

# BA 모델을 기반으로 한 한국 인터넷 AS 망 생성 방법

이강원\*, 문성욱\*, 김봉환\*, 전수연\*

## Generaion Method of Korea Internet AS Network Using BA Model

Kang-won Lee\*, Sung-wook Moon\*, Bong-hwan Kim\*, Soo-yeon Jun\*

### 요약

본 연구에서는 한국 인터넷 자율시스템(Autonomous System, AS) 망과 유사한 특성을 갖는 망을 만들어 나가는 과정을 조사하였다. 이를 위해 먼저 실제 한국 인터넷 자율시스템 망의 특성을 파악하였다. 그리고 한국 인터넷 자율시스템 망 생성에 가장 적합한 망 생성 모델로 수정된 BA(Barabasi Albert) 모델을 제안하였다. 서로 다른 세 가지 초기 망 하에서 파라메타 값을 조절해 나가면서 망을 생성한 후 이들을 분석하였다. 본 연구 결과 생성된 망은 평균 노드 개수가 실제 한국 인터넷 망과 거의 비슷하면서 Power-law 특성을 보여 주었다. 아울러 군집화 계수 값도 한국 자율시스템 인터넷 망과 유사하게 매우 낮은 고무적인 결과를 얻었다. 허브 노드의 개수는 초기 망에 따라 달라지는데 적절한 초기 망을 선택하면 한국 자율시스템 인터넷 망과 같은 개수의 허브 노드를 생성할 수 있었는데 최대 노드 차수가 한국 자율시스템 인터넷 망에 비해 다소 작게 나온다는 한계가 있었다.

**Key Words** : AS(Autonomous System), BA(Barabasi Albert) Model, Power-law, Clustering Coefficient

### ABSTRACT

In this study we investigate to generate a network which has similar characteristics to Korea Internet AS(Autonomous System) network. First of all characteristics of Korea Internet AS network are identified. And revised BA(Barabasi Albert) model is proposed, which is believed to be best fit for generating Korea Internet AS network. Under three different initial networks three different networks are generated by tuning parameters and analyzed. The generated network shows very similar average node degree to Korea Internet AS network, Power-law property, and also low clustering coefficient. The number of super hub node depends on the initial network. Therefore, through selecting proper initial network same number of hub node can be generated as that of Korea Internet AS network. However, there is a limitation that number of maximum node degree is somewhat less than that of Korea Internet AS network.

### I. 서론

인터넷의 확산으로 네트워크의 크기가 커지고 라우팅 정보가 방대해지자, 전체 네트워크를 하나의 라우

팅 프로토콜로 관리하는 것이 불가능해졌다. 이에 따라서 네트워크의 관리범위를 계층적으로 체계화하고 라우팅 정보를 효율적으로 관리하기 위하여 자율시스템이 도입되었다. 동일한 라우팅 정책으로 하나의 관

※ 본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

•° First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-5644-4490)Seoul National University of Science & Technology, Department of Industrial Information System Engineering, kwlee@seoultech.ac.kr, 정회원

\* Seoul National University of Science & Technology, Department of Industrial Information System Engineering  
논문번호 : KICS2018-04-085, Received April 17, 2018; Revised May 25, 2018; Accepted May 28, 2018

리자에 의하여 운영되는 네트워크로 한 기관이나 단체에서 관리하는 라우터 집단을 자율시스템이라 하며, Fig. 1에서 보듯이 각각의 자율 시스템을 식별하기 위한 인터넷 상의 고유한 숫자를 자율시스템 번호라 한다.

인터넷 위상 연구는 크게 두 가지 관점에서 이루어 지는데 라우터 수준의 연구는 각 노드를 라우터로 표현하며 링크는 라우터 간 연결을 나타낸다. 자율시스템 수준의 연구에서는 각 노드를 각각의 자율시스템으로 링크는 자율시스템 간 연결로 표현한다. 이 중에서 자율시스템 수준의 위상에 대한 연구가 주요 연구 대상이 되어왔다<sup>11-31</sup>. 그 주된 이유는 자율시스템은 인터넷의 가장 상위에 위치한 구조라서 다른 수준의 인터넷 위상은 자율시스템 수준 위상에 의존적이고 인터넷의 End-to-End 서비스 품질 수준은 자율시스템 간 트래픽 흐름과 정체에 매우 의존적이기 때문이다. 한편 자율시스템 간 BGP(Border Gateway Protocol) 라우팅과 트래픽 흐름은 자율시스템 운영기관이 최적 성능보다는 경제적, 정책적인 요인에 따라 결정하기 때문에 예측하기가 매우 힘들다. 그러나 BGP 라우팅 테이블로부터 자율시스템의 위상 파악과 자율시스템 간의 상호관계 분석을 통해 어느 정도 라우팅과 트래픽 흐름을 예측할 수 있다. 그리고 자율시스템 수준의 인터넷 위상을 파악하기 위한 라우팅 데이터는 BGP<sup>41</sup>나 IRR(Internet Routing Registry)<sup>51</sup>, IXP(Internet Exchange Point) 데이터<sup>61</sup>로부터 상대적으로 획득하기 쉽다.

