ISSN 1598-0170 (Print)
ISSN 2287-1136 (Online)
http://www.jksii.or.kr

복잡계 네트워크 기반 무선 네트워크를 위한 브로드캐스트 스케줄링 기법☆

Broadcast Scheduling for Wireless Networks Based on Theory of Complex Networks

박 종 홍[1] 서 순 호[1] 정 종 문[1*]
Jong-Hong Park Sunho Seo Jong-Moon Chung

요 약

본 논문에서는 복잡계 네트워크 이론에 기반한 무선 네트워크 토폴로지를 구성하고, 실제 환경의 토폴로지 구성을 반영한 척도없는 네트워크의 노드 링크 분포 확률을 분석하여 실제 무선 네트워크를 위한 브로드캐스트 전송 스케줄링 알고리즘 기법을 제안한다. 본 논문에서는 기존의 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘 기법들이 반영하지 못한 복잡계 네트워크의 특성을 분석하고 그 특성에 맞는 알고리즘 기법과 분석 기법에 대하여 제안한다. 실험 결과를 통해 제안하는 방식의 알고리즘법이 네트워크의 지연시간 감소와 전송효율에 있어서의 우수함을 밝히고, 복잡계 네트워크 기반 무선 네트워크의 전송효율과 전체지연시간에 대한 최적화 방식의 기법을 제안한다.

☞ 주제어 : 복잡계 네트워크, 브로드캐스트 스케줄링 문제, 무선 네트워크, 척도없는 네트워크

ABSTRACT

This paper proposes a novel broadcast scheduling algorithm for wireless large-scale networks based on theory of complex networks. In the proposed algorithm, the network topology is formed based on a scale-free network and the probability of link distribution is analyzed. In this paper, the characteristics of complex systems are analyzed (which are not concerned by the existing broadcast scheduling algorithm techniques) and the optimization of network transmission efficiency and network time delay are provided.

☞ keyword : Complex network theory, Broadcast scheduling problem, wireless large-scale network, scale-free network

1. 서 론

물리학을 중심으로 발전되어 왔던 복잡계 네트워크 이론이 최근에는 노드의 수가 무수히 많은 무선 네트워크 분석에 활용하는 연구에 적용되면서 큰 관심을 받고 있다.[1] 통신 네트워크에서의 복잡계 네트워크란 매우 많은 수의 노드와 그 노드들 간 링크로 연결된 매우 크고 복잡한 네트워크를 의미한다. 복잡계 네트워크의 가장 중요한 특성 중 하나는 척도없는 네트워크(scale-free network)의 성질을 갖는다는 것이다.[2] 척도없는 네트워크는 기존의 사회연결망을 설명하는 '연결정도 분포그래프'가 실제 사회현상을 반영하지 못한다는 것에서 출발하였다. 기존에는 '연결정도 분포그래프'의 모습이 링크의 수가 평균값 혹은 중간값을 갖는 노드의 수가 가장 많은 분포를 형성한다고 가정하였다. 하지만 현실의 사회현상을 반영한 실제 네트워크에서는 BA (Barabasi and Albert) 모델[3] 기반의 '연결정보 분포그래프'를 따른다는 것이 척도없는 네트워크를 설명하는 가장 중요한 차이점이다. BA 모델에서는 실제 네트워크의 노드의 수와 링크의 수의 관계를 멱함수 법칙(power law)의 특성으로 설명한다. 복잡계 네트워크 기반에서의 노드의 구성은 일부 다수의 링크를 가진 노드들과 대다수의 소수의 링크를 가진 노드들로 구성된다는 것이다. 다른 무수히 많은 노드들과 연결되어 있는 노드를 허브(hub)라고 부르며, 무선 네트워크에서의 이러한 허브의 역할은 매우 중요하다. 허브는

[1] School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea.
[*] Corresponding author (jmc@yonsei.ac.kr)
[Received 29 Apirl 2016, Reviewed 9 May 2016, Accepted 8 June 2016]
☆ 본 연구는 국민안전처 사회재난안전기술개발사업의 지원으로 수행한 '증강현실기반 재난대응 훈련 시뮬레이터 개발' [MPSS01-007-00000000-2015]과 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 방송통신산업기술개발사업 [B0101-16-1276, 다양한 IoT 서비스를 위한 액세스 네트워크 제어 기술] 과제의 일환으로 수행하였음.

