

무선 센서 네트워크에서 서비스에 필요한 데이터 전송량을 확보하기 위한 토폴로지 관리 방법

윤명준*, 김석규*, 이재용°

Topology Control Scheme Providing Throughput Requirement of a Service in Wireless Sensor Networks

Myungjune Youn*, Seog-gyu Kim*, Jaiyong Lee°

요 약

무선 센서 네트워크는 다양한 응용 서비스에 이용이 가능한 네트워크이다. 다양한 응용 서비스에 따라서 서비스에서 요구하는 네트워크 전송량은 매우 다양하다. 특히 무선 센서 네트워크에서는 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 통신 효율성을 높이기 위해서 다양한 토폴로지 제어 방법들이 제시되어 왔다. 이러한 토폴로지 제어 방법들은 대부분 통신의 효율성 측면에서 연구가 되어왔기 때문에 실제 응용 서비스에서 요구되는 데이터 전송량을 만족시키지 못하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 만족시킬 수 있도록 하는 토폴로지 제어 알고리즘을 제시하였다.

Key Words : Connectivity, Energy Efficiency, Sensor Network, Throughput, Topology Control

ABSTRACT

There are various kinds of applications for wireless sensor network, and each application has difference requirements such as throughput. Topology control is the key issue to minimize energy consumption by solving communication collision and radio interference. However, existing topology control algorithms cannot support application requirement because communication efficiency and network connectivity are the main issues of topology control. In this paper, we propose a topology control algorithm that support throughput requirement of an application.

1. 서 론

무선 센서 네트워크는 다양한 응용 서비스에 이용이 가능한 네트워크다. 하지만 센서 네트워크는 배터리를 이용하여 동작하므로 에너지 효율성을 높이는 연구가 주를 이루고 있다. 특히 센서 네트워크에서는

센서 노드가 가지는 센서의 감지 범위가 매우 좁기 때문에 많은 센서 노드를 서비스 지역에 배치하게 된다. 이렇게 되면 센서 노드의 통신 반경 안에 수많은 센서 노드들이 존재하게 되므로 효율적인 통신이 어렵게 되고 이로 인해서 에너지 효율이 감소하게 된다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위한 방법이 필요하다. 이를

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 방송통신산업기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [B0101-15-1276, 다양한 IoT 서비스를 위한 액세스 네트워크 제어 기술]

♦ First Author : LG Electronics, windboy@yonsei.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, jy1@yonsei.ac.kr, 종신희원

* School of Information and Communication Engineering, Andong University, sgkion@andong.ac.kr, 종신희원

논문번호 : KICS2015-06-191, Received June 18, 2015; Revised July 27, 2015; Accepted September 7, 2015

위해서 물리 계층과 링크 계층에서 주변 노드들로부터의 신호 간섭을 줄이고 채널에 효율적으로 접근하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 하지만 이러한 연구들은 노드 밀도가 높은 환경에서 제한된 성능 향상만을 가져올 수 있다. 근본적으로 문제를 해결하기 위해서는 노드의 통신 반경을 줄여 노드 밀도를 낮춰야 한다. 이를 위해서 네트워크의 토폴로지 제어 연구가 진행되어 왔다. 토폴로지 제어란 네트워크 전체의 연결성을 유지하면서 노드의 통신 반경을 줄여 주변 노드들로부터의 신호 간섭이나 충돌을 줄이는 연구 분야이다. 일반적으로 노드의 전송 파워를 줄이면 신호 간섭과 채널에 접근하기 위한 경쟁 노드의 숫자가 줄어들어 효율적인 통신이 가능하게 된다. 이에 따라서 에너지 효율성이 높아지고 네트워크의 전송률도 향상되는 이점이 있다. 하지만 전송 파워를 무작정 줄여서 통신을 할 경우 네트워크의 연결성에 문제가 생기게 된다. 따라서 기존의 토폴로지 제어 연구는 주로 네트워크의 연결성을 유지하는 최소한의 전송 파워를 찾는 연구가 주를 이루었다.