인터넷의 급격한 성장으로 인터넷네트워킹과 관련된 라우팅, 자원예약, 관리운영과 같은 문제들이 광범위하게 발생하여 왔다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 실제 인터넷 상에서 새로운 알고리즘, 관리 정책들을 적용하여 테스트하는 것이 가장 좋은 방법이겠지만, 실제 인터넷 상에서 테스트는 불가능하다. 그 때문에 인터넷 자율시스템 망 위상과 유사한 모델에서 시물

레이션을 통해 알고리즘과 정책들을 분석, 평가하는 방법이 사용되어 진다. 인터넷 자율시스템 망과 유사한 특성을 가지는 모델을 만들기 위해서 실제 인터넷의 특성을 알아야 하며, 이로부터 동일한 특성을 가지는 망을 생성할 수 있어야 한다.

국내외적으로 실제 인터넷의 위상 특성을 파악하기 위한 여러 연구가 있었다. Faloutsos 등은<sup>7-91</sup> Routeview<sup>61</sup>와 RIPE-RIS<sup>101</sup>가 제공하는 BGP 라우팅 테이블로부터 인터넷 자율시스템의 위상 특성을 분석하였고 자율시스템의 노드 차수가 Power-law 분포를 따른다는 것을 확인하였다. 한편 국내에서는 오동익 등이<sup>11,121</sup> 다음의 세 가지 데이터 소스를 이용하여 인터넷 자율시스템의 위상 특성을 분석하였다;1)BGP 데이터를 위한 UCLA의 Internet Topology Collection<sup>41</sup>, 2)Internet Routing Registry 데이터<sup>131</sup>, 3)Internet Exchange Point 데이터<sup>61</sup>. 이 데이터들을 토대로 국내 인터넷 자율시스템 망의 노드 차수도 Power-law 분포를 따른다는 것을 보였다. 아울러 군집화 계수(Clustering Coefficient)와 평균 최단거리(Average Shortest Path Distance)도 도출하였다.

그러나 인터넷 자율시스템의 위상 특성을 분석한 자료를 바탕으로 동일한 특성을 가지는 인터넷 자율시스템 망을 생성하는 연구는 아직 본격적으로 시도 되지 않았다. 실제 자율시스템 망과 동일한 특성을 갖는 인터넷 망을 생성하는 것은 다음의 관점에서 중요한 의미를 갖는다. 첫째, 인터넷의 망 관련 다양한 알고리즘을 분석하고 평가하는 데 중요한 역할을 한다. Magnoni 등은<sup>141</sup> 네트워크 생성 모델이 망의 프로토콜이나 알고리즘을 평가하는 데 중요한 역할을 한다고 밝혔다. 즉, 제안한 알고리즘이나 프로토콜의 성능이나 효율성은 인터넷 자율시스템 망의 연결 구조에 매우 민감하다는 것을 보여주었다. 둘째, 위상의 특성을 이용하여 더욱 효율적인 알고리즘을 개발할 수 있게끔 한다. 셋째, 네트워크의 사고와 공격에 더욱 신뢰할 수 있는 네트워크 구조를 구축하는 데 도움을 줄 수 있다. 마지막으로 향후 급격하게 성장할 인터넷에 적합한 전략을 계획하고 설계할 수 있게 해준다. 따라서 본 논문에서는 실제 한국 자율시스템 망의 특성을 파악한 뒤, 새로운 알고리즘, 관리 정책들의 시뮬레이션을 위해 실제 자율시스템 망과 유사한 특성과 구조를 갖는 망 생성을 목적으로 한다. 이를 위하여 서로 다른 세 가지 초기 망 하에서 파라메타 값을 조절해 나가면서 망을 생성한 후 이들의 특성을 분석하고 한국 인터넷 자율시스템 망과 비교하였다.

서론에 이어 2장에서는 한국 자율시스템 망의 특성



그림 1. AS 망의 개요도  
Fig. 1. AS Network

을 살펴보고 3장에서는 망 생성 모델을 살펴보았다. 4장에서는 3장에서 제안한 모델을 토대로 망들을 생성한 후 이들의 특성과 한국 인터넷 자율시스템 망의 특성을 비교 분석하고 5장에 최종 결론을 수록하였다.

## II. 한국 자율시스템 망의 특성

본 연구자들은 이전 연구<sup>[11]</sup>에서 1)BGP 데이터를 위한 UCLA의 Internet Topology Collection<sup>[4]</sup>, 2)Internet Routing Registry 데이터<sup>[5]</sup>, 3)Internet Exchange Point 데이터<sup>[6]</sup> 등 3개의 데이터를 토대로 한국 인터넷 자율시스템 망의 위상 분석을 수행하였다. 다음 Table.1은 한국 인터넷 자율시스템 망의 위상 특성을 나타낸다.

전체 685개의 노드와 1,428개의 링크가 있으며 평균 노드 차수는 4.17개다. 이 중에서 노드 차수가 가장 큰 노드는 384개의 링크를 가지고 있는데 평균보다 매우 큰 허브 노드가 존재함을 보여 준다. 군집화 계수는 노드 간의 군집화 정도를 나타낸다. 망 구조에 있어 군집화란 한 노드에 연결된 서로 다른 두 노드 역시 서로 연결이 되어 있는 정도를 말한다. 일반적으로 Small-World 망의 군집화 계수는 높은 값을 갖는데 사회 연결망이 대표적인 경우다. 한국 인터넷 자율시스템 망에서는 군집화 계수 값이 0.0025로 굉장히 낮은 값을 갖는다.