http://dx.doi.org/10.7472/jksii.2016.17.5.01

다른 허브와의 연결을 통해 전체 네트워크 동작이 이루어지도록 하는 역할 뿐만 아니라 자신과 연결된 다수의 노드들의 패킷을 다른 노드에게 전송해주는 중간 릴레이 역할도 수행하게 된다. 이러한 허브의 역할은 자신에게 연결된 링크의 수가 많을수록 그 중요성이 더욱 강조된다.

무선 네트워크를 구성하는 노드들은 다른 노드들과 채널을 공유하면서 브로드캐스팅 방식을 통해 전송하게 된다. 하나의 노드가 패킷을 전송하게 되면 모든 이웃 노드들은 그 패킷을 받게 되고 만약 그 패킷이 자신을 목적지 노드로 설정한 패킷이라면 디코딩하게 된다. 그렇지 않다면, 패킷을 버리거나 혹은 자신의 전송 차례 때 자신의 모든 이웃 노드들에게 다시 브로드캐스팅 방식을 통해 릴레이 전송하게 된다. 현재 존재하는 브로드캐스팅 전송은 시분할다중접속(Time Division Multiple Access, TDMA) 방식을 사용하여 스케줄링 알고리즘 기반으로 제안되었다.[4-9] 이러한 시분할다중접속 방식은 이웃 노드 간 동시 전송 시 발생하는 충돌 사건을 방지하여 네트워크 전체의 성능을 향상시키기 때문에 대다수의 브로드캐스팅 전송 방식에서 채택하여 사용하고 있다. 다수의 노드로 구성된 무선 네트워크에서의 브로드캐스팅 스케줄링 알고리즘은 그동안 많은 연구에서 진행되어 왔다. 대표적인 무선 네트워크에서의 브로드캐스팅 스케줄링 알고리즘에는 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 사용한 MFA (Mean Field Annealing)[4] 방식, SVC (Sequential Vertex Coloring)[5] 방식, 퍼지이론을 사용한 FHNN (Fuzzy Hopfield Neural Network)[6] 방식 등이 있다. 하지만 기존의 브로드캐스팅 스케줄링 알고리즘들은 최소한의 프레임 길이 안에서 최대한의 노드의 전송 기회를 주는 것을 목표로 하고 있기 때문에, 허브와 같은 링크의 수가 많은 노드들은 같은 타임 슬롯에서의 동시 전송 시 충돌사건을 방지하기 위해 주어진 프레임 내에서 전송 기회가 다른 노드들에 비해 현저히 적어지게 된다. 이를 복잡계 네트워크에 직접 적용하게 되면 앞서 언급한 중요한 역할을 하는 허브에게는 전송 기회가 적어 노드의 중요성이 고려된 전송효율성 측면에서는 좋지 않은 결과를 초래하게 된다.

따라서 본 논문에서는, 실제 환경의 척도없는 네트워크의 특성을 고려한 복잡계 네트워크 기반의 무선 네트워크의 토폴로지를 구성하고 네트워크를 구성하는 노드들의 위치적 중요성을 고려한 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

