

# 대규모 인터넷 시뮬레이션을 위한 네트워크 토폴로지 자동 생성 기법

류기원\*, 최경희\*, 박승규\*, 정기현\*\*, 이상훈\*\*\*, 박응기\*\*\*  
\*아주대학교 정보통신전문대학원  
\*\*아주대학교 전자공학부  
\*\*\*국가보안기술연구소  
e-mail : [ryujeen@rpa.re.kr](mailto:ryujeen@rpa.re.kr)

## Automatic Generation of Network Topology for Large Scale Internet Simulation

Key-won Ryu\*, Kyung-Hee Choi\*, Seung-Kyu Park\*  
Gi-Hyun Jung\*\*  
Sang-Hun Lee\*\*\*, Eung-Ki Park\*\*\*

\*Graduate School of Information and Communication, Ajou University.

\*\*School of Electronics Engineering, Ajou University

\*\*\*National Security Research Institute

### 요 약

인터넷 토폴로지 생성 기법에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 이는 인터넷 토폴로지가 라우팅, 멀티캐스트, 프로토콜 등의 성능과 사이버 테러 공격에 대한 분석 및 방어체계와 밀접한 관계가 있기 때문이다. 토폴로지를 생성하는 GT-ITM[5], INET-3.0[6] 등은 Autonomous System (AS) 노드들로 이루어진 네트워크 토폴로지를 생성한다. 즉, 이들 도구들은 AS 가 노드인 토폴로지를 생성하며, AS 내의 네트워크에 대해서는 표현하지 않는다. 이에, 본 논문에서는 대규모 네트워크의 시뮬레이션을 위한 토폴로지를 구성하는 데 필요한 PoP (Presence of Point), ISP(Internet Service Provider) 등 하위 레벨의 토폴로지를 자동 생성함으로써 네트워크 토폴로지를 표현하는 방법을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 서로 다른 특성을 가진 하부 서브넷을 가지고 있으며 hierarchy 를 반영한 토폴로지를 생성할 수 있다는 장점을 가지고 있다..

### 1. 서론

대규모 인터넷 시뮬레이션은 network behavior 와 protocol 의 연구 등에 매우 중요하게 사용되고 있다. 특히, 악성 웜이 인터넷에 끼치는 피해를 예측하기 위해서나, 악성 웜으로부터 네트워크 자원을 보호하는 기술의 효과를 측정하는 것, 또는 웜이 퍼지는 것을 예방하는 기술이 얼마나 효과적으로 웜의 확산을 예방하는 지를 측정하는 연구에 매우 유용하다 [1].

대규모 네트워크를 대상으로 한 시뮬레이션 기법으로는 packet level 시뮬레이션과 analytic model 을 기반으로 한 시뮬레이션이 있다 [2, 3]. Analytic 시뮬레이션에서는 시스템의 행동이 수학적 모델을 이용하여 표현된다. 따라서, 시뮬레이션은 수식 값의 계산이어서 매우 빠른 시뮬레이션이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 수학적 모델의 모델링 방법을 결정하고 네트워크의 behavior 를 정확히 표현하는데 한계

가 있다는 단점이 있다. analytic 시뮬레이션과는 달리, event 방식의 packet level 시뮬레이션은 시뮬레이션이 진행되는 동안 각 packet 의 생성과 전달을 단일 event 로 처리한다. 따라서, packet level 시뮬레이션은 analytic 시뮬레이션의 단점을 극복 가능케 한다

그러나 대규모 인터넷 시뮬레이션을 packet level 시뮬레이션만으로 수행하는 데에는 두 가지 큰 어려움이 있다. 첫째는, 인터넷처럼 대규모 망을 대상으로 한 시뮬레이션에서는 많은 packet 과 이에 따른 많은 양의 event 를 처리해야 한다. 발생하는 event 를 모두 처리해야 하는 packet level 시뮬레이션의 실행에는 많은 시간과 자원이 소요된다. 이를 위하여 wide area network 과 트래픽을 교환하는 small network 의 성능 평가를 위하여, small network 은 packet level 시뮬레이션을 위한 네트워크로 모델링하고, wide area network 에는 수학적 모델링 방법인 fluid model 을 적용한

hybrid 방식의 시뮬레이션을 실행하는 방법이 제안되기도 하였다 [3, 4].