한국 인터넷 자율시스템 망의 노드 차수는 Fig. 2에서 보듯이 Power-law 분포를 따르는 것으로 나타났다. Fig. 2는 노드 차수를 로그 스케일로 나타낸 것으로 기울기가 직선에 가까울수록 Power-law 성질을 갖는다. Power-law 분포는 긴 꼬리(Long-Tail)의 특성을 갖는 분포로 평균보다 월등히 큰 소수의 허브가 존재하며, 대부분의 노드 차수는 평균 이하의 값을 갖는 분포를 말한다. Power-law 분포를 따르는 한국 자율시스템 망의 경우, 노드 중 93.7%의 노드 차수는 평균

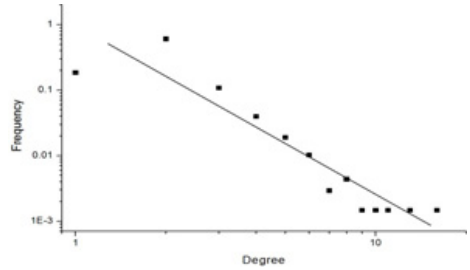


그림 2. 노드 차수 분포  
Fig. 2. Node Degree Distribution

값 4.17보다 낮은 값을 가지며 Power-law 분포의 파라메타 값은 -2.49이다.

위에서 살펴본 것처럼 한국 인터넷 자율시스템 망은 Power-law 성질을 갖고 있는 Scale-Free 망으로 평균보다 매우 노드 차수가 큰 소수의 허브 노드가 존재하며 대부분의 노드는 평균 이하의 노드 차수를 갖는다. 반면에 군집화 계수는 매우 낮은 값을 갖는다. 따라서 이러한 자율시스템 망을 생성하기 위해서는 Power-law 특성을 잘 표현해 주고 또한 평균 노드 차수와 최대 노드 차수를 적절하게 조절해 나갈 수 있는 망 생성 모델이 필요하다.

## III. BA(Barabasi Albert) 모델을 기반으로 한 망 생성

망 생성을 위해서는 그 용도에 따라 다양한 모델이 연구되어 왔다. 생화학 망을 위한 모델<sup>[15]</sup>, 사회 연결망 생성을 위한 모델<sup>[16]</sup>, 그리고 Small-World 특성과 Scale-Free 특성을 나타내 주는 모델<sup>[17,18]</sup> 등 다양한 모델이 연구되어 왔다. 그런데 Power-law 성질을 갖고 있는 Scale-Free 망을 매우 효율적으로 생성해 주는 모델이 BA 모델이다<sup>[19]</sup>. 그러나 BA 모델에는 Power-law 성질의 크기를 조절할 수 있는 파라메타가 없으므로 본 연구에서는 이를 위해 BA 모델을 수정하여 사용하였다. 아울러 BA 모델에서는 매 단계마다 m개의 링크를 갖는 새로운 노드가 추가되는데 이때 m은 상수다. 그런데 실제로 신규 노드의 링크 개수가 상수인 것은 비현실적이라 이를 평균 M을 갖는 지수 분포로 가정하여 사용했다.

### 3.1 BA 모델

BA 모델에서는 새롭게 추가된 노드 i는 네트워크에 존재하는 기존의 노드 j에 연결되는데 노드 j에 연결될 확률은 다음 식으로 주어진다.

표 1. 한국 자율시스템 망 위상 특성 데이터[11]  
Table 1. Characteristics of Korea Internet AS Network Topology[11]

|                        | Korea AS Network |
|------------------------|------------------|
| Num. of Nodes          | 685              |
| Num. of Links          | 1,428            |
| Avg. Node Degree       | 4.17             |
| Max. Node Degree       | 384              |
| Clustering Coefficient | 0.0025           |
| Power-law Property     | Yes              |

$$P_j = \frac{d_j}{\sum_{i \in S} d_i} \quad (1)$$

식 (1)에서  $d_j$  는 노드  $j$ 의 차수 즉 링크의 개수를 나타내며  $S$ 는 현재 네트워크에 존재하는 노드들의 집합이다. 위 확률 식을 사용하면 통해 소위 ‘Rich node becomes richer’가 발생하기 때문에 허브 노드가 생성되고 이로부터 Power-law 성질이 나타나게 된다. 그러나 Power-law 성질의 세기를 조절해주는 파라메타가 존재하지 않기 때문에 허브 노드의 크기를 조절해 나갈 수는 없다. 따라서 본 연구에서 식(1)을 그대로 사용하지 않고 다음 3.2에서 수정된 BA 모델을 제안하였다.

### 3.2 수정된 BA 모델

본 연구에서 제안하는 수정된 BA 모델은 초기, 성장, 그리고 수정된 BA 과정 세 개의 단계로 구성된다.

