

복잡계 네트워크기반 무선 애드혹 네트워크 설계 및 분석

정방철¹ · 강기홍² · 김정필³ · 박연식^{1*}

Design and Analysis of Wireless Ad Hoc Networks Based on Theory of Complex Networks

Bang Chul Jung¹ · Kee-Hong Kang² · Jeong-Pil Kim³ · Yeon-Sik Park^{1*}

¹ Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

² College of Humanities & Social Sciences, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 139-743, Korea

³ Department of Chinese Language and Literature, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

요 약

본 논문에서는 복잡계 네트워크 이론에 기반하여 무선 애드혹 네트워크를 분석하고 네트워크 토폴로지를 구성하는 방법에 관하여 제안한다. 본 논문에서는 기존의 복잡계 네트워크 연구가 무선 통신 채널의 특성을 정확히 반영하지 못한 부분을 개선하였으며, 랜덤 그래프 이론을 무선 통신 환경을 고려하여 확장하였다. 주요 결과로서 복잡계 네트워크 이론에 기반한 네트워크 토폴로지 구성이 전체 애드혹 네트워크 성능에 미치는 영향을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel analysis and design methodology based on complex network theory for wireless large-scale ad hoc networks. We also enhance the conventional analysis methods which does not sufficiently consider the effect of the wireless communication channels and extend the existing random graph theory by reflecting the wireless communication environments. As a main result, the effect of the network topology such as average degree of each communication node on the network capacity through extensive computer simulations.

키워드 : 무선 애드혹 네트워크, 단말간 직접 통신, 복잡계이론, 네트워크 토폴로지

Key word : Wireless ad hoc networks, direct communications, complex networks theory, network topology

접수일자 : 2013. 07. 09 심사완료일자 : 2013. 08. 23 게재확정일자 : 2013. 09. 04

* **Corresponding Author** Yeon-Sik Park (E-mail: parkys@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-9174)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.9.2020>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 모바일 단말의 폭발적인 증가로 인하여 값비싼 주파수 자원을 효율적으로 사용해야 하는 요구사항이 높아지고 있다 [1]. 뿐만 아니라, 최근 많은 관심을 받고 있는 machine-type communications (MTC)에서는 인간으로부터 발생하는 트래픽이 아닌, 무수히 많은 기계들로부터 발생하는 작은 데이터들을 수집하는 시나리오가 중요하게 대두되고 있다 [2~5]. 이러한 트래픽의 폭증과 사물통신의 활성화는 사물인터넷(Internet-of-Things, IoTs)의 개념의 발달과 함께 가속화 될 것으로 예상된다.

이러한 상황에서 기존의 셀룰라 무선통신 시스템이나 무선랜 네트워크처럼 기지국에 여러 개의 단말이 연결되어 통신하는 star topology의 기존 통신망 구조에서 벗어나 단말간의 직접통신 (direct communications)을 이용한 애드 혹 네트워크 구조가 재조명받고 있다 [6].

한편, 물리학을 중심으로 발전되어 왔던 복잡계 네트워크 이론을 단말의 수가 무수히 많은 거대 무선 애드 혹 네트워크의 분석에 활용하는 연구가 최근 연구자들에게 관심을 받고 있다. 유전자 네트워크나 World Wide Web (WWW) 등은 매우 복잡하게 얽힌 네트워크로 이해되는 가장 좋은 예라 할 수 있다. 복잡계 네트워크란 앞선 언급한 예를 포함하여 매우 많은 수의 노드와 노드들 사이의 링크로 연결된 매우 크고 복잡한 네트워크를 의미한다 [7][8]. 이러한 복잡계 네트워크는 대부분 scale-free라는 특성을 갖는데 이는 각 노드에 연결된 링크의 수가 멱함수 (power-law) 분포를 갖는 것을 의미한다. 복잡계 네트워크의 scale-free 특성은 선호적 연결성과 성장성을 가진 네트워크 성질에서 기인한다 [7].

만약 네트워크가 scale-free 특성을 가지면 연결성과 에너지 효율성 측면에서 매우 효과적이라는 것이 알려져 있다 [8]. 이는 무작위적으로 몇 개의 노드가 네트워크에서 사라져도 매우 큰 연결계수 (degree)를 갖는 노드 (허브)가 존재하므로 여전히 네트워크의 모든 노드들은 연결된 상태를 유지하게 되기 때문이다. 또한, 허브를 이용하여 패킷 전송에 필요한 다중 홉 수를 줄여 같은 수의 패킷을 전달하는데 필요한 에너지 소모도 줄일 수 있기 때문이다.