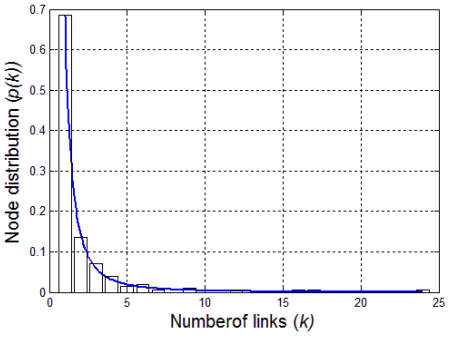
2. 시스템 모델

2.1 복잡계 네트워크 기반 토폴로지 구성

본 논문에서는 N개의 무선 노드로 구성된 복잡계 네트워크 기반의 BA 모델을 통해 무선 네트워크의 토폴로지를 고려한다. BA 모델은 다음과 같은 조건들에 의해 네트워크의 노드를 구성한다. 최소 1개 이상의 링크를 갖고 있는 m_0개의 노드가 존재하는 초기 네트워크를 구성한다. 이후 새로운 노드가 1개씩 추가되면서 네트워크에 이미 존재하고 있는 다른 노드와 $m(\leq m_0)$개의 링크를 생성한다. 새롭게 추가되는 노드는 아래 수식으로 표현되는 확률값 Π에 의한 선호도(preference)를 가지고 링크를 연결할 노드를 선택한다. 확률값 Π는 해당 노드가 이미 가지고 있는 링크 개수에 비례한다. 즉, 새로운 노드는 더 많은 링크를 가지고 있는 노드와 연결될 가능성이 높다고 할 수 있다.

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \tag{1}$$

그림 1은 전체 200개의 노드(N=200)로 구성된 복잡계 네트워크의 토폴로지를 BA 모델 기반으로 구성하여 링크의 수(k)에 따른 노드분포확률($p(k)$)로 표현한 것이다. 그림 1과 같이 BA 모델의 확률 분포는 멱함수의 형태를 가지며, $p(k) = ck^{-\alpha}$ $(-2 \leq \alpha \leq -3)$의 수식으로 표현된다. 그림 1에서 실선으로 표현된 노드분포확률 함수는 $c = 0.68$, $\alpha = 2.2$의 값을 갖는다.



(그림 1) 링크의 수에 따른 노드의 분포 그래프
(Figure 1) Node distribution graph of the number of links

2.2 그래프이론 기반 네트워크 모델링

위에서 구성한 복잡계 네트워크 기반 무선 네트워크 토폴로지를 그래프이론에 기반하여 $G=(V,E)$ 그래프로 모델링한다. V는 노드들의 집합이고, E는 노드간 연결 링크의 집합이다.[10] 만약 노드 i와 노드 j가 1홉 거리의 이웃이라면 $(i,j)\in E$로 표현이 가능하다. N개의 노드로 구성된 네트워크의 토폴로지를 표현하기 위해 $N\times N$ 크기의 0과 1로 구성된 '연결성 행렬'(connectivity matrix), C로 표현한다. 연결성 행렬은 $c_{i,j}$ $(i,j=1,\ 2,\ \cdots,\ N)$ 원소로 구성되며 원소 $c_{i,j}$는 다음과 같이 정의된다.

$$c_{i,j}=\begin{cases}1,\ if\ \ (i,j)\in E\\ 0,\ otherwise\end{cases} \tag{2}$$

만약 i와 j가 같다면 $c_{i,j}=1$이며, 모든 i와 j에 대해서 $c_{i,j}=c_{j,i}$이다. 다음으로 '호환성 행렬'(compatibility matrix), F를 정의한다. 호환성 행렬은 두 개의 노드가 2홉 이내의 거리의 이웃인지를 표현해주는 행렬로써, 이는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘의 가장 중요한 제약사항인 2홉 이내 노드들의 동시 전송 방지를 보장하기 위한 행렬이다. 호환성 행렬은 $f_{i,j}$ $(i,j=1,\ 2,\ \cdots,\ N)$ 원소로 구성되며 원소 $f_{i,j}$는 다음과 같이 정의된다.

$$f_{i,j}=\begin{cases}1,\ \begin{array}{l}if\ \ (i,k)\in E\ \text{and}\,(k,j)\in E\\ \text{for}\,i\neq j\neq k\end{array}\\ 0,\ otherwise\end{cases} \tag{3}$$

2.3 브로드캐스트 스케줄링 문제 (Broadcast Schedulng Problem, BSP)

브로드캐스트 스케줄링 문제는 M개의 타임 슬롯으로 구성된 각 프레임 안에 N개의 노드들이 적어도 한 번 이상의 전송 기회를 갖도록 타임 슬롯을 배정하는 것이다. $M\times N$ 크기의 '전송스케줄 행렬'(transmission schedule matrix)을 X라고 할 때, 행렬 X의 원소 $x_{m,i}$는 다음과 같이 정의된다.

$$x_{m,i}=\begin{cases}1,\ if\ \text{노드}\ i\text{가}\ m\text{번째 슬롯에서 전송}\\ 0,\ otherwise\end{cases} \tag{4}$$