- 1) 초기: 네트워크:  $n_0$  노드와  $m_0$  개의 링크로 이루어진 초기 네트워크를 임의로 구축한다.
- 2) 성장: 매 단계마다  $m$ 개의 링크를 갖는 노드  $i$ 가 추가되는데 노드의 개수가  $N$ 개가 될 때까지 반복된다. 이때  $m$ 은 평균  $M$ 을 갖는 지수분포를 따른다.
- 3) 수정된 PA 과정: 새롭게 추가된 노드  $i$ 는 네트워크에 존재하는 기존의 노드  $j$ 에 연결되는데 노드  $j$ 에 연결될 확률은 다음 식으로 주어진다.

$$P_j = \frac{d_j + \frac{K}{|S|}}{\sum_{i \in S} d_i + K} \quad (2)$$

식 (2)은 BA 모델의 연결 확률  $P_j$ 를 변형한 것으로  $|S|$ 는 노드들의 개수를 나타낸다. 분자의  $K$ 를  $|S|$ 로 나눈 이유는  $P_j$ 를 확률 값으로 만들기 위함이다. 위 식에서 파라메타  $K$ 를 통해 Power-law 성질의 크기를 조절해 나갈 수 있다. 즉, 위 식에서  $K = 0$  이면 기존의 BA 모델을 나타낸다. 노드  $i$ 가 노드  $j$ 에 연결될 확률은 노드  $j$ 의 차수에 비례하기 때문에 링크 수가 많은 노드에 연결될 확률이 높고, 이는 ‘Rich node becomes richer’ 라는 preferential attachment 과정을 따른다.

$K$ 가 증가하게 되면 차수가 많은 노드에 연결될 확률이 점차 줄어들어  $K = \infty$  가 되면 노드  $i$ 가 네트워크 내의 노드  $j$ 에 연결될 확률은 노드 차수와 무관하게 일정하게 된다. 즉, 이를 통해 생성된 망은

Power-law 성질이 존재하지 않는 Random Network에 가깝게 된다.

반대로 식 (2)의 분모나 분자가 음수가 되지 않는 범위 내에서  $K$ 가 0 이하로 감소하게 되면 새로운 노드가 링크 수가 많은 노드에 연결될 확률이  $K = 0$ 에 비해 커지게 된다. 그러면 ‘Rich node becomes richer’ 현상이 더 강력하게 나타나 노드 차수가 매우 많은 강력한 허브 노드들을 생성할 수 있게 된다. 그리고 이로 인해 Power-law 성질이 더 강하게 나타난다.

즉,  $K$ 를 도입함으로써 기존 방법인  $K = 0$ 인 기존의 BA 모델에 비해  $K$ 가 커지면 Random Network에 가깝게 되어 허브 노드들의 존재 가능성이 점점 없어지고  $K$ 가 일정 범위 내에서 0 이하의 값으로 작아지게 되면 노드 차수가 많은 강력한 허브 노드들이 존재할 가능성이 높아지게 된다. 그런데  $K$ 값의 변화는 군집화 계수에 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는  $K$ 값을 변화시켜 나가면서 군집화 계수 값의 추이를 살펴본 후에  $K$ 값을 적절히 조정해 나가는 방법을 선택하였다.

## IV. 자율시스템 유사 망 생성

본 장에서는 3.2장에서 제시한 수정된 BA 모델을 바탕으로 한국 인터넷 자율시스템 망과 유사한 망 생성을 시도하였다.

### 4.1 파라메타

#### 4.1.1 초기망(Initial Network)

먼저  $n_0$  노드와  $m_0$  개의 링크로 이루어진 초기 네트워크를 임의로 구축한다. 그런데 BA 모델에서는 초기 망에 따라 생성되는 망의 특성이 달라지기 때문에 본 연구에서는 다음의 3가지 초기 망을 사용하여 각각 망을 생성하였다.

#### (1) Triangular Network

다음 Fig. 3과 같이 3개의 노드로 구성된 Triangular Network를 초기 망으로 사용하였다.

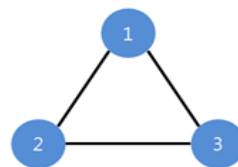


그림 3. 삼각형 망  
Fig. 3. Triangular Network

(2) Star Network

다음 Fig. 4과 같이 5개의 노드로 구성된 Star Network를 초기 망으로 사용하였다.

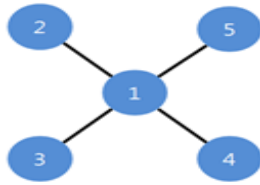


그림 4. 성형 망  
Fig. 4. Star Network

(3) Double Star Network

다음 Fig. 5과 같이 10개의 노드로 구성된 Double Star Network를 초기 망으로 사용하였다.

