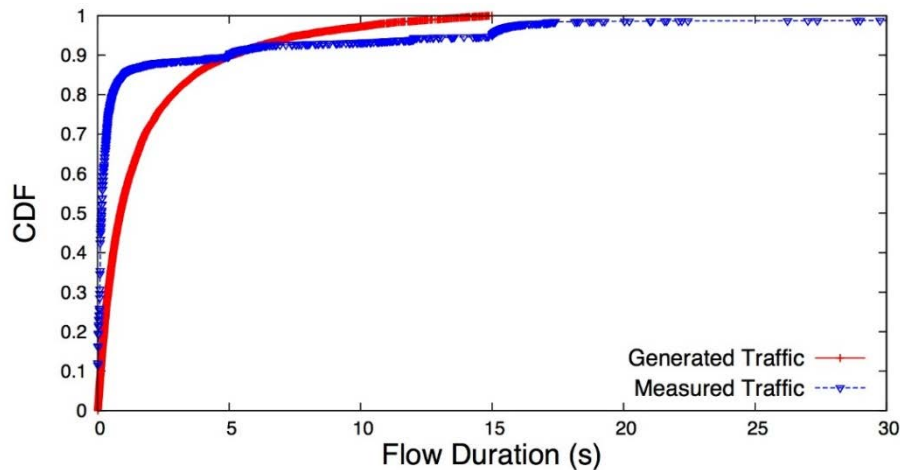


그림 7. 플로우 지속시간의 누적 확률 분포

제안된 방법이 대상 링크에 흐르는 평균 트래픽 량과 분산을 입력 값과 유사하게 생성하는지를 검증하기 위해 200 초 동안 제안된 방법을 통해 플로우를 생성하였다. 이때 Edge 스위치와 Aggregation 스위치에 위치한 링크에서 측정되는 트래픽이 비교 대상과 동일한 플로우가 지나도록 수행하였다. 제안된 방법과 수집된 트래픽의 특정 대상 링크에서 총 트래픽 량의 변화는 그림 8과 같다. 생성된 플로우의 개수는 총 53268 개이며, 총 트래픽 량의 기대값은 2,919,414 Bytes로 관찰되었다. 수집된 트래픽의 경우 120 초, 180 초, 200 초 근처에서 폭발적인 사용율을 보여주지만, 이러한 부분을 제외하면 전체적으로 비슷한 형태를 보여줌을 확인 할 수 있다.

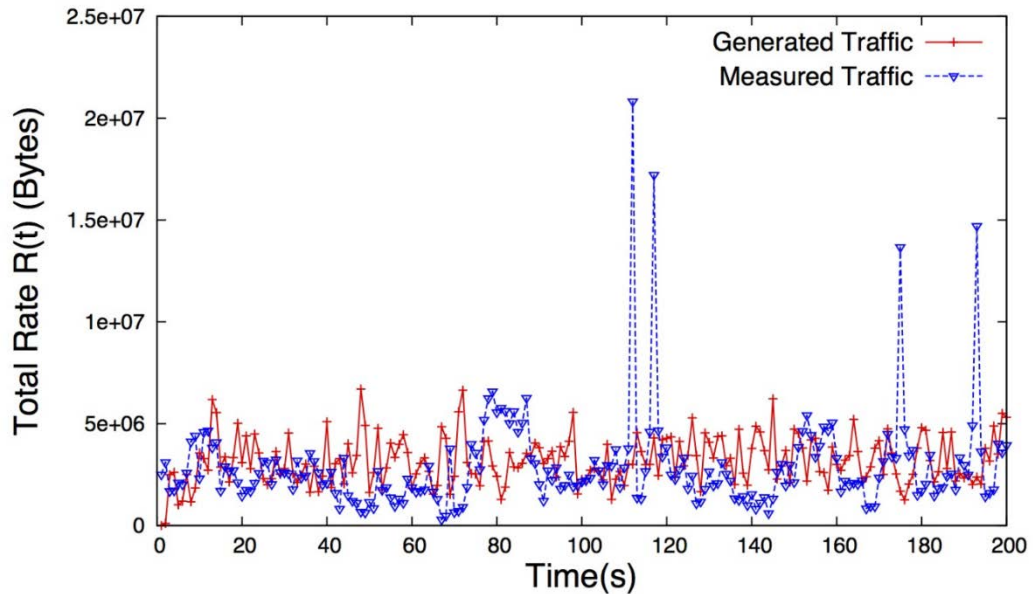


그림 8. 생성 트래픽과 측정 트래픽 사이의 $R(t)$ 변화 비교

6. 결론

본 논문에서는 Poisson Shot-Noise 모델을 이용하여 데이터 센터에서 발생하는 트래픽과 유사한 특성을 지니는 트래픽을 가상으로 생성하는 방법을 제안하였다. 트래픽 생성을 위해 요구되는 입력으로는 특정 링크의 플로우 발생 비율 λ , 링크에 흐르는 트래픽의 기대값 $\mathbb{E}[R(t)]$ 와 분산 V_R 이 요구된다. 이들 입력인자를 바탕으로 가상으로 생성되는 네트워크 트래픽이 가지는 특성을 반영할 수 있도록 Poisson Shot-Noise 모델을 통해 각 플로우가 가져야 할 특성들을 결정한다. 이렇게 결정된 트래픽의 특성을 통해 대상으로 하는 네트워크 트래픽과 유사한 특성을 지니는 플로우들을 생성할 수 있다. 이렇게 생성된 플로우들을 종합하여 트래픽 매트릭스를 생성하게 되며 이를 참조하여 패킷을 생성하는 생성도구에 명령을 내림으로써 실제 트래픽을 생성하게 된다. 트래픽의 생성 과정은 총 6 단계로 이루어져 있으며, 생성된 트래픽은 Python, Mininet, iPerf의 도구를 이용하여 구현되었다. 생성된 트래픽은 실제 데이터 센터에서 수집된 트래픽과 유사한 특성을 가지고 있음을 구현을 통한 비교를 통해 확인 하였다.