단말간 직접통신에 기반한 네트워크에서 항상 기술적 이슈는 기지국이나 무선 access point (AP)등의 고정

된 통신기기가 없고 네트워크를 구성하는 모든 단말이 이동성을 가지고 있어, 상황에 따라서 네트워크에서 패킷 전달에 대한 신뢰도가 높지 않다는 점이다. 만약, 무선 애드혹 네트워크에서도 이러한 scale-free 특성이 존재한다면 무선으로 연결된 노드들 사이의 연결성이 높은 확률도 보장될 수 있다. 따라서 최근 무선 애드혹 네트워크에서 복잡계 네트워크의 scale-free 특성을 갖게 하려는 연구가 활발히 진행되고 있다 [9][10].

그러나 무선 통신 네트워크의 경우 유선 네트워크와 달리 데이터 전송 속도는 전송노드의 전력에 따라 달라진다. 따라서 연결계수가 높은 노드가 존재하더라도 새로 네트워크에 접속한 노드가 그 노드와 먼 거리에 위치하게 되면 직접 통신이 불가능할 수도 있다. 또한 각 노드의 연결 계수 정보가 무선 애드 혹 네트워크에서 항상 공유되기 어려운 단점도 존재한다. 정리하면, 무선 통신 네트워크에서는 네트워크를 scale-free 특성을 갖게 만들기 어렵다. 최근 연결계수 정보를 교환하는 시그널링 오버헤드를 줄이면서 무선 통신 네트워크에서 노드간의 연결성을 scale-free하게 유지시키는 연구가 수행되었다 [11]. 그러나 이 연구에서 저자들은 무선 네트워크가 scale-free한 특성을 갖는 다는 것만 물리계층 입장에서 분석했을 뿐, 복잡계 네트워크 이론에서 기인한 추가적인 특성을 medium access control (MAC), 라우팅 계층에서 분석하지 않았다.

본 논문에서는 복잡계 네트워크 이론이 무선 애드혹 네트워크의 설계 및 분석에 어떻게 활용될 수 있는지 물리계층, MAC계층, 라우팅 계층까지 통합적으로 제시한다. 특히 본 논문에서 물리계층에서 무시할 수 없는 간섭의 영향도 고려하고 기존의 연구들이 복잡계 네트워크의 scale-free 특성에만 주목한 것에 반하여 연결 중심성(betweenness centrality)에 주목하였다. 또한, 복잡계 네트워크 이론에 기반한 무선 애드혹 네트워크의 토폴로지 형성이 네트워크 용량에 미치는 영향에 관하여 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N개의 무선 노드로 구성된 일반적인 무선 애드혹 네트워크 모델을 고려한다. 노드에 관해서 두 가지의 일반적인 가정을 하는데 각 노드는 자신의

전송 파워 레벨 $P_t(i)$ 로 이웃 노드들과 특정한 순간에 수신과 송신중 하나의 동작이 가능하다 (half-duplex 동작을 가정함). 노드의 통신 범위 내에서 노드 j 가 존재하고 노드 j 의 SNR이 정해진 임계치 SNR_t 보다 더 높을 때 노드 j 의 데이터 패킷을 성공적으로 디코드 할 수 있다고 가정한다. 비슷하게 노드 j 가 노드 i 의 통신 범위 내에 있을 때 노드 j 는 노드 i 로부터 상당한 양의 간섭을 받는다는 on/off 간섭 모델을 가정한다.

우리는 MAC 프로토콜의 일반적인 모델을 가정한다. 각 노드는 이상적인 MAC 프로토콜을 기반으로 경쟁을 수행한 후 그 경쟁에서 이겼을 때 이웃하는 노드 중 하나로 패킷을 전송하게 된다. 그리고 이 이상적인 MAC 프로토콜은 각 노드가 자신의 우선권을 기반으로 미디어에 접근이 가능할 수 있게 제대로 설계되었다고 가정한다. 즉 한 노드가 경쟁에서 이긴 수는 장기적인 관점에서 그 노드의 우선권에 비례한다. $\mathbf{P}_{out} = [p_{out}(1), p_{out}(2), \dots, p_{out}(N)]$ 는 N 개의 노드가 각각 경쟁에서 미디어에 접근하는 확률 벡터를 나타내고 $p_{out}(i)$ 를 노드 i 가 경쟁에서 이길 확률이라고 가정한다. 결국 가정한 MAC 프로토콜은 노드들이 확률 \mathbf{P}_{out} 로 미디어에 접근할 수 있게 만든다. 이 논문은 MAC 프로토콜을 효과적으로 설계하는 방법에 대해 알고자 하는 것이 아니기 때문에 우리는 경쟁 기간을 무시하고 충돌이 일어나지 않는다고 생각하기 위해 MAC 프로토콜의 세부적인 운용이 오류 없이 동작한다고 가정한다.