두 번째 어려움은 시뮬레이션의 목적에 부합하는 토폴로지의 특성을 대변하는 대규모 망을 모델링하기 어렵다는 것이다. 특히, 네트워크 토폴로지에 따라 시뮬레이션의 결과가 달라지는 시뮬레이션을 위하여는 실제 네트워크 토폴로지의 특성을 가지고 있는 대규모 네트워크를 모델링 할 필요가 있다. 예를 들면, 라우팅 알고리즘의 성능 평가나 악의적 공격으로부터의 방어 기술의 성능 평가를 위한 목적에 부합되는 토폴로지를 생성하여야 한다.

시뮬레이션을 위한 토폴로지의 생성 틀로는 GT-ITM[5], INET-3.0[6] 등이 있다. 이들은 대부분 AS(Autonomous System)으로 구성된 인터넷 토폴로지에 초점이 맞추어져 있다. 이들 방법에서는 AS 들의 link 수, 즉 AS 에 연결된 다른 AS 수를 가리키는 degree 를 power-law 에 따라 random 으로 계산한다. 그러나, 실제 인터넷의 토폴로지는 이보다 복잡한 망을 구성하고 있다. 예를 들어, 'Internet Korea 2003 [9]' 에 따르면, 국내 인터넷 백본망은 4 개의 IX(Internet Exchange)와 이들 IX 에 연결된 82 개의 ISP(Internet Service Provider)로 구성되어 있다. 또한 AS 의 역할에 따라 노드들의 링크의 분포가 동일한 분포를 가지기 보다는 여러 개의 분포로 나누어 진다는 점도 지적하고 있다 [7].

이에 본 논문에서는, 동일한 통계적 분포를 가진 노드들의 cluster 인 POP(Presence Of Point)을 자동 생성하는 방안을 제시하고자 한다 [8]. POP 의 토폴로지는 backbone router, distribution router, 그리고 access router 에 의하여 결정된다. 이들 세 종류의 router 의 연결 상태는 통계적 분포의 종류와 그 분포를 결정짓는 파라미터에 의하여 결정된다. 분포의 종류와 파라미터의 값을 이용하여 POP 의 규모 및 POP 토폴로지가 결정된다. 우리는 POP 토폴로지를 자동으로 생성하기 위하여 시스템을 구현하였다.

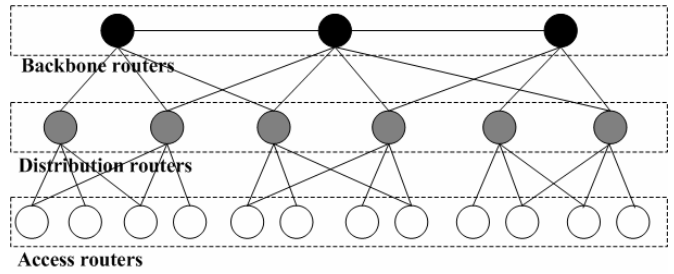
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절 POP 네트워크의 특징과 기존 생성 틀과의 차이점, 3 절은 POP 생성 알고리즘, 4 절은 결론으로 구성된다.

## 2. POP 네트워크의 특징과 INET-3.0 과의 차이점

본 논문의 2 절에서는 POP 네트워크의 특징, INET-3.0 과 우리의 POP 토폴로지의 생성 방법의 차이에 대해서 기술한다.

### 2.1 POP 네트워크의 특징

ISP 는 다양한 크기의 POP 들 간의 네트워크로 구성되어 있다. 일반적으로 하나의 POP 은 도시의 백본망을 표현한다. 이러한 POP 은 backbone router, distribution router, access router 로 구성되어 있다. 인터넷 사용자는 access 라우터를 통해 도시의 백본망에 접근하게 된다. POP 의 구성은 [그림 1]과 같이 hierarchy 구조를 갖는다.



[그림 1] POP 네트워크를 구성하는 라우터

### 2.2 INET-3.0 과의 차이점

본 논문에서는 INET-3.0 의 토폴로지 생성 방법을 이용하여 POP 의 토폴로지를 생성하였다. 그러나 INET-3.0 과 본 논문에서 사용한 본 논문에서 구현한 POP 네트워크의 생성방법은 [표 1]에 열거된 바와 같이 차이점이 있다.