7. 참고 문헌

- [1] S. Allen, V. Graupera and L. Lundrigan. "The Smartphone is the New PC," PRO SMARTPHONE CROSS-PLATFORM DEVELOPMENT, pp. 1-14, 2010.
- [2] S. Molnar, P. Megyesi, and G. Szabo, "How to validate traffic generators?" in Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on, 2013, pp. 1340–1344.
- [3] M. Gates, A. Tirumala, J. Dugan, and K. Gibbs, Iperf version 2.0.0, Part of Iperf's source code distribution, NLANR applications support, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, May 2004. [Online]. Available: <http://iperf.sf.net>
- [4] "MGEN - The Multi-Generator Toolset," <http://manimac.itd.nrl.navy.mil/MGEN/>, Feb. 2004.
- [5] J. Sommers, H. Kim, and P. Barford, "Harpoon: A flow-level traffic generator for router and network tests," SIGMETRICS Perform. Eval. Rev., vol. 32, no. 1, pp. 392–392, Jun. 2004.
- [6] C. Barakat, P. Thiran, G. Iannaccone, C. Diot, and P. Owezarski, "A flow-based model for internet backbone traffic," in Proc. ACM SIG- COMM Internet Meas. Workshop, Nov. 2002.
- [7] C. Barakat, P. Thiran, G. Iannaccone, C. Diot, and P. Owezarski, "Modeling Internet backbone traffic at the flow level," Trans. Sig. Proc. 51, 8 (August 2003), 2111-2124.
- [8] T. Benson, A. Akella, and D. A. Maltz, "Network traffic characteristics of data centers in the wild," in Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 267–280.

- [9] T. Benson, A. Anand, A. Akella, and M. Zhang, “Understanding data center traffic characteristics,” SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 40, no. 1, pp. 92–99, Jan. 2010.
- [10] S. Kandula, S. Sengupta, A. Greenberg, P. Patel, and R. Chaiken, “The nature of data center traffic: Measurements & analysis,” in Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 202–208.
- [11] M. Al-Fares, A. Loukissas, and A. Vahdat, “A scalable, commodity data center network architecture,” in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 Conference on Data Communication. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 63–74.
- [12] A. Greenberg, J. R. Hamilton, N. Jain, S. Kandula, C. Kim, P. Lahiri, D. A. Maltz, P. Patel, and S. Sengupta, “VL2: A scalable and flexible data center network,” SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 39, no. 4, pp. 51–62, Aug. 2009.
- [13] R. Niranjan Mysore, A. Pamboris, N. Farrington, N. Huang, P. Miri, S. Radhakrishnan, V. Subramanya, and A. Vahdat, “Portland: A scalable fault-tolerant layer 2 data center network fabric,” SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 39, no. 4, pp. 39–50, Aug. 2009.
- [14] M. Crovella and A. Bestavros, “Self-similarity in world wide web traffic: Evidence and possible causes,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, pp. 835–846, Dec. 1997.
- [15] A. Feldmann, “Characteristics of TCP connection arrivals,” in Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, K. Park and W. Willinger, Eds. New York: Wiley, 2000.
- [16] M. Gates, A. Tirumala, J. Dugan, and K. Gibbs, Iperf version 2.0.0, Part of Iperf’s source code distribution, NLANR applications support, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, May 2004. [Online]. Available: <http://iperf.sf.net>
- [17] J. Cao, W. S. Cleveland, D. Lin, and D. X. Son, “On the nonstationarity of internet traffic,” in Proc. ACM SIGMETRICS, June 2001.
- [18] B. Lantz, B. Heller, and N. McKeown, “A network in a laptop: Rapid prototyping for software-defined networks,” in Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. NY, USA: ACM, 2010, pp. 19:1–19:6.



한 윤 선

2009 포항공과대학교, 컴퓨터공학과 학사

2009 ~ 현재 포항공과대학교, 정보전자융합공학부 석/박사 통합 과정

<관심분야> 네트워크 관리, SDN, 정보 모델링, 자율 컴퓨팅



유 재 형

1983 연세대학교 전자공학과 학사

1985 연세대학교 전자공학과 석사

1999 연세대학교 컴퓨터공학과 박사

1986 ~ 2012: KT 네트워크 연구소

2012 ~ 2013: KAIST 전기 및 전자공학과 연구부교수

2013 ~ 현재: POSTECH 컴퓨터공학과 연구부교수

<관심분야> 네트워크 관리 및 보안, SDN, OpenFlow



홍 원 기

1983 Univ. of Western Ontario, BSc in Computer Science

1985 Univ. of Western Ontario, MS in Computer Science

1985 ~ 1986 Univ. of Western Ontario, Lecturer

1986 ~ 1991 Univ. of Waterloo, PhD in Computer Science

1991 ~ 1992 Univ. of Waterloo, Post-Doc Fellow

1992 ~ 1995 Univ. of Western Ontario, 연구교수

1995 ~ 현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수

2007~2011 포항공과대학교 정보통신대학원장

2007~2010 포항공과대학교 정보통신연구소 연구소장

2008~2010 포항공과대학교 컴퓨터공학과 주임교수

2008~2012 포항공과대학교 정보전자융합공학부장

2012~2014 KT 종합기술원, 원장

2008 ~ 현재 포항공과대학교 정보전자융합공학부 교수

<관심분야> 네트워크 트래픽 모니터링, 네트워크 및 시스템 관리