2.1. 그래프이론에 기반한 네트워크 모델링

토폴로지적으로 무선 네트워크를 살펴보기 위해 무선 네트워크를 $G = (\mathbf{N}, \mathbf{E})$ 그래프로 모델링한다. 여기서 \mathbf{N} 은 꼭지점들의 집합이고 \mathbf{E} 는 지시된 모서리들의 집합으로 가정한다. 그리고 $v_i \in \mathbf{N}$ 는 노드 i 에 해당하는 꼭지점(node), $e_{ij} \in \mathbf{E}$ 는 v_i 부터 v_j 까지 연결된 방향성 링크(directed edge or directed link)라고 정의하고 이것은 노드 i 와 노드 j 사이의 무선 링크에 해당한다. 그림 1은 앞서 설명한 내용의 모델의 예를 보여준다. 노드 2는 동시에 노드 1과 노드 3에 데이터를 전송할 수 없고, 일반적인 가정에 의해서 노드 2는 노드 1이 신호를 전송하는 동안에 이 신호의 간섭으로 인해 데이터를

전송 할 수 없다.

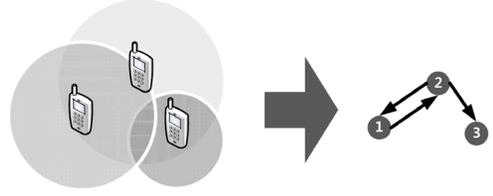


그림 1. 그래프 이론을 이용한 네트워크 모델링의 예
Fig. 1 An example of modeling a network to a graph

무선 링크의 품질을 고려하기 위해서 우리는 각 링크의 영향력을 무선 링크의 데이터 속도로서 정의한다. e_{ij} 의 영향력은 w_{ij} 로서 나타내고 정보이론에서 사용되는 샤논(Shannon)의 용량공식에 의해 w_{ij} 는 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_{ij} = BW \log_2(1 + P_r(i, j)), \quad (1)$$

여기서 BW 는 대역폭이고 $P_r(i, j)$ 는 노드 j 에서 노드 i 로부터 수신된 신호의 전력을 의미한다.

본 논문에서는 상기 그래프 모델을 기반으로 네트워크 이론에서 자주 사용되는 중개 중심성 (betweenness centrality) [7][8]을 새롭게 정의한다. 중개 중심성은 본래 꼭지점 또는 모서리가 네트워크 흐름의 관점에서 얼마나 중요한가를 나타내는 개념이다. 우리의 분석에서 이 개념을 이용하기 위해서 중개 중심성의 개념에 라우팅 개념을 포함하도록 새롭게 정의한다. B_i 와 B_{ij} 는 각각 v_i 와 e_{ij} 의 중개 중심성을 나타낸다. 다시 말하면, B_i 는 전체 네트워크의 트래픽중 i 번째 노드 (v_i)를 거처가는 트래픽의 양을 정수로 의미하고 B_{ij} 는 전체 트래픽중 노드 i 에서 j 로의 링크(e_{ij})를 거치는 트래픽의 양을 정수로 가리킨다. 주어진 라우팅 프로토콜에 의하여 아래와 같이 정의 할 수 있다.

$$B_i = \sum_{k_1 \in N} \sum_{k_2 \in N, k_2 \neq k_1} I(v_i \in \mathbf{N}_{k_1 k_2}^r) \quad (2)$$

$$B_{ij} = \sum_{k_1 \in N} \sum_{k_2 \in N, k_2 \neq k_1} I(w_{ij} \in \mathbf{E}_{k_1 k_2}^r) \quad (3)$$

여기서 $I(\cdot)$ 는 만약 \cdot 이 true 또는 그 외에는 0이 되면 1이라고 두고 $\mathbf{N}_{k_1 k_2}^r$ 와 $\mathbf{E}_{k_1 k_2}^r$ 는 꼭지점과 모서리들의 셋으로 각각 정의하고 그것들은 라우팅 프로토콜에 의해서 v_{k_1} 부터 v_{k_2} 까지의 라우팅 방향을 가진다.