브로드캐스트 스케줄링 문제는 일반적으로 다음과 같은 제약식을 두고 있다.[5]

$$\sum_{m=1}^{M} x_{m,i} \geq 1 \tag{5}$$

$$c_{i,j}+x_{m,i}+c_{m,j} \leq 2 \tag{6}$$

$$c_{i,k}x_{m,i}+c_{k,j}x_{m,j} \leq 1 \tag{7}$$

제약식 (5)는 네트워크를 구성하는 모든 N개의 노드는 하나의 프레임 안에서 적어도 최소 1번 이상의 전송 기회를 가져야 한다는 내용이다. 제약식 (6)은 1홉 거리의 이웃 노드는 충돌을 피하기 위해 서로 다른 타임 슬롯에 배정되어야 한다는 것이다. 제약식 (7)은 숨겨진 단말 문제(hidden node problem)로 인한 충돌을 피하기 위하여 2홉 거리의 이웃 노드도 서로 다른 타임 슬롯에 배정되어야 한다는 내용이다.

기존에 존재하는 브로드캐스트 스케줄링 문제를 해결하기 위한 알고리즘은 위와 같은 제약사항들을 기반으로 최소한의 프레임의 길이 내에 최대한의 노드 전송 기회 부여를 목표로 하고 있다. 이와 같은 대표적인 브로드캐스트 스케줄링 기법으로는 MFA (Mean Field Annealing) 알고리즘[4]과 SVC (Sequential Vertex Coloring) 알고리즘[5], 유전 알고리즘의 방식으로 접근한 GA (Genetic Algorithm) [6]이 있다. 또한 HNN-GA (Hopfield Neural Network and GA) 알고리즘[7]과 NCNN (Noisy Chaotic Neural Network) 알고리즘[8], FHNN (Fuzzy Hopfield Neural Network) 알고리즘[9]과 같이 하이브리드 기법을 사용한 알고리즘들도 존재한다. MFA 알고리즘은 전체 프레임 길이 M을 최소화하기 위해 처음에 최소 프레임 길이를 정한 상태에서 충돌이 나는 경우를 배제하면서 노드에게 전송 기회를 부여하고 만약 최소 한 번의 전송 기회를 얻지 못하는 노드가 있으면 프레임 길이를 증가시켜 가며 전송 기회를 부여하는 경험적(heuristic)인 방식을 제안하였다. SVC 알고리즘은 MFA 알고리즘의 효율적이지 못한 경험적 알고리즘의 한계점을 밝히고 그 해결방안으로 1홉과 2홉 이웃 노드의 수가 많은 노드부터 우선적으로 차례대로 배정하는 정형화된 알고리즘을 제안하였다. 하지만 이 두 가지 알고리즘 모두 프레임의 길이 최소화라는 목표 기반으로 제안되었기 때문에, 링크

의 수가 많아 토폴로지적으로 중요한 노드(허브)에게는 많은 기회를 주지 못하고 오히려 링크의 수가 적은 노드들에게 전송 기회를 많이 부여한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 가진 알고리즘들은 다른 노드들로 받은 패킷을 자주 릴레이 해주는 역할의 허브가 중심인 복잡계 네트워크 기반의 무선 네트워크에는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 브로드캐스트 스케줄링 문제를 해결하기 위한 알고리즘 중 기본적인 접근 방식을 통해 가장 많이 사용되고 있는 MFA 알고리즘과 SVC 알고리즘과의 비교 대상으로 하여 복잡계 네트워크 기반 무선 네트워크에서 링크의 수가 많은 허브를 중심으로, 링크의 수가 많은 노드일수록 더 많은 전송기회를 갖도록 하는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

3. 복잡계 네트워크 기반 무선 네트워크를 위한 브로드캐스트 스케줄링 기법

앞서 언급한 바와 같이 복잡계 네트워크는 척도없는 네트워크의 특징을 가지며, 척도없는 네트워크는 노드의 수의 분포가 멱함수 법칙을 따른다는 특성을 가진다. 본 논문에서는 멱함수 법칙을 따르는 복잡계 네트워크를 구성하는 노드들의 노드 중요도를 정의하고 노드 중요도에 따른 전송 효율을 반영한 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