센서 네트워크는 다양한 응용 서비스에 사용될 수 있으며 네트워크에서 지원해야 하는 데이터 전송률은 각각의 응용 서비스에 따라 모두 다른 특징을 가진다. 하지만 기존의 연구는 네트워크의 연결성 유지를 위한 전송 파워를 찾는데 초점이 맞춰져 있어 응용 서비스에 따른 다양한 네트워크 전송률을 보장하지 못하는 문제가 발생한다. 따라서 응용 서비스가 요구하는 데이터 전송률을 만족시키는 토폴로지를 찾는 연구가 필요한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 다양한 응용 서비스가 요구하는 데이터 전송률을 최대한 보장하면서 네트워크의 에너지 소모를 최소화 할 수 있는 토폴로지 제어 방법인 Best Effort Throughput(BET) 토폴로지 제어 방법을 제안하였다. BET 알고리즘을 제안하기 위해서 본 논문에서는 네트워크의 각 노드에서 토폴로지 전송량을 계산하는 방법을 제안하였고 이를 바탕으로 각 노드에서 네트워크의 연결성을 유지하면서도 응용 서비스가 요구하는 데이터 전송률을 제공할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

II. 본 론

2.1 기존 연구

토폴로지 제어와 관련하여 연구 초기에는 노드의 통신 반경을 최소화 하면서 네트워크의 연결성을 유지할 수 있는 연구가 주를 이루었다. Minimum Spanning Tree (MST)^[1], Cone Based Topology

Control (CBTC)^[2] 등이 대표적인 논문들이다. [1]에서는 MST를 만들 수 있는 분산 알고리즘을 제안하였다. 따라서 하나의 노드가 전체 네트워크의 정보를 바탕으로 계산할 필요 없이 실제 네트워크의 각 노드들이 분산된 알고리즘을 이용하여 MST를 구성해 네트워크에 쉽게 적용할 수 있는 알고리즘이다. 하지만 [1]에서는 각각의 노드가 자신의 위치정보나 각 노드 사이의 거리정보를 알고 있어야만 토폴로지를 계산할 수 있다. 이러한 제약사항을 벗어나기 위해서 [2]에서는 노드의 위치정보가 아니라 각 노드의 각도정보를 활용하여 네트워크 토폴로지를 찾는 방법을 제안하였다. 일반적으로 노드의 거리정보를 찾는 것보다는 상대적으로 각도 정보를 찾는 것이 더 쉬운 방법이기 때문에 [2]는 [1]에서 제시하고 있는 방법보다 더 구현이 쉬운 장점이 있다. [1,2]와 같은 연구는 네트워크의 연결성이 유지되는 최소한의 통신반경을 찾는 연구이다. 하지만 이러한 알고리즘의 문제점은 네트워크의 연결성에 중요한 역할을 하는 노드에 문제가 생길 경우 전체 네트워크의 연결성이 깨지는 현상이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 [3]에서는 FLSSK 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 k-1개의 노드가 고장이 나더라도 네트워크의 연결성이 유지될 수 있는 알고리즘이다. 따라서 실제 네트워크에서 노드의 고장이나 기타 급격한 무선 환경의 변화에 잘 대응할 수 있는 방법이다.

최근의 연구들은 네트워크의 연결성뿐만 아니라 데이터 전송량도 함께 고려하고 있다. [4]에서는 데이터 양, 주변 간섭 노드의 숫자, Medium Access Control (MAC) 단의 상태 등을 고려한 함수를 제안하여 이를 바탕으로 네트워크 혼잡 지역의 토폴로지를 변경하는 방법을 제시하였다. 이를 이용해 혼잡 지역의 데이터 전송률을 향상시키는 알고리즘을 제안하였다. [5]에서는 그래프 이론을 이용하여 데이터 전송률을 모델링하고 이를 바탕으로 토폴로지를 찾는 알고리즘을 제시하였다. 하지만 [5]에서는 실제 네트워크의 데이터 전송률을 이용하는 것이 아니라 그래프 이론을 이용하기 때문에 네트워크의 전송률을 직접 제어하지는 못하는 단점이 있다. [6]에서는 각 노드의 Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)을 이용하여 네트워크가 가질 수 있는 최대 전송률을 가지는 토폴로지를 찾는 방법을 제안하였다. 하지만 [6]에서 제시하는 방법은 하나의 노드가 모든 노드의 정보를 알고서 계산을 수행해야 하는 집중식 알고리즘으로 실제 네트워크에 적용하기는 어렵다.