III. Network Capacity 분석

무선 네트워크의 토폴로지를 최적화하기 위해서는 네트워크 토폴로지 (네트워크 연결성 또는 라우팅으로 해석도 가능함)가 무선 네트워크의 성능에 미치는 영향을 알아볼 필요가 있다. 본 논문에서는 토폴로지 관점에서의 파라미터들이 무선 네트워크의 용량에 미치는 영향을 새롭게 정의하고 계산한다. 또한 무선 애드 혹 네트워크 용량을 네트워크를 안정적으로 처리할 수 있는 유입 트래픽의 최대 양으로 정의한다. 네트워크 용량과 안정성은 분리하여 생각할 수 없는 개념인데 그 이유는 불안정한 상태의 네트워크에서 트래픽은 무한대의 지연시간을 가질 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 먼저 네트워크 토폴로지 관점에서 네트워크 안정성에 대하여 살펴본다.

3.1. 네트워크 토폴로지 관점에서 안정성 조건

일반적으로 네트워크가 안정된 상태라는 개념은 네트워크의 모든 노드가 안정된 상태에 있는 것을 의미한다. 즉, 네트워크의 모든 노드는 안정되게 발생하는 패킷들을 처리해야 한다. 노드가 안정된 상태인지 그렇지 않은지를 확인하기 위해 노드가 안정된 상태에 있을 때 노드의 패킷 대기열이 얼마나 존재할 것인가에 대한 확인이 필수적이다. 만약 어떤 노드가 유입된 많은 패킷을 받았는데 그 만큼의 패킷을 보낼 수 없다면 노드의 패킷 대기열은 곧바로 무한대로 증가할 것이다. 이러한 것을 네트워크가 불안정하다고 말한다.

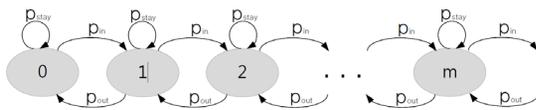


그림 2. 노드의 패킷 대기열에 대한 상태도
Fig. 2 State diagram for the packet queue of a node

패킷 대기열의 상태는 Discrete Time Markov Chain (DTMC) 모델로서 나타낼 수 있다. 그림 2는 패킷 대기열에 대한 상태 다이어그램을 보여주고 여기서 각 상태의 인덱스는 패킷 대기열에 대기중인 패킷의 개수를 나타낸다. 각 경쟁 상태에서, 각 노드는 세가지의 이벤트 중 하나를 경험한다.

첫째로 경쟁에서 이겨서 패킷을 보내 패킷 대기열 길이가 감소하는 경우이고, 둘째는 이웃한 노드가 경쟁에서 이겨서 패킷을 전송하고 그 패킷을 수신한 경우이고 이 때 패킷 대기열 길이는 증가한다. 마지막으로, 이웃한 노드가 경쟁에서 이겨 또 다른 노드에게 패킷을 보내는 경우인데, 이 때 우리가 관심있는 노드의 경우 패킷을 전송하거나 수신하지 않았으므로 대기열의 변화가 없다. 위의 세가지 발생 이벤트의 확률을 각각 p_{out} , p_{in} 와 p_{stay} 로 표기한다. 아래 수식에서는 표기의 용이함을 위하여 노드 i 번째에서의 계산을 가정한다 (subscript i 는 생략한다.). DTMC의 기본적인 원리 및 확률 특성을 기반으로 다음과 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$p_{out} + p_{in} + p_{stay} = 1 \tag{4}$$

$$p_{in} = \frac{\sum_{j \in \mathbf{E}_i^{in}} B_{ji}}{\sum_{k \in \mathbf{N}_i^{in}} B_k} (p_{in} + p_{stay})$$

$$= \frac{B_i}{\sum_{k \in \mathbf{N}_i^{in}} B_k} (p_{in} + p_{stay}). \tag{5}$$

(4)는 i 번째 노드에서 발생할 수 있는 모든 이벤트 확률의 합이 1이 된다는 사실에 기인하고 (5)는 p_{in} 는 노드로 들어오는 패킷의 양에 비례한다는 사실과 자신의 패킷을 전달하지 않아야 한다는 사실에 근거하여 유도된다. 들어오는 패킷의 양은 노드의 중심성과 비례하는데, 노드 i 입장에서 자신의 주변에 자신에게 패킷이 도착하여 자신의 패킷 대기열이 증가할 확률이란 자신 주변의 노드들이 처리하는 트래픽의 총량 중에 자신에게 데이터가 도착하는 트래픽의 양에 비례한다.