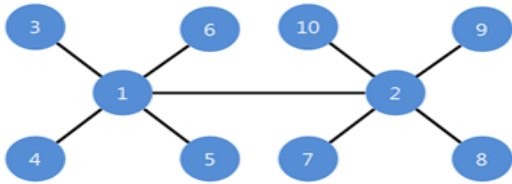


그림 5. 더블 성형 망  
Fig. 5. Double Star Network

4.1.2 신규로 추가되는 노드의 링크 수 m

새로운 노드가 망에 들어올 때 주어지는 링크 수를 나타내는 m은 보다 현실적인 망 생성을 위해서 고정된 값을 이용하는 것보다 평균 M을 갖는 지수분포를 가정하였다. 그런데 한국 인터넷 자유키스뎨 망의 평균 노드 차수가 4.17 임을 고려하면 M은 4.17 보다 작은 값을 갖아야 한다. 본 연구에서는 생성된 망의 평균 노드 차수가 한국 인터넷 자유키스뎨 망의 평균 노드 차수 4.17과 유사한 값을 갖도록 여러 번의 시행을 거쳐서 평균 M을 4로 설정하고 m 값은 Max(1, 평균 4를 갖는 지수 분포의 난수)의 정수 부분으로 정하였다.

4.1.3 K 값

K값에 따라 허브 노드의 존재 유무뿐 아니라 허브 노드의 노드 차수가 변한다. 그리고 군집화 계수도 K값에 영향을 받는다. 그런데 한국 인터넷 자유키스뎨 망에는 평균 노드 차수 4.17에 비해 노드 차수가 384 개나 되는 Super 허브 노드가 존재한다. 이러한 망을 생성하기 위해서는 K값을 0 이하로 가능한 한 작게 하여 Super 허브 노드를 만들어야 하는데 이 경우 군

집화 계수가 증가할 우려가 있다. 한국 인터넷 자유키스뎨 망의 군집화 계수는 0.0025로 매우 낮은 값을 갖는다. 본 연구에서는 먼저 허용 가능한 가장 작은 K값을 선정하여 이를 이용하여 망을 생성한 후 Power-law 검증과 노드 차수 분포를 조사하였다. 생성된 망이 Power-law 성질을 갖고 있고 Super 허브 노드들이 존재하는 노드 차수 분포를 보여 주면 K값을 증가시켜 나가면서 군집화 계수의 추이를 살펴볼 것이다. 반면에 먼저 허용 가능한 가장 작은 K값 하에서도 노드 차수 분포가 Power-law 분포를 따르지 않으면 더 이상의 분석은 의미 없다고 판단하여 분석을 중단하였다. 왜냐하면, K값을 증가시켜 나가면 Power-law 성질은 더 없어지기 때문이다.

4.2 망 생성 결과 및 분석

4.2.1 Triangular Network

Triangular Network 초기 망에서 허용 가능한 K 값의 하한값은 -5 다. 이 값을 사용하여 망을 생성해 보면 다음 Fig. 6과 같다. 그림에서 노드의 크기는 노드 차수, 즉 노드의 링크 개수를 나타낸다. 따라서 강력한 허브 노드일수록 노드는 크게 표현된다.

이때 노드 차수 분포와 Power-law 검증이 Fig. 7에 나와 있다.

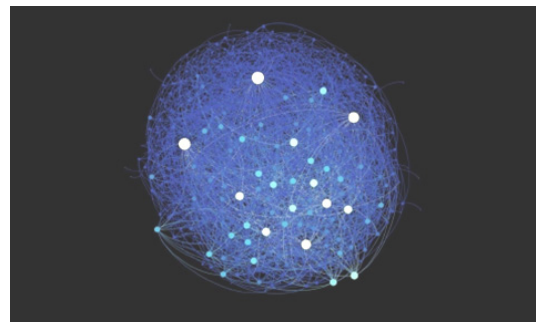


그림 6. 삼각형 초기 망을 이용하여 생성한 망  
Fig. 6. Network Generated from Initial Triangular Network

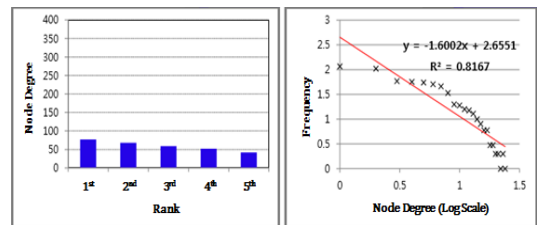


그림 7. 노드 차수 분포와 Power-law 검증  
Fig. 7. Node Degree Distribution and Power-law Test

Fig. 7에서 보듯이 Triangular Network를 초기 망으로 사용해 생성된 망은 Power-law 특성을 나타내지 못한다. 최대 노드 차수도 77개에 불과해 한국 인터넷 자율시스템 망의 384개에 비하여 현저히 낮다.  $K$ 값을 증가시키는 것은 Power-law 특성이 더 나타나지 않고 최대노드 차수도 줄어들기 때문에 의미가 없어 보인다. 결론적으로 Triangular Network를 초기 망으로 사용하면 한국 인터넷 자율시스템 망과 유사한 망을 생성하는데 어려움이 있다.

#### 4.2.2 Star Network

Star Network 초기 망에서 허용 가능한  $K$  값의 하한값은 -9 다. 이 값을 사용하여 망을 생성해보면 다음 Fig. 8과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 매우 큰 허브 노드가 1개 존재함을 볼 수 있다.

이때 노드 차수 분포와 Power-law 검증이 Fig. 9에 나와 있다.