[7-9]에서는 이동성을 고려한 토폴로지 제어 알고

리즘에 대해 연구하였다. 이동성이 있는 경우는 노드들의 위치 변화로 인해 네트워크의 연결성이 쉽게 깨질 수 있어 이러한 특성을 고려하여 네트워크 연결성을 잘 유지할 수 있는 알고리즘을 제안하고 있다.

기존의 연구들은 네트워크의 전송률을 고려하지 않거나 고려하더라도 네트워크의 전송률을 최대화 하는 연구가 주를 이루었다. 본 논문에서는 실제 응용 서비스가 요구하는 데이터 전송률을 만족시킬 수 있는 네트워크 토폴로지를 찾기 위해서 데이터 전송률을 쉽게 바꿀 수 있는 토폴로지 제어 알고리즘을 제시한다.

2.2 제안하는 알고리즘

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 특성상 다음과 같은 가정 사항을 고려하여 알고리즘을 제안한다. 무선 센서 네트워크의 특성상 MAC 계층에서는 경쟁 기반의 채널 접근 모델을 사용한다고 가정한다. 무선 센서 네트워크는 많은 노드들이 분산된 방법으로 같은 채널에 접근해야하기 때문에 경쟁 기반의 채널 접근 방식이 적합하다. 또한 physical (PHY) 계층에서는 데이터 전송 속도가 SINR에 비례한다고 가정한다.

2.2.1 Throughput 모델

본 절에서는 토폴로지의 전송률을 정의하기 위한 throughput 모델을 소개한다. 일반적으로 노드의 throughput은 단위 시간당 전송되는 데이터의 양으로 정의할 수 있다. 따라서 노드의 PHY, MAC 계층에서 전송되는데 소모되는 시간을 각각 t_i^c , t_i^t 라고 정의한다면 노드 i 의 throughput은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_i = \frac{f_s}{t_i^c + t_i^t} \quad (1)$$

수식 (1)에서 f_s 는 데이터 패킷의 크기를 나타내며 t_i^c 는 노드 i 가 MAC 계층에서 경쟁을 통해 채널을 획득하는데 걸리는 시간, t_i^t 는 PHY 계층에서 실제 데이터 패킷을 전송하는데 걸리는 시간을 나타낸다.

수식(1)을 바탕으로 본 논문에서는 다음과 같이 노드 i 의 토폴로지 전송량을 정의한다.

$$T_i^{top} = \frac{f_s}{(t_i^c + t_i^t) \lceil R_{max}/R_i \rceil} \quad (2)$$

수식(2)에서 R_{max} 는 센서 노드의 최대 통신 반경

을 나타내며 R_i 는 노드 i 의 통신 반경을 나타낸다. 따라서 $\lceil R_{max}/R_i \rceil$ 는 노드의 최대 전송거리를 1홉으로 보았을 때 대비 현재 노드의 전송 반경으로 통신할 경우 몇 홉이 필요한지를 나타내는 값이 된다. 멀티 홉 통신을 하는 무선 센서 네트워크의 특성상 홉 수가 길어지면 같은 데이터를 전송하는데 더 많은 시간이 걸리기 때문에 이러한 멀티 홉 통신의 특성을 반영하기 위해서 수식 (2)와 같이 노드 i 의 토폴로지 전송량을 정의하였다.

수식 (2)가 실제 네트워크의 전송량과 어떠한 관계를 보여주는지를 알아보기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1은 센서 노드가 1m X 1m 간격으로 그리드 하에 분포되어 있고 소스 노드와 목적지 노드의 거리가 100m인 환경에서 수행한 그래프를 보여 준다. 그 외의 자세한 시뮴레이션 환경은 III절의 시뮴레이션 환경과 동일한 환경에서 수행하였다. PHY 에서의 전송률은 $W \cdot \log(1 + SINR)$ 를 가지고 산출하였다. 이때 사용된 채널 모델(Log-distance path loss model) 및 파라미터들은 시뮴레이션에 사용된 환경과 동일한 환경을 가정하였다.