π_m 는 대기 이론에서 흔히 사용되는 DTMC의 상태

m에서의 steady-state 상태 확률로 정의하면 다음과 같은 균형 방정식을 유도 할 수 있다.

$$p_{stay}\pi_m + p_{out}\pi_{m+1} + p_{in}\pi_{m-1} = \pi_m \quad (6)$$

$$p_{in}\pi_0 = p_{out}\pi_1 \quad (7)$$

방정식을 통해서 π_m 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\pi_m = \left(\frac{p_{in}}{p_{out}}\right)^m \left(1 - \frac{p_{in}}{p_{out}}\right), \quad p_{in} < p_{out}. \quad (8)$$

π_m 의 세부적인 유도는 전형적인 대기이론의 DTMC steady-state 확률계산에 기인한다 [12]. 위의 steady-state 상태 확률은 오직 p_{out} 이 p_{in} 보다 클 때, 즉 네트워크 안정성이 필수적인 조건인 경우에 존재한다. 이 조건이 충족되지 않으면 패킷 대기열은 무한정 증가하고 노드는 불안정해 질 것이다. 이 조건을 기반으로 하고 (5)를 사용하면 우리는 다음과 같은 부등식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{B_i}{B_i^{cum}}(1 - p_{out}) &< p_{in} \\ &= \frac{B_i}{\sum_{k \in \mathbf{N}_i^{in}} B_k}(1 - p_{out}) < p_{out} \end{aligned} \quad (9)$$

$$B_i^{cum} = \sum_{k \in \mathbf{N}_i^{in} \cup \{i\}} B_k \quad (10)$$

이 결과는 노드의 안정성이 노드 주변의 토폴로지와 라우팅 프로토콜에 의해 결정됨을 나타낸다. 필수 조건은 p_{out} 이 p_{in} 을 B_i 와 B_i^{cum} 로 표현한 값보다 더 커야 한다는 것이고, 이것은 노드 주변의 토폴로지에 영향을 받는다는 것을 의미한다. 노드 i 는 이웃한 노드들과 많은 링크를 가지거나 패킷들은 라우팅에 의해 노드 i 로 모일 것이기 때문에 B_i 가 크다고 하면 p_{out} 또한 크고 노드 i 의 대기열이 안정한 상태가 되기 위해 노드 i 는 더 자주 접근이 이루어져야 한다. 이것 결과 또한 네트

워크 안정성을 보장하는 MAC 프로토콜의 설계에 대한 지침을 제공한다. 그래서 MAC 프로토콜은 모든 노드가 이런 필수적인 조건을 만족하고 안정된 상태가 되기 위해 적절하게 p_{out} 을 설정하여 조심스러운 설계가 이루어져야 한다.

3.2. 토폴로지 관점에서 Network Capacity 유도

유입되는 트래픽의 모델을 단순화하기 위해 우리는 각 노드 트래픽 유입율이 λ 이고 사이즈 L 인 패킷을 생성하고 선택된 노드는 임의로 전송한다고 가정한다. 네트워크 용량 정의를 위해 critical rate의 개념을 사용하는데 이것은 각 노드가 유입된 패킷을 처리할 수 있는 최대 트래픽 rate을 말한다. $\lambda_{crit}(i)$ 는 노드 i 의 critical rate으로 정의하고 이것은 노드 i 는 유입되는 패킷들을 처리할 수 있다는 것을 말한다.

$$\lambda_{crit}(i) = \max_{\lambda \in [0, \infty)} \mu_{in}(i) \leq \mu_{out}(i),$$

여기서 $\mu_{in}(i)$ 는 유입된 traffic의 노드 i 의 data rate 이고 $\mu_{out}(i)$ 는 노드 i 의 노드 i 가 전송할 수 있는 최대 data rate이다. 이러한 정의를 기반으로 λ_{crit} , 네트워크의 critical rate를 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda_{crit} = \min_{i \in \mathbf{N}} \lambda_{crit}(i). \quad (11)$$