노드 중요도는 하나의 프레임 안에서 각 노드가 각자 전송 기회를 얻어야할 최소의 전송 기회를 의미한다. 링크의 수가 많은 허브와 같은 노드는 네트워크 전체 관점에서 노드 중요도가 매우 높기 때문에 전송 기회를 많이 얻어야하고, 링크가 적은 노드들은 상대적으로 노드 중요도가 낮기 때문에 다른 노드에 비해 낮은 전송 기회를 가져도 될 것이다. 전체 N개의 노드로 구성된 복잡계 네트워크 기반 무선 네트워크에서 노드 i의 노드 중요도를 링크의 수(k_i)로 정의하면 전체 네트워크의 노드 중요도(K)는 다음과 같다.

$$K = \sum_{i=1}^{N} k_i \tag{8}$$

또한 서로 다른 노드 중요도를 가지는 노드들의 채널 사용 효율성을 분석하기 위해 '전송효율(transmission efficiency)'을 정의하는데 그 표현은 다음과 같다.

$$E_T = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} x_{m,i} \frac{k_i}{K} \tag{9}$$

따라서 제안하는 알고리즘의 목표는 브로드캐스트 스케줄링의 제약식과 각 노드의 노드 중요도를 만족시키면서 전송효율 E_T를 최대화하는 것을 목표로 한다.

$$\text{Maximize } E_T \tag{10}$$

$$\text{subject to } \sum_{m=1}^{M} x_{m,i} \geq k_i \tag{11}$$

$$c_{i,j} + x_{m,i} + c_{m,j} \leq 2 \tag{12}$$

$$c_{i,k} x_{m,i} + c_{k,j} x_{m,j} \leq 1 \tag{13}$$

제안하는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘은 각 노드의 노드 중요도만큼의 전송 기회를 부여하므로 각 노드는 한 프레임 안에서 최소 자신의 링크 수(k_i)만큼의 '필요전송기회'를 부여받아야 한다. 이를 표현하기 위해 알고리즘의 진행되는 단계 t에서 각 노드가 한 번의 전송 기회를 얻을 때마다 필요전송기회(r_i^t)를 줄여나가게 된다. 모든 노드가 필요전송기회를 다 부여받게 되면 알고리즘은 종료되고 최종 브로드캐스트 스케줄링 테이블이 얻어지게 된다. 각 단계에서의 남아있는 필요전송기회를 표현하기 위해 집합 $S_k^t = \{r_1^t,\ r_2^t,\ \ldots,\ r_N^t\}$ 를 정의한다. 초기 $t=0$ 일 때는 $S_k^0 = \{k_1,\ k_2,\ \ldots,\ k_N\}$의 값을 갖게 되고 각 단계가 끝나고 최종 테이블이 완성되는 $t=M$에서는 $S_k^M = \{0,\ 0,\ \ldots,\ 0\}$ 의 값을 갖게 된다. 또한 노드 i가 t번째 타임 슬롯에 배정될 수 있는 후보군이라는 것을 수치화하기 위해 각 단계의 시작 단계에서 모든 노드 i의 $a_{t,i}$ 값을 1로 놓는다. 알고리즘의 t번째 단계에서 $a_{t,i}=1$을 만족하면서 S_k^t의 집합에서의 가장 큰 값, 즉, 남아있는 '필요전송기회'의 값이 큰 노드를 선택하여 우선 배정을 하게 된다. t번째 단계 타임 슬롯이 배정된 노드 i는 m번째 타임 슬롯에 배정되었다는 뜻으로 $a_{t,i}$값을 0로 바꾼다. 또한 제약식 (6)과 (7)에 의해서 1홉과 2홉 사이의 노드는 같은 타임 슬롯에서는 동시 전송이 불가능하게 되어 배정 후보에서 빠지게 되므로 $a_{t,i}$값을 0로 놓게 된다. $a_{t,i}$값이 0이 아닌 노드 중 현재 타임 슬롯에서 동시 전송이 가능한 노드가 존

재한다면 타임 슬롯을 배정하는 과정을 하나의 단계에서 반복하게 된다. 모든 $a_{t,i}$값은 0이 되면, 하나의 단계는 끝나게 되고 다음 단계인 $(t+1)$단계로 넘어가 위의 과정을 반복하게 된다. 모든 노드 i에 대하여 $r_i^t = 0$을 만족하게 되면 최종 브로드캐스트 스케줄링의 테이블이 완성되고 알고리즘을 마치게 된다. 이를 의사코드로 표현하면 표 1과 같다.