Fig. 9에 보듯이 Star Network를 초기 망으로 사용해 생성된 망은 Triangular Network에 비해 Power-law 특성을 조금 더 보여준다. 최대 노드 차수도 한국 인터넷 자율시스템 망의 384개에 비하여 작지만 301개로 Super 허브 노드가 존재함을 보여준다. 다음 Table. 2에서 보듯이 평균 노드 개수도 4.146으

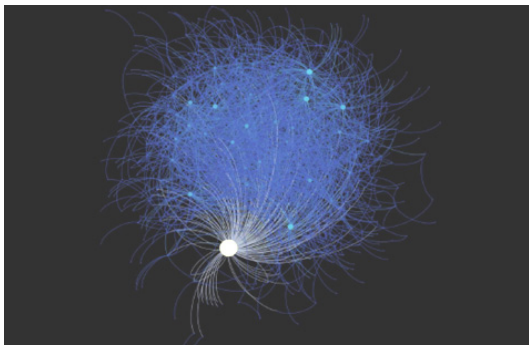


그림 8. 성형 초기 망을 이용하여 생성한 망  
Fig. 8. Network Generated from Initial Star Network

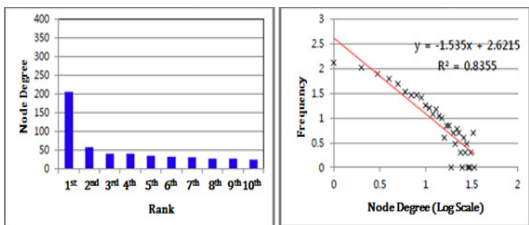


그림 9. 노드 차수 분포와 Power-law 검증  
Fig. 9. Node Degree Distribution and Power-law Test

표 2. 생성한 망의 특성  
Table 2. Characteristics of Generated Network

|                        | Generated Network | Korea AS Network |
|------------------------|-------------------|------------------|
| Num. of Nodes          | 685               | 685              |
| Num. of Links          | 1,420             | 1,428            |
| Avg. Node Degree       | 4.146             | 4.17             |
| Max. Node Degree       | 301               | 384              |
| Clustering Coefficient | 0.0192            | 0.0025           |

로 거의 일치한다.

군집화 계수는 0.0192로 다소 높지만, 절대적인 값이 작아 큰 문제는 없어 보인다.  $K$ 값에 따른 군집화 계수 값의 변화를 다음 Fig. 10에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이  $K$ 값을 증가시키면 군집화 계수 값은 어느 정도 낮아지지만 그 절댓값이 작아 감소 추이는 미미하다. 반면에  $K$ 값을 증가시키면 지금도 완벽하지 않은 Power-law 성질이 감소해 최대 노드 차수는 줄어들 수밖에 없어 Super 허브 노드의 차수가 감소한다. 따라서 절대적인 값이 0.0192로 매우 작은 군집화 계수를 더 감소시키기 위하여  $K$ 값을 증가시키는 것은 무의미 해 보인다.

그러나 본 모델의 한계점은 Fig. 9의 노드 차수 분포에서 보듯이 Super Hub 노드가 1개 존재한다는 것이다. 한국 자율시스템 망은 Super Hub 노드가 2개 존재하고 전체 93.7%의 노드가 평균 수치보다 낮은 데에 비해, 생성된 망은 허브 노드가 단 1개로 96.5%의 노드가 평균 수치보다 낮다.

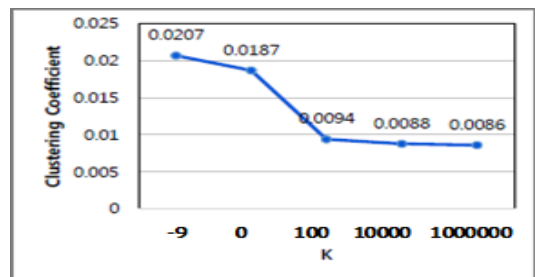


그림 10.  $K$  값에 따른 군집화 계수 값  
Fig. 10. Clustering Coefficient according to  $K$

#### 4.2.3 Double Star Network

Double Star Network 초기 망에서 허용 가능한  $K$  값의 하한값은 -17 이다. 이 값을 사용하여 망을 생성해보면 다음 Fig. 11과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 강력한 허브 노드가 2개 존재함을 알 수 있다.

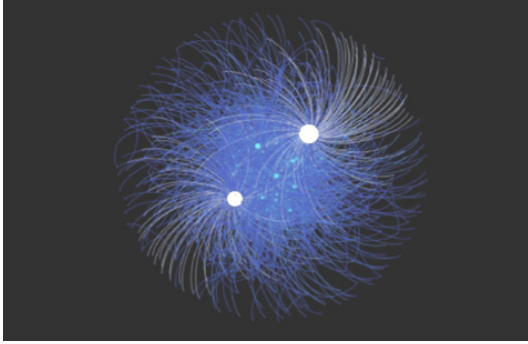


그림 11. 더블 성형 초기 망을 이용하여 생성한 망  
Fig. 11. Network Generated from Initial Double Star Network

이때 노드 차수 분포와 Power-law 검증이 Fig. 12에 나와 있다.

Fig. 12에서 보듯이 Double Star Network를 초기 망으로 사용해 생성된 망은 앞의 두 경우에 비해 가장 잘 Power-law 특성을 나타낸다. 노드 차수 228개와 193개를 갖는 Super Hub 노드가 한국 자율시스템 인터넷 망과 유사하게 2개 존재하며 다음 Table. 3에서 보듯이 평균 노드 개수도 4.146으로 거의 일치한다.