그림 1에서 보면 PHY 계층에서의 데이터 전송 속도는 통신 반경과 관계 없이 거의 일정한 속도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 MAC 계층에서의 경쟁 기반의 채널 접근 모델 때문이다. 하나의 노드가 채널 경쟁에서 접근 권한을 얻을 경우 그 노드의 통신 반경 안에 있는 노드들은 통신을 하지 못하기 때문에 PHY 계층에서의 noise+interference값은 거의 비슷하게 유지하게 된다. 또한 통신 반경이 늘어날 경우 end-to-end hop 수를 줄이기 위해서 더 멀리 있는 노드를 선택하기 때문에 실제 통신 반경을 늘려 전송 파워를 늘리더라도 수신단의 수신 파워는 크게 변화하지 않는다. 이에따라서 SINR은 통신 반경에 상관없이

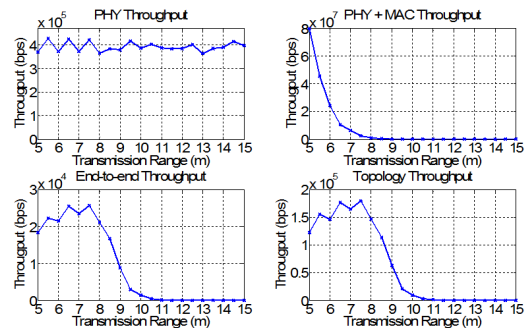


Fig. 1. Comparison of topology throughput and End-to-end throughput

거의 비슷하게 유지되는 특성을 가지게 된다. PHY 계층과 MAC 계층을 함께 볼 경우 데이터 전송량은 통신 환경이 증가함에 따라서 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 통신 환경이 커질 경우 노드간의 경쟁이 많아서 채널을 접근하는데 더 많은 시간이 필요하기 때문이다. 하지만 실제 종단 간 데이터 전송량은 통신 환경이 어느 정도 커질 때까지는 늘어나다가 그 이후에는 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 통신 환경이 작은 경우에는 여러 홉을 거쳐 데이터 전송이 이루어지기 때문에 나타나는 현상이다. 본 논문에서 정의한 토폴로지 전송량의 경우 종단 간 데이터 전송량과는 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 토폴로지 전송량이 실제 네트워크의 전송량을 잘 반영해 주고 있음을 나타낸다. 절대적인 데이터 전송량 값은 다르지만 실제 노드의 통신 환경에 따른 전송량의 변화 추세를 수식 (2)에서 정의한 토폴로지 전송량으로 충분히 계산이 가능하다.

2.2.2 제안하는 알고리즘

무선 센서 네트워크에서 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 만족시키는 토폴로지를 찾는 것은 가능할 수도 있고 불가능 할 수도 있다. 실제 네트워크에서 노드의 배치 상황에 따라 네트워크에서 가능한 데이터 전송량에는 한계가 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 $T_{threshold}$ 로 정의하고 각 노드에서 $T_{threshold}$ 를 만족시킬 수 있는 경우에는 $T_{threshold}$ 을 만족하는 노드의 통신 환경을 찾고 만일 $T_{threshold}$ 를 만족시킬 수 없는 경우에는 각 노드가 낼 수 있는 최대한의 데이터 전송량인 T_i^{max} 를 만족시키는 노드의 통신 환경을 찾는 알고리즘을 제시한다.

이를 위해서는 수식 (2)에서 t_i^s 와 t_i^c 를 노드의 통신 환경에 따른 값으로 정의해야 한다. 먼저 t_i^s 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$t_i^s(R_i) = \frac{f_s}{W \cdot \log(1 + SINR_i)} \tag{3}$$

$$SINR_i = \frac{g_{ij}p_j}{\sum_{n \neq i,j} g_{ni}p_n + N_0} \tag{4}$$

수식 (3),(4)에서 W 는 채널의 대역폭을 나타내며 g_{ij} 는 노드 i 와 j 사이의 채널 계인, p_i 는 노드 i 의 전송

파워, N_0 는 가우시안 노이즈로 power 값을 나타낸다. 이때 노드의 전송 파워 p_i 는 다음과 같은 path-loss 모델을 이용하여 전송 환경에 따른 수식으로 나타낼 수 있다.