(표 1) 제안하는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘
(Table 1) Proposed broadcast scheduling algorithm

Step 1 $t = 0$
$S_k^0 = \{k_1,\ k_2,\ \ldots,\ k_N\}$
$= \{r_1,\ r_2,\ \ldots,\ r_N\}$
$a_{t,i} = 1 \quad \forall i$

Step 2 $t \leftarrow t+1$

Step 3 Find $\alpha = \underset{i}{\arg} max\left(k_i \in S_k^t\right)$ among $a_{t,i} = 1$

Step 4 $a_{t,\alpha} = 0$ and $r_\alpha \leftarrow r_\alpha - 1$

Step 5 $a_{t,j} = 0$ for all j which is 1-hop or 2-hop apart from α.

Step 6 If $a_{t,i} = 0\ \forall i$, then go to Step 7. Else go to Step 3.

Step 7 If $S_k^t = \{0,\ 0,\ \ldots,\ 0\}$, then STOP. Else go to Step 2.

4. 성능 분석

무선 네트워크에서의 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘의 성능은 '평균지연시간'(average time delay)을 통해 분석할 수 있다. 평균지연시간을 구하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.[4]

(1) 패킷은 고정된 길이이며 각 타임 슬롯의 길이는 패킷을 전송하기 위해 필요한 시간과 동일하다.
(2) 노드 i의 도착간격시간(inter arrival time)은 통계적으로 서로 독립적이며, 패킷의 도착률은 λ_i (packets/slot)인 포아송(Poisson) 분포를 따른다. 노드 i의 트래픽은 자기 자신의 트래픽과 다른 노드들로부터 받은 트래픽으로 구성된다. 패킷은 각 노드의 버퍼에 저장되고 버퍼의 사이즈는 무한이다.
(3) 노드 i의 서비스 타임의 확률 분포는 결정성(deterministic)을 가지며, 서비스율은 μ_i(packets/slot)이다.
(4) 패킷의 전송은 각 타임 슬롯이 시작할 때에만 가능하다.

위와 같은 가정 하에, 전체 네트워크는 N개의 $M/D/1$ Queue로 구성된 모델로 가정하였고, 각 노드의 평균지연시간(D_i)을 P-K (Pollaczek-Khintchiine) 공식으로 구할 수 있다.[11]

$$D_i = \frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\lambda_i}\frac{(\lambda_i/\mu_i)^2}{2(1-\lambda_i/\mu_i)} \tag{14}$$

여기서 $\mu_i = \sum_{m=1}^{M} x_{m,i}/M$ (packets/slot)이다.

또한 네트워크 전체지연시간(D)은 다음과 같이 정의한다.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{N}\lambda_i D_i}{\sum_{i=1}^{N}\lambda_i} \tag{15}$$

본 논문에서 제안하는 복잡계 네트워크 기반 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘에서는 각 노드의 링크의 수에 따른 필요전송기회를 부여하였기 때문에, 노드 i의 패킷 도착률은 초기 $(t=0)$ 필요전송기회에 비례한다고 가정한다. λ_{Total}은 전체 네트워크의 패킷도착률을 의미할 때, 제안하는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘의 각 노드의 패킷도착률을 다음과 같다.