군집화 계수는 0.0226으로 다소 높지만, 절대적인 값이 작아 Star Network 경우와 마찬가지로 큰 문제는 없어 보인다.  $K$ 값에 따른 군집화 계수 값의 변화를 다음 Fig. 13에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이  $K$ 값을 증가시키면 군집화 계수 값은 어느 정도 낮아지지

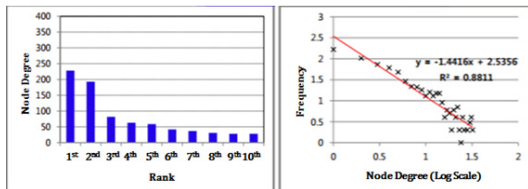


그림 12. 노드 차수 분포와 Power-law 검증  
Fig. 12. Node Degree Distribution and Power-law Test

표 3. 생성한 망의 특성  
Table 3. Characteristics of Generated Network

|                        | Generated Network | Korea AS Network |
|------------------------|-------------------|------------------|
| Num. of Nodes          | 685               | 685              |
| Num. of Links          | 1,420             | 1,428            |
| Avg. Node Degree       | 4.146             | 4.17             |
| Max. Node Degree       | 228               | 384              |
| Clustering Coefficient | 0.0226            | 0.0025           |

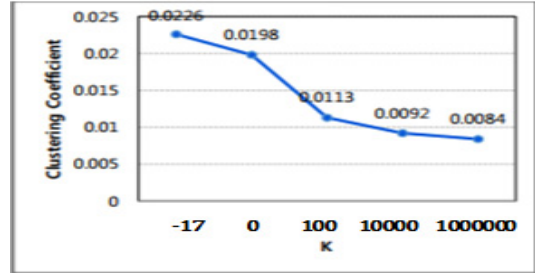


그림 13.  $K$  값에 따른 군집화 계수 값  
Fig. 13. Clustering Coefficient according to  $K$

만 그 절댓값이 작아 감소 추이는 미미하다. 반면에  $K$  값을 증가시키면 Power-Law 성질이 감소해 최대 노드 차수는 줄어들 수밖에 없어 Super 허브 노드의 차수가 감소하게 된다. 지금도 Super 허브 노드의 최대 차수가 228개로 실제 자율시스템 망의 384개보다 작기 때문에  $K$ 값을 증가시키는 것은 곤란하다. 따라서 절대적인 값이 0.0226으로 매우 작은 군집화 계수를 더 감소시키기 위하여  $K$ 값을 증가시키는 것은 Star Network 경우와 마찬가지로 무의미 해 보인다.

Super Node의 개수가 2개로 늘어났지만, 최대 노드 차수가 228개로 한국 인터넷 자율시스템 망의 384개와 차이가 있다. 이는 Super Node의 개수가 늘어났기 때문에 발생하는 어쩔 수 없는 BA 모델의 한계로 보인다.

## V. 결론

본 연구에서는 수정된 BA 모델을 바탕으로 망 특성에 관련한 일련의 변수들을 조절해나가며 한국 자율시스템 망과 유사한 특성을 갖는 망을 만들어 나가는 과정을 조사하였다. 첫째 망 생성 초기에 설정하는 초기 망의 형태에 따라 생성되는 망의 여러 특성치들이 달라질 수 있고 허브 노드의 개수와 노드 차수 등에 영향을 미친다. 본 연구에서는 3가지 서로 다른 초기 망 하에서 망 생성을 시도 하였다. 둘째 새로운 노드가 망에 진입할 때 연결 가능한 링크 수는 보다 현실적인 망 생성을 위해 상수 값을 이용하지 않고 지수 분포를 따르는 난수를 이용하였다. 셋째, 기본적인 BA 모델을 이용한다면 Hub 노드의 크기를 조절하는 것이 불가능하므로 이를 조절할 수 있도록 새로운 파라메타  $K$ 를 도입하였다.

본 연구 결과 초기 망을 Star Network와 Double Star Network로 할 경우 평균 노드 개수가 실제 한국 인터넷 망과 거의 비슷하게 나타났다. 그리고 차수가

매우 큰 허브 노드들이 존재하고 대부분 노드들의 차수가 노드의 평균 차수 보다 작은 Power-law 특성도 보여 주고 있다. 아울러 군집화 계수도 각각 0.0192와 0.021로 낮은 값을 나타내 한국 인터넷 AS 망과 유사한 특성을 보여주고 있다. 다만 Star Network의 경우는 최대 노드 차수가 301개로 비교적 한국 인터넷 자율시스템 망에 근접했지만, Super 허브 노드가 단 한 개 존재한다는 한계가 있었다. Double Star Network의 경우에는 노드 차수 228개와 193개를 갖는 Super 허브 노드가 한국 자율시스템 인터넷 망과 유사하게 2 개 존재하지만, 최대 노드 차수가 다소 작게 나온다는 한계가 있었다.

망 생성에는 본 연구에서 이용한 BA 모델 외에도 굉장히 다양한 모델이 존재한다. BA 이외의 다른 모델을 기반으로 한국 자율시스템 망과 유사한 망을 생성하여 본 연구결과와 비교 분석하는 후속 연구가 이어지길 기대한다.