항목	INET-3.0	POP Generator
규모	다수의 AS로 구성된 대규모 인터넷 망	ISP를 구성하는 다수의 POP 중 하나의 POP
구성 노드	Autonomous System (AS)	라우터
hierarchy 특성	×	○
degree 분포	모든 노드들에 대한 동일한 분포를 가짐	노드의 타입에 따라 다른 분포를 가짐
연결 모델	preferential connectivity	preferential connectivity waxman model 병용

[표 1] INET-3.0 과 POP Generator 비교

본 연구에서 구현한 POP Generator 는 INET-3.0 과 비교해서 구조화된 hierarchy 한 특성을 가지며 노드의 타입에 따라 degree 의 분포에 대한 파라미터를 다르게 설정이 가능하다. 사용자는 POP Generator 를 통해 한정된 degree 의 분포가 아닌 다양한 degree 의 분포의 설정을 통해 실제 네트워크에 가까운 POP 네트워크를 생성 가능하다.

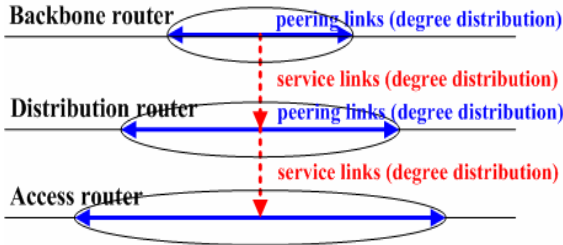
## 3. POP 토폴로지 생성 알고리즘

인터넷 hierarchy 구조의 가장 하위 레벨에 위치하는 POP 네트워크의 토폴로지를 생성하는 방법에 대해서 설명한다.

### 3.1 POP 구성을 위한 라우터들의 레벨 구조

POP 네트워크는 backbone router, distribution router, access router로 구분된다. 가장 상위에는 backbone router가 위치하고 하위에는 기업 네트워크 또는 학교 네트워크가 연결되어 있는 access router가 위치한다. 또한 그 중간에는 backbone router와 access router를 연결하는 distribution router가 존재한다. 기업 네트워크 또는 학교 네트워크 내의 인터넷 사용자는 access router를 통해서 backbone router에 접근하게 된다. 우리는 이러한 POP의 특성을 적용하기 위해 각 레벨 별

로 router의 종류를 구분하고 다른 분포의 특성이 적용 가능하도록 하였다. 예를 들면 backbone router들 간의 degree(peering links)의 분포 값과 distribution router로 연결하는 degree(service links)의 분포 값을 [그림 2]에서와 같이 다른 분포 값으로 설정이 가능하다.



[그림 2] 라우터의 레벨 별 degree 분포 적용

POP 네트워크의 규모와 레벨 별 라우터의 수와 degree의 분포를 나타내기 위해 다양한 파라미터들을 제공한다. [표 2]는 POP Generator에서 사용되는 파라미터들을 열거하고 있다.

(※B:backbone router, D:distribution router, A:access router)

파라미터	역할
pop_size	POP을 구성하는 노드의 수
backbone_ratio	backbone 라우터의 비율
distribution_ratio	distribution 라우터의 비율
access_ratio	access 라우터의 비율
rc_coefficient	backbone 라우터들 간의 mesh 연결 정도
Max <sub>degree</sub> (B_to_D)	backbone router에서 distribution router로의 degree의 최대값
Min <sub>degree</sub> (B_to_D)	backbone router에서 distribution router로의 degree의 최소값
$\gamma_{degree}(B\_to\_D)$	backbone router에서 distribution router로의 degree 분포를 위한 exponent value
Max <sub>degree</sub> (D_to_D)	distribution router 간의 degree의 최대값
Min <sub>degree</sub> (D_to_D)	distribution router 간의 degree의 최소값
$\gamma_{degree}(D\_to\_D)$	distribution router 간의 degree 분포를 위한 exponent value
Max <sub>degree</sub> (D_to_A)	distribution router에서 access router로의 degree의 최대값
Min <sub>degree</sub> (D_to_A)	distribution router에서 access router로의 degree의 최소값
$\gamma_{degree}(D\_to\_A)$	distribution router에서 access router로의 degree의 분포를 위한 exponent value