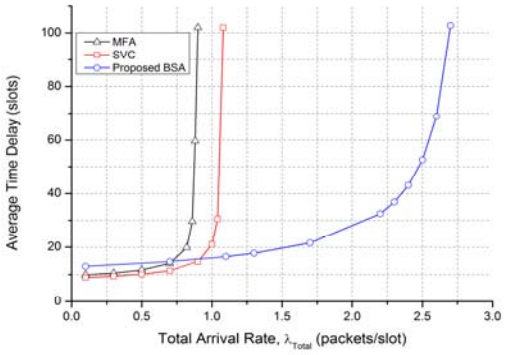
(표 2) 전송효율 비교
(Table 2) Comparison of transmission efficiency

	N=50	*N*=100	*N*=200
MFA	0.1818	0.1739	0.1543
SVC	0.1845	0.1756	0.1537
Proposed BSA	0.2429	0.2242	0.2181

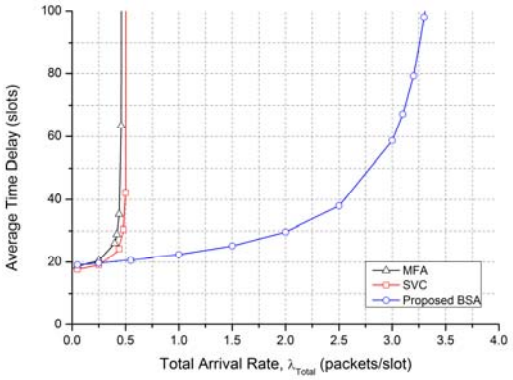
$$\lambda_i = \frac{k_i \lambda_{Total}}{\sum_{n=1}^{N} k_n} \tag{16}$$

표 2는 본 논문에서 제안하는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘(Proposed BSA)의 전송효율(E_T)을 전체 노드의 수를 변화시켜가면서 MFA 알고리즘, SVC 알고리즘과 비교한 것이다. 전송 효율은 각각의 알고리즘을 통해 구성된 전체 스케줄링 테이블의 길이(M)과 전체 네트워크의 노드 수(N)을 곱한 값으로 전체 노드에게 배정된 슬롯의 수를 나누어 구할 수 있다. 즉 전체 스케줄링 테이블 중에서 노드에게 배정된 슬롯의 비율을 의미한다. 주어진 스케줄링 테이블의 길이에서 노드들에게 최대한 많이 배정될수록 전송효율은 높다고 판단할 수 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 노드중요도를 고려한 전송효율이 기존에 존재하는 다른 알고리즘들에 비해 약 30% 성능의 향상을 확인할 수 있다.

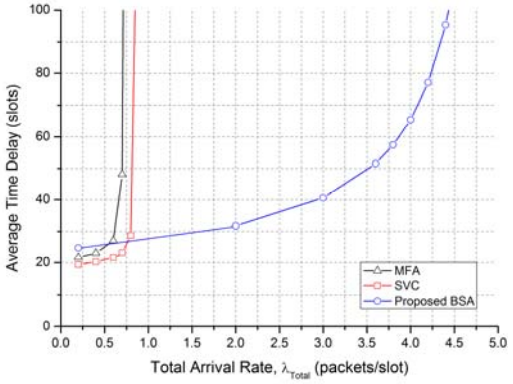
그림 2는 전체 네트워크의 패킷도착률(λ_{Total})을 변화시켜가면서 네트워크 전체지연시간(D)을 기존의 알고리즘과 비교한 그래프이다. 네트워크의 전체지연시간은 각 노드의 Queue가 포화상태일 때, 각 노드에서 패킷들이 전송되기 위한 지연시간의 평균을 의미한다. 비교대상인 MFA 알고리즘과 SVC 알고리즘의 경우, 복잡계 네트워크를 구성하는 노드의 수가 증가함에 따라 전체 네트워크의 패킷도착률이 0.5 이상인 구간에서 평균 지연시간이 급격히 증가하는 반면, 제안하는 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘은 패킷도착률이 2 정도의 높은 구간에서도 평균 지연시간 측면에서의 향상을 보임을 확인할 수 있다.



(a) N=50



(b) N=100



(c) N=200

(그림 2) 네트워크 전체지연시간 비교
(a) N=50, (b) N=100, (c) N=200
(Figure 1) Comparison of average time delay
(a) N=50, (b) N=100, (c) N=200

5. 결 론

본 논문에서는 복잡계 네트워크 이론에 기반하여 무선 네트워크 토폴로지를 구성하고, 복잡계 이론에 따른 분포 확률을 분석하여 각 노드의 브로드캐스트 전송을 위한 스케줄링 알고리즘 기법을 제안하였다. 실험 결과를 통해 기존에 존재하는 다른 브로드캐스트 스케줄링 알고리즘과 비교하였을 때, 제안하는 방식의 알고리즘이 네트워크의 지연시간 감소와 전송효율에 있어서의 성능 향상을 보임을 알 수 있었다. 제안하는 방법을 통하여 앞으로 더욱 그 분야가 확장될 복잡계 이론 기반의 네트워크 분석에서 그 활용도는 더욱 높아질 것으로 예상된다.