이는 네트워크에 유입되는 트래픽 중 최소값을 의미하는데, 이 값이 네트워크가 안정적으로 동작할 수 있는 네트워크 용량이 된다. 우리는 $p_{out}(i)$ 와 B_i 에 관해서 λ_{crit} 를 측정하는데 목표를 둔다. 노드 i 에서 incoming data rate은 중개 중심성에 비례하기 때문에 $\mu_{in}(i)$ 는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\mu_{in}(i) = \frac{N\lambda LB_i}{N(N-1)} \quad (12)$$

게다가 $\mu_{out}(i)$ 는 패킷 사이즈 대비 패킷을 전송하는데 필요한 평균 지속 시간의 비율과 동일하다. 그것을 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_{out}(i) = \frac{L}{E[t_w + t_a]}, \quad (13)$$

여기서 t_w 와 t_a 는 경쟁과 패킷 전송에 대한 지속 시간이다. $E[t_w]$ 를 계산하기 위해서 다음 전송에 대한 노드가 기다리는 경쟁 단계의 개수를 C 로서 나타내고 p 번째 경쟁과 $p+1$ 번째 경쟁 사이의 지속 시간을 $t_{w,p}$ 로서 나타낸다. 베이지 정리를 이용하면 $E[t_w]$ 를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$E[t_w] = \sum_{n=0}^{\infty} E[t_w|C=n] Pr(C=n) \quad (14)$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} E\left[\sum_{p=0}^n t_{w,p} | C=n\right] Pr(C=n). \quad (15)$$

각 경쟁 이벤트는 독립이고 동일하기 때문에 $E\left[\sum_{p=0}^n t_{w,p} | C=n\right] = \sum_{p=0}^n E[t_{w,p}] = nE[t_{w,0}]$ 이고

$$E[t_w] = E[t_{w,0}] \sum_{n=0}^{\infty} n(1-p_{out}(i))^n p_{out}(i). \quad (16)$$

$E[t_{w,0}]$ 는 노드 i 근처에서 두 번의 연속적인 경쟁 사이의 지속 시간의 평균이다. 노드 i 가 경쟁에서 이기지 못하고 노드 k 가 경쟁에서 이겼을 때의 확률을 $p_o(k|i^c)$, $E[t_{w,0}]$ 로서 나타내고 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$E[t_{w,0}] = \sum_{k \in \mathbf{N}_i^n} \sum_{j \in \mathbf{E}_k^{out}} p_o(k|i^c) \frac{B_{kj}}{B_k} \frac{L}{w_{kj}}. \quad (17)$$

계다가 (17)에서 무한 급수는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} n(1-p_{out}(i))^n p_{out}(i) = \frac{1-p_{out}(i)}{p_{out}(i)}. \quad (18)$$

$E[t_{w,0}]$ 의 경우와 유사하게 $E[t_a]$ 는 다음과 같이 유도 될 수 있다.

$$E[t_a] = \sum_{j \in \mathbf{E}_k^{out}} \frac{B_{ij}}{B_i} \frac{L}{w_{ij}}. \quad (19)$$

(14)-(19)을 사용하여 다음을 계산할 수 있다.

$$\mu_{out}(i) = \frac{L}{E[t_w + t_a]} \quad (20)$$

$$= \left(\frac{1-p_{out}(i)}{p_{out}(i)} \sum_{k \in \mathbf{N}_i^n} \sum_{j \in \mathbf{E}_k^{out}} p_o(k|i^c) \frac{B_{kj}}{B_k} \frac{1}{w_{kj}} + \sum_{j \in \mathbf{E}_i^{out}} \frac{B_{ij}}{B_i} \frac{1}{w_{ij}} \right)^{-1} \quad (21)$$

우리는 다음 경쟁을 기다리는 노드 i 시간의 랜덤 변수를 T_i 로서 나타내고, 그런후 첫 번째 합 of 부분은 노드 i 가 경쟁에서 진 순간 T_i 의 평균으로 보여질 수 있다. 위의 값들을 $E[T_i|i]$ 와 $E[T_i|i^c]$ 로서 나타내고 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\mu_{out}(i) = \frac{p_{out}(i)}{(1-p_{out}(i))Pr(E[T_i|i^c]) + p_{out}(i)Pr(E[T_i|i])} \quad (22)$$