[표 2] POP 네트워크 생성을 위한 파라미터

### 3.2 POP 내의 라우터들 간의 연결 방법

POP 네트워크를 구성하는 router 간의 connectivity는

크게 두 가지 방법에 의해 결정된다. 첫 번째 방법은 backbone router 간에만 적용되는 방법이다. POP 네트워크는 single failure point를 피하기 위해서 backbone router 간에는 다수의 링크들을 통해 mesh 하게 연결되어 있다[8]. 이로 인해 backbone router는 다른 router에 비해서 다수의 링크를 갖게 된다. 다수의 링크를 가진 노드를 ‘rich node’라 일컫고 ‘rich node’의 집합을 ‘rich club’이라 부른다 [10]. 다수의 링크를 가진 backbone router 간의 링크의 mesh한 연결 정도를 적용하기 rich club coefficient  $\phi$ 를 도입하였으며, 그 계산은 아래 [수식1]에 따른다.

$$\phi = \ell / (N(N-1)/2)$$

- $\phi$  : rich club coefficient
- $\ell$  : 실제 연결된 링크 수
- $N$  : backbone routers의 개수
- $N(N-1)/2$  : 연결 가능한 최대 링크 수

[수식 1] rich club coefficient 계산식

본 논문에서 생성하는 POP 토폴로지는 각 router의 레벨마다 링크를 통해 connectivity를 제공한다. 어떤 노드와 연결할지를 결정하는 connectivity는 다수의 degree를 가진 노드에 연결될 확률이 높다는 것을 이용한 preferential attachment[n]와 가까운 거리에 있는 노드와 연결될 확률이 높은 waxman model[]을 적용비율 (가중치:  $\alpha$ )의 조정을 통해 connectivity를 아래 [수식2]와 같이 계산하여 결정하였다.

- preferential attachment
 
$$w_i^j = \text{MAX}(1, \sqrt{(\log \frac{d_i}{d_j})^2 + (\log \frac{f(d_i)}{f(d_j)})^2}) \times d_j$$
  - $d_i$  : i 노드의 degree의 값
  - $d_j$  : j 노드의 degree의 값
  - $f(d_i)$  :  $d_i$  값을 갖는 노드들의 수
  - $f(d_j)$  :  $d_j$  값을 갖는 노드들의 수
- waxman model
 
$$P(u, v) = \alpha \times e^{-d / (\beta L)}$$
  - $P(u, v)$  : probability of edge (u, v)
  - $d$  : Euclidean distance (u, v)
  - $\alpha, \beta$  : constants
  - $L$  : maximum distance
- connectivity
 
$$C_i^j = \alpha \frac{W_i^j}{W_{\max}} + (1 - \alpha) \frac{D_i^j}{D_{\max}}$$

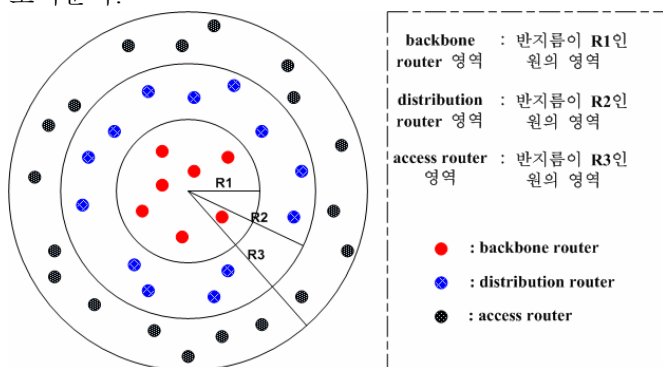
[수식 2] 가중치를 이용한 connectivity 계산식

위의 두 가지 연결 모델에 대한 가중치의 조정을 통해 다양한 연결형태를 갖는 POP 토폴로지를 구성할 수 있다.

### 3.3 POP 토폴로지 생성 도구

위의 POP 토폴로지의 생성 알고리즘을 적용한 POP 토폴로지 생성 시스템을 구현하였다. 또한 생성된 POP 토폴로지의 모습을 확인하기 위해 viewer를 개발하였다. INET-3.0으로 생성한 토폴로지의 모습과 우리가 구현한 POP Generator의 토폴로지 모습을 비교하고, 연결 방법의 가중치를 조정하면서 토폴로지의 모습을 확인하였다.

토폴로지의 모습을 표현하기 위해 우선 토폴로지를 구성하는 라우터들에 대한 좌표값을 설정하였다. 우리의 POP Generator에서는 라우터의 종류에 따라 좌표값의 영역을 결정하였다. 결정된 영역 내에서 각 라우터의 좌표 값을 정규 분포에 따라 random하게 설정하였다. (그림 3)은 라우터의 종류에 따른 좌표의 영역을 보여준다.