참 고 문 헌 (Reference)

[1] P. Gupta and P. R. Kumar, “Capacity of wireless networks,” IEEE Transactions on Information Theory, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, Mar. 2000. http://dx.doi.org/10.1109/18.825799

[2] A. L. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” Science, vol. 286, no. 5439, pp. 509 – 512, Oct. 1999.

[3] A. L. Barabási, R. Albert, and H. Jeong, ″Mean-field theory for scale-free random networks,″ Physica A, vol. 272, no.1-2, pp. 173-187, Oct. 1999.

[4] G. Wang and N. Ansari, “Optimal broadcast scheduling in packet radio networks using mean field annealing,” IEEE J. Sel. Areas. Commun., vol. 15, no. 2, pp. 250 – 260, Feb. 1997.

[5] J. Yeo, H. Lee, and S. Kim, “An efficient broadcast scheduling algorithm for TDMA ad-hoc networks,” Comput. Oper. Res., vol. 2002, no. 29, pp. 1793 – 1806, 2002.

[6] G. Chakraborty, “Genetic algorithm to solve optimum TDMA transmission schedule in broadcast packet radio networks,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 52, no. 5, pp. 765 – 777, May 2004.

[7] S. Salcedo-Sanz, C. Bouso ˜no-Calz´on, and A. R. Figueiras-Vidal, “A mixed neural-genetic algorithm for the broadcast scheduling problem,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 2, no. 2, pp. 277 – 283, Mar. 2003

[8] H. Shi and L. Wang, “Broadcast scheduling in wireless multihop networks using a neural-network-based hybrid algorithm,” Neural Netw., vol. 18, no. 5-6, pp. 768 – 771, Aug. 2005.

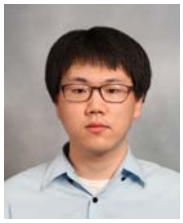
[9] Y. Shen and M. Wang, “Broadcast scheduling in wireless sensor networks using fuzzy Hopfield neural network,” Expert Syst. Appl., vol. 34, no. 2, pp. 900 – 907, Feb. 2008.

[10] D. Jungnickel, Graphs, Networks and Algorithms. Springer-Verlag, 1999.

[11] F. Hillier, G. Lieberman, Introduction to Operations Research. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990.

◐ 저 자 소 개 ◑

박 종 홍 (Jong-Hong Park)
2010년 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2010년~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정
관심분야 : IoT, Congitve Radio Networks, Augmented Reality & Cloud Computing, Broadcast Scheduling, 복잡계 네트워크 이론, etc.
E-mail : jhwannabe@yonsei.ac.kr



서 순 호 (Sunho Seo)
2014년 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2014년~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정
관심분야 : 네트워크 신뢰관리기법, 복잡계 네트워크 이론, etc.
E-mail : trial@yonsei.ac.kr

정 종 문 (Jong-Moon Chung)
1992년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1999년 Pennsylvania State University, Dept. of Electrical Engineering (공학박사)
1997년~1999년 Assistant Professor & Instructor, Pennsylvania State University, Dept. of Electrical Engineering
2000년~2005년 Director, Advanced Communication Systems Engineering Laboratory (ACSEL)
2000년~2005년 Director, Oklahoma Communication Laboratory for Networking & Bioengineering (OCLNB)
2000년~2005년 Associate Professor (Tenured), Oklahoma State University, School of Electrical & Computer Engineering
2011년~현재 Editor, IEEE Transactions on Vehicular Technology
2013년~현재 Co-Editor-in-Chief, KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
관심분야 : IoT & Smartphones, Smart Cars & ITS, Military Communications, NFV / ICN / SDN, LTE-A / 5G Networks, Cloud Computing & Big Data, Public Safety AR Simulators and Networking.
E-mail : jmc@yonsei.ac.kr