$$p_i(R_i) = P_{target} + 10n\log(R_i) + X_\sigma \tag{5}$$

수식 (5)에서 P_{target} 은 PHY에서 신호를 검출하는데 필요한 receiver sensitivity 값을 나타내며, X_σ 는 평균이 0인 가우시안 랜덤 변수를 나타낸다.

t_i^c 는 MAC 계층에서 사용하는 채널 접근 방법에 따라서 모델링이 달라진다. 예를 들어 slotted aloha 방식의 MAC을 사용하는 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_i^c(R_i) = t_{slot} \times e^{\lambda n} \tag{6}$$

수식 (6)에서 t_{slot} 은 slotted aloha에서 사용하는 타임슬롯의 값을 나타내며 λ 는 네트워크에서 발생하는 데이터 로드 값으로 0~1의 값을 가진다. n 은 노드 i 의 통신환경 안에 있는 노드의 숫자를 나타내며 만일 노드가 균등하게 분포되어 있다고 가정한다면 $n = \pi R_i^2 \sigma$ 로 나타낼 수 있다. 이때 σ 는 단위 면적당 노드의 밀도를 나타낸다.

위의 수식 (2)~(6)을 이용하여 각 노드에서의 토폴로지 전송량 T_i^{tp} 값을 통신환경 R_i 의 값에 따라서 계산할 수 있게 된다. 이를 이용하여 본 논문에서는 아래와 같은 알고리즘을 이용하여 토폴로지를 찾는 방법인 Best Effort Throughput (BET)(centralized) 알고리즘을 제안한다.

먼저 기준에 알려져 있는 토폴로지 제어 알고리즘을 이용하여 네트워크의 연결성이 유지되는 각 노드의 최소 전송 파워 p_i^{min} 값을 찾는다. 본 논문에서는 MST 알고리즘을 이용하여 이 값을 계산하였다. 그 이유는 MST 알고리즘이 tree를 구성할 때 link cost가 가장 작게되는 tree를 만들기 때문에 link cost를 노드 사이의 거리로 설정할 경우 MST 알고리즘은 가장 가까운 노드들끼리 연결된 tree를 구성한다. 따라서 MST 알고리즘이 가장 작은 p_i^{min} 을 찾아주기 때문이다. 이 값을 바탕으로 각 노드에서는 p_i^{min} 을 수식 (5)를 이용하여 전송 환경인 R_i^{min} 으로 변경하고 T_i^{tp} 값을 R_i^{min} 부터 R_i^{max} 까지 계산한다. 이를 바탕으로 응용

BET Algorithm

```

1: procedure Connectivity (V,E)
2: Run existing topology control algorithm
3: return  $p_i^{\min}$ 
4: end procedure
5:
6: procedure Throughput( $p_i^{\min}, d, \lambda$ )
7:  $p_i^{pre} \leftarrow p_i^{\max}, p_i^{next} \leftarrow p_i^{\min}$ 
8: while  $p_i^{pre} - p_i^{next} > \Delta p$  do
9:    $p_i^{pre} \leftarrow p_i^{next}$ 
10:   $R_i^{\min} \leftarrow \text{Power To Range}(p_i^{\min})$ 
11:   $T_i^p(R_i)$  for  $R_i^{\min} \leq R_i \leq R_i^{\max}$ 
12:   $R_i^{next} \leftarrow \min\{R_i : T_i^p(R_i) \geq \min(T_{threshold}, T_i^{\max})\}$ 
13:   $p_i^{next} \leftarrow \text{Range To Power}(R_i^{next})$ 
14: end while
15: return  $p_i^* = p_i^{next}$ 
16: end procedure
    
```