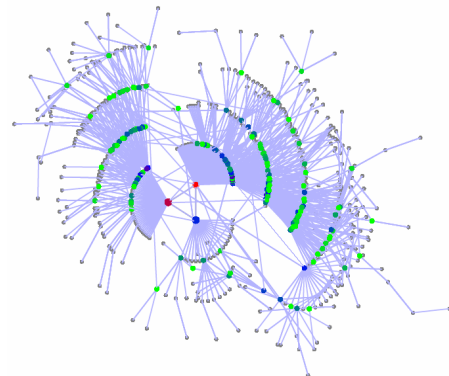
[그림 3] 라우터의 종류에 따른 좌표의 영역

POP Generator의 connectivity 모델에 의한 SRC노드와 DST노드간의 링크의 연결정보를 이용하여 [그림 3]에서의 라우터들 간에 링크를 그려준다. 이러한 drawing 방법을 통해 생성된 POP 토폴로지는 사용자에게 visual하게 제공된다.

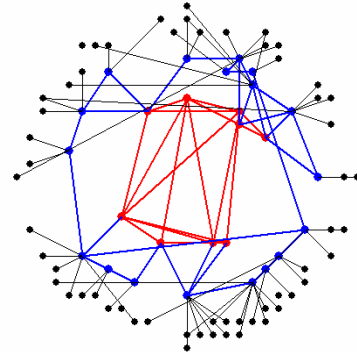
INET-3.0으로 생성된 토폴로지와 우리가 제안한 방법의 POP Generator로 생성된 토폴로지의 모습을 비교하였다. [그림 4] INET-3.0으로 생성된 토폴로지 모습과 POP Generator로 생성된 토폴로지의 모습을 보여준다.

### 4. 결론

본 논문에서는 인터넷을 구성하는 가상 하위 레벨의 POP 네트워크를 자동 생성하는 방법에 대해서 살펴보고 이를 시스템으로 구현하였다. POP 네트워크를 구성하는 라우터를 backbone router, distribution router, access router 로 구분하고 각 라우터의 레벨에 대해서 다양한 파라미터를 제공하였다. 앞으로 실제 POP 토폴로지를 특성을 반영하는지를 시뮬레이션을 통해 알아보고 다수의 POP 네트워크로 구성되는 ISP 토폴로지의 다양한 파라미터를 조사할 예정이다..



a) INET-3.0을 이용하여 생성한 토폴로지



b) POP Generator를 이용하여 생성한 토폴로지  
[그림 4] INET-3.0과 POP Generator로 생성된 토폴로지

### 참고문헌

- [1] Michael Liljenstam, Yougu Yuan, BJ Premore, David Nicol., "A Mixed Abstraction Level Simulation Model of Large-Scale Internet Worm Infestations", In proceedings of IEEE International Symposium on MASCOTS'2002.
- [2] Yu Liu, Bolesasw K. Szymanski., "Distributed Packet-Level Simulation for BGP Networks under Genesis", Proc. Summer Computer Simulation Conference SCSC04, July 2004, SCS Press, San Diego, CA, pp. 271-278.
- [3] Y. Liu, et al., "Scalable Fluid Models and Simulations for Large-Scale IP Networks", ACM TOMACS'2004.
- [4] Y. Gu, Y. Liu, D. Towsley., "On Integrating Fluid Models with Packet Simulation", IEEE INFOCOM'2004.
- [5] K. Calvert, J. Eagan, S. Merugu, A. Namjoshi, J. Stasko, E.Zegura., "Extending and Enhancing GT-ITM".
- [6] Jared Winick, Sugih Jamin., "Inet-3.0: Internet Topology Generator".
- [7] Beichuan Zhang, Raymond Liu, Daniel Massey, Lixia Zhang., "Collecting the Internet AS-level Topology", ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR), special issue on Internet Vital Statistics, January, 2005.
- [8] Neil Spring, Ratul Mahajan, David Wetherall., "Measuring ISP Topologies with Rocketfuel", SIGCOMM 2002.
- [9] White Paper Internet Korea 2003.
- [10] Shi Zhou, Raul J. Mondragon., "The Rich-club phenomenon in the topology", IEEE Communication Letters., September 2003.
- [11] B. Waxman., "Routing of Multipoint Connections", IEEE J. Select. Areas Commun., December 1988.