본 연구는 한국 인터넷 자율시스템 망 생성에 국한되어 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 모델을 일부 수정하면 허브의 크기만이 아니라 군집화 계수 또한 조정이 가능하기 때문에 다양한 분야의 망 생성에 응용 가능하다. 한 가지 예를 들면, 본 모델 생성 과정에 참고 문헌 [20]에서 제안한 Trial-Formation (TF) 과정을 추가한다면, 군집화 계수를 조정 할 수 있다. 결국 허브 노드의 크기와 군집화 계수를 모두 조정 가능한 망을 생성할 수 있게 되는데, 이는 큰 노드 차수를 갖는 허브 노드와 높은 값의 군집화 계수를 망의 성질로 갖는 소셜 네트워크 망 생성을 가능케 한다. 이에 대한 연구는 추후 연구로 남긴다.

## References

- [1] B. Zhang, R. Liu, D. Massey, and L. Zhang, "Collecting the internet AS-level topology," *ACM SIGCOMM, Comput. Commun. Rev.*, vol. 35, pp. 53-61, 2005.
- [2] H. Haddadi, D. Fay, A. Jamakovic, O. Maennel, A. W. Moore, R. Mortier, and S. Uhlig, "On the importance of local connectivity for Internet topology models," *ITC 21*, pp. 1-8, Sept. 2009.
- [3] H. S. Chang, R. Govindan, S. Jamin, S. J. Shencker, and W. Willinger, "Toward capturing representative AS-level Internet topologies," *Computer Netw.*, vol. 44, no. 6, pp. 737-755, 2004.
- [4] *UCLA IRL Internet topology collection*, Retrieved Feb. 2013, from <http://irl.cs.ucla.edu/topology/>
- [5] *APNIC FTP Korea IRR data*, Retrieved Feb. 2013, from <http://ftp.apnic.net/apnic/dbase/data/>
- [6] *Korea IX, ISP connectivity map*, Retrieved Feb. 2013, from <http://isis.kisa.or.kr/>
- [7] G. Siganos, M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "Power-laws and the Internet topology," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, no. 4, pp. 514-524, 2003.
- [8] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the internet topology," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 251-256, 1999.
- [9] Y. He, G. Siganos, and M. Faloutsos, "Internet topology," *Encyclopedia of complexity and Syst. Sci.*, pp. 4930-4947, 2009.
- [10] *RouteViews, routing table archive*, Retrieved Feb. 2013, from <http://www.routeviews.org/>
- [11] D. I. Oh and K. W. Lee, "Study of the korea internet topology generator for domestic AS-Level topology," *J. KICS*, vol. 38B, no. 06, pp. 417-426, Jun. 2013.
- [12] D. I. Oh and K. W. Lee, "A comparative study of the characteristics of the korea internet AS-level topology using node degree and node connectivity metrics," *J. KIICE*, vol. 16, no. 11, pp. 2365-2373, Nov. 2012.
- [13] *Internet Routing Registry*, Retrieved Feb. 2013, from <http://www.irr.net/>
- [14] D. Magnoni and J. J. Pansiot, "Influence of network topology on protocol simulation," *IEEE Inf. and Commun. Netw.*, pp. 762-770, 2001.
- [15] S. Wang, et al., "Dynamic analysis of biochemical network using complex network method," *Thermal Sci.*, vol. 19, no. 4, pp. 1249-1253, 2015.
- [16] R. D. Caux, et al., "Dynamic, small-world, social network generation through local agent interactions," *Complexity*, vol. 19, no. 6, pp. 44-53, 2014.



- [17] K. W. Lee, J. H. Lee, and H. Z. Choe, "Generalized network generation for small-world network and scale-free network," *J. KICS*, vol. 41B, no. 07, pp. 754-764, Jul. 2016.
- [18] K. W. Lee, H. K. Uhm, and H. Z. Choe, "Tunable network generation model for small-world and scale-free network," *J. KICS*, vol. 42, no. 07, pp. 1392-1401, Jul. 2017.
- [19] A. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509-512, Oct. 1999.
- [20] M. Q. Pasta and Z. Jan, "Tunable and growing network generation model with community structure," arXiv:1310.8396v2[cs.SI] Oct. 2014.

**이 강 원 (Kang-won Lee)**



1980년 : 서울대학교 산업공학과 학사 졸업  
1982년 : 서울대학교 산업공학과 석사 졸업  
1982년 : Kansas State Univ. 산업공학과 박사 졸업  
1989년~현재 : 서울과학기술대학교 산업공학과 교수

<관심분야> 정보통신 네트워크, O.R

**문 성 옥 (Sung-wook Moon)**



2012년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 산업공학과 학사  
<관심분야> 정보통신 네트워크, O.R

**김 봉 환 (Bong-hwan Kim)**



2012년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 산업공학과 학사  
<관심분야> 정보통신 네트워크, O.R

**전 수 연 (Soo-yeon Jun)**



2018년 2월 : 서울과학기술대학교 산업공학과 졸업  
<관심분야> 정보통신, 네트워크, O.R, 정보보안