$$= \frac{p_{out}(i)}{E[T_i]}. \quad (23)$$

$p_o(k|i^c)$ 를 포함하여 복소수 부분은 $E[T_i]$ 로 대체한다. 이러한 유도는 우리의 분석 결과를 완화시켜주는 데 $E[T_i]$ 가 $p_o(k|i^c)$ 에 비해 다소 계산하기 쉽기 때문이다. $\mu_{in}(i)$ 는 λ 에 비례하고 $\mu_{out}(i)$ 는 λ 와 독립이기 때문에 $\lambda = \lambda_{crit}(i)$ 일 때 $\mu_{out}(i) = \mu_{in}(i)$ 이다. 이와 같이 $\lambda_{crit}(i)$ 는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\lambda_{crit}(i)L = (N-1) \left(\frac{p_{out}(i)}{B_i E[t_i]} \right) \quad (24)$$

$$\lambda_{crit}L = (N-1) \min_{i \in \mathbf{N}} \left(\frac{p_{out}(i)}{B_i E[t_i]} \right). \quad (25)$$

$E[T_i|i]$ 와 $E[T_i|i^c]$ 를 사용함으로써 (21)는 네트워크 용량을 계산하기 유용한 형태인 (25)로 단순화 될 수 있다. 이것은 네트워크 용량이 $\min_{i \in N} \frac{P_{out}(i)}{B_i E_i}$ 에 결정되고 $\frac{P_{out}(i)}{B_i E_i}$ 를 계산함으로써 측정될 수 있음을 보여준다. 여기서 $\frac{P_{out}(i)}{B_i E_i}$ 은 노드 i 의 topological capacity로서 나타낼 수 있다. 결국, topological capacity가 아주 작은 노드는 패킷 전송 때문에 병목현상을 겪게된다. 게다가 (25)는 네트워크 토폴로지를 조정하는 MAC protocol을 설계하는 지침을 제공한다. 그 매트릭스 때문에 MAC protocol은 각 노드의 측정을 기반으로 쉽게 측정될 수 있다.

IV. 성능 분석

본 논문에서는 제안된 복잡계 네트워크 이론에 기반한 무선 애드혹 네트워크의 연결계수 형성과정에 대한 성능 분석을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서는 각 노드가 무작위적으로 분포하는 무선 애드혹 네트워크 환경을 고려하였다. 트래픽의 흐름도 무작위적으로 형성시켰고 무선 채널은 Rayleigh fading 환경을 고려하였고 path-loss는 도심에서 흔히 사용되는 거리당 path-loss exponent 3을 사용하였으며 데이터 전송폭은 10MHz를 가정하였다. 자신의 주변 단말과의 정보만을 공유하면서 연결성을 생성하는 제안된 방식이 기존의 동일한 확률에 기반한 연결성을 생성하는 방식과 네트워크내의 모든 정보를 공유하는 이상적인 방식과 그 성능 면에서 어떠한 차이가 있는지 그림 3이 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 방식의 성능은 네트워크의 모든 정보를 이용하는 이상적인 기법과 매우 유사한 성능을 보인다. 또한 기존의 동일 확률 기반의 방식은 평균 연결계수가 증가해도 그 성능이 변하지 않는 것을 관찰할 수 있다.

제안된 기법과 이상적인 기법은 모두 단말단 평균 연결성이 증가되면서 그 성능이 급격히 증가한다. 예를 들어, 네트워크의 평균 연결성이 9가 되면 제안된 방식은 54Mbps를 달성하나 기존의 동일한 확률에 따라 연결을 생성하는 방식은 17Mbps를 달성하는 것을 확인할 수 있다. 또한 제안된 방식은 평균 연결성이 증가하면

서 네트워크 용량이 계속 증가하는 반면 기존의 동일 확률 기반의 연결생성 방식의 경우 15Mbps 남짓한 성능이 계속 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 방식은 네트워크 연결성이 증가할 때 그 효과를 충분히 성능에 반영시키지 못한다는 것을 의미한다.

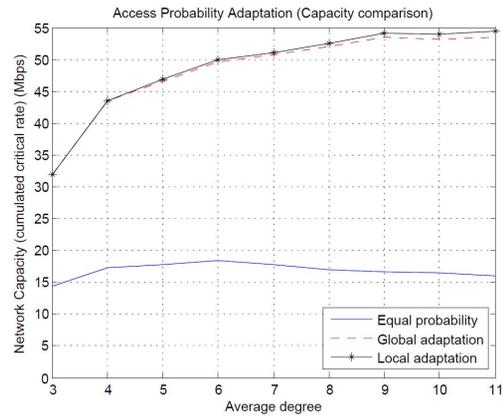


그림 3. 평균 Degree에 따른 네트워크 용량
Fig. 3 Network Capacity vs. Average Degree

V. 결론

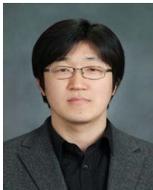
본 논문에서는 최근 이슈가 되고 있는 단말간 직접통신기반의 네트워크 (무선 애드 혹 네트워크)에서 사용 가능한 복잡계 네트워크 이론 기반의 네트워크 성능 분석방법과 설계 기법에 관하여 제안하였다. 제안된 분석론은 향후 거대 유무선 네트워크에도 비슷한 과정을 통해 확장될 수 있으며, 제안된 복잡계 네트워크 이론에 기반한 거대 무선 애드혹 네트워크 설계 기법이 기존의 방식보다 훨씬 더 좋은 성능을 나타내며 심지어 이상적인 기법과 거의 동일한 성능을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 경상대학교 학술진흥지원 사업 연구회지원 연구비에 의하여 수행하였음.

REFERENCES

- [1] CISCO, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012 - 2017, White paper, Feb. 2013.
- [2] IEEE 802.16-10/0004r3, "IEEE 802.16p machine to machine (M2M) system requirements document (SRD)", Std. Sep. 2011.
- [3] M. Chui, M. Loffler, and R. Roberts, "The internet of things," McKinsey Quarterly, Mar. 2011.
- [4] 3GPP TR 22.868 V8.0.0, Tech. Spec. Group Services and System Aspects, Study on Facilitating Machine to Machine Communication in 3GPP Systems, (Release 8), 3GPP Std., Dec. 2008.
- [5] IEEE C80216-10-002r7 "Machine to Machine (M2M) Communication Study Report", IEEE 802.16 Contribution, May. 2010.
- [6] P. Gupta and P. R. Kumar, "Capacity of wireless networks," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 46, No. 2, pp. 388-404, March 2000.
- [7] A. L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," Science, Vol. 286, pp. 509 - 512, 1999.
- [8] R. Albert, H. Jeong, and A. L. Barabasi, "Error and attack tolerance of complex networks," Nature, Vol. 406, pp. 378 - 382, 2000.
- [9] F. Saffre, H. Jovanovic, C. Hoile, and S. Nicolas, "Scale-free topology for pervasive network," BT Technology J., Vol. 22, pp. 200-208, Jul. 2004.
- [10] L. Wang, H. Jin, J. Dang, and Y. Jin, "A fault tolerant topology control algorithm for large-scale sensor networks," in Proc. International Conference on Parallel and Distributed Computing, pp. 407-412, Nov. 2007.
- [11] Y. -B. Kim, B. Hong, W. Choi, "Scale-free wireless networks with limited degree information," IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 1, No. 5, pp. 428-431, Oct. 2012.
- [12] L. Kleinrock, Queueing systems - Volume 1: Theory, Wiley, 1975.



정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
 2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
 2008년 3월 ~ 2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장
 2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 연구교수
 2010년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
 ※관심분야: 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신, Cognitive Radios, Compressed Sensing, 차세대 이동통신 시스템



강기홍(Kee-Hong Kang)

2006년 8월 독일 뮌스터대학교(WWU Muenster) 법학박사
 2007년 3월 ~ 2010년 2월 한국지방행정연구원 수석연구원
 2010년 3월 ~ 2013년 8월 경상대학교 법과대학 조교수
 2013년 9월 ~ 현재 서울과학기술대학교 인문사회대학 조교수
 ※관심분야: 행정법, EU공법, 지방자치법



김정필(Kim Jeong Pil)

1990년 2월 부산대학교 중어중문학과 학사
 1995년 1월 대만 국립정치대학 중국문학연구소 석사
 2006년 8월 경북대학교 대학원 중어중문학과 박사
 2005년 9월 ~ 2006년 8월 부산대학교 중어중문학과 조교
 2010년 3월 ~ 현재 경상대학교 중어중문학과 조교수
 ※관심분야: 어법론, 의미론, 언어문화론, 매체언어, 광고언어



박연식(Yeon-Sik Park)

1971년 광운대학교 무선통신공학과 공학사
1980년 건국대학교 행정대학원 행정학 석사
1995년 경상대학교 전자계산학과 공학석사
1999년 한국해양대학교 전자통신공학과 박사
현재 경상대학교 정보통신공학과 교수

※관심분야 : 수중화상통신, 컴퓨터네트워크, USN