서비스가 요구하는 데이터 전송량 $T_{threshold}$ 를 만족하는 가장 작은 R_i 를 찾거나 이를 만족하지 못할 경우 노드의 최대 전송량(T_i^{\max})을 내는 R_i 값을 찾아낸다. 가장 작은 R_i 를 찾는 이유는 요구 데이터 전송량을 만족하는 가장 작은 파워 값을 찾기 위해서이며 이렇게 해야 에너지 효율을 높일 수 있다. 이를 다시 전송 파워로 변경하고 같은 과정을 여러 번 반복하게 된다. 이렇게 반복 계산하는 이유는 각 노드들의 전송 파워를 각각 계산하기 때문에 변경된 파워가 다른 노드들의 계산에 영향을 주기 때문이다. 즉, 각 노드가 자신의 interference 값을 결정하기 위해서는 다른 노드들의 전송 파워값을 가지고 계산을 하게 되는데, 각 노드는 전송파워를 각자 계산하고 이 값을 결정하므로 다른 노드들의 변경된 파워 값에 따라 다시 반복적으로 interference 값을 결정해야 한다. 따라서 이러한 계산을 여러 번 수행하여 계산된 전송 파워의 변화가 일정 값 Δp 이하보다 작아지면 알고리즘이 끝나게 된다.

하지만 위의 알고리즘을 계산하기 위해서는 각각의 노드는 주변 노드들의 전송 파워뿐만 아니라 네트워크에 있는 모든 노드들의 전송 파워 값을 알아야 계산

이 가능하다. 하지만 실제 네트워크에서는 이런 방법은 구현이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 센서 노드들이 균등하게 배치되어 있다는 가정 하에서 각 노드들의 전송 파워 값을 알 필요 없이 자신이 계산한 통신 파워와 동일한 파워를 이용한다는 가정하고 BET(distributed)알고리즘을 제안한다. 따라서 BET(distributed)는 다른 노드들의 전송 파워에 대한 정보 없이 각 노드에서 분산된 방식으로 알고리즘을 수행할 수 있다. BET(distributed)와 BET(centralized)의 차이는 다른 노드들의 전송 파워를 자신의 전송 파워와 동일한 것으로 계산하는지 아니면 모든 정보를 알고서 계산을 하는지의 차이만 있다. 즉, BET 알고리즘 11번에서 T_i^p 값을 계산할 때 다른 노드들의 전송 파워를 자신이 사용하는 파워와 동일한 것으로 가정하고 알고리즘을 수행한다. 이러한 가정이 가능한 이유는 센서 노드들이 균등하게 배치될 경우 각 노드들의 전송 파워는 비슷하게 계산되기 때문이다. 또한 노드들이 균등하게 배치되지 않더라도 MAC 계층에서 경쟁 기반으로 동작하는 센서 네트워크의 특성상 주변 노드들로부터 오는 간섭신호의 세기는 일정하게 유지되는 특성이 있기 때문이다. 이 경우 실제 노드의 수신 파워는 조금씩 달라지지만 수신 파워보다는 노드의 숫자가 많은 센서 네트워크 환경의 특성상 간섭신호의 세기가 더 많은 영향을 주는 특성을 보인다. 실제 시뮬레이션 결과 모든 노드들의 정보를 알고 알고리즘을 수행할 때와 그렇지 않을 경우에 비교 결과를 보면 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

III. 성능 평가

기본적인 시뮬레이션 환경은 표 1에 나타나 있다. 대부분의 시뮬레이션 파라미터들은 IEEE 802.15.4 스펙^[10]과 IEEE 802.15.2 스펙^[11]에 있는 채널 모델을 가져와서 사용했다. $PL(d_0)$ 값은 $d_0 = 8m$ 에서 58.5 dBm을 사용하였으며 이는 [11]로부터 가져온 값이다. 또한 주파수는 2.4GHz에서 동작하는 것으로 설정하였다. 트래픽 로드 λ 값은 0.4로 전체 노드의 40%가 트래픽을 발생하는 상황을 가정하였다. 또한 각 노드들은 트래픽을 발생 시킬 때마다 64 kbytes/hour 패킷을 전송한다. 노드들은 500m X 500m 환경에서 랜덤하게 배치하여 시뮬레이션을 진행했다.

그림 2는 BET알고리즘을 이용하여 토폴로지를 찾을 경우 실제 반복 계산에 의해서 데이터 전송량이 수렴하고 있는 모습을 보여주고 있다. 가로축이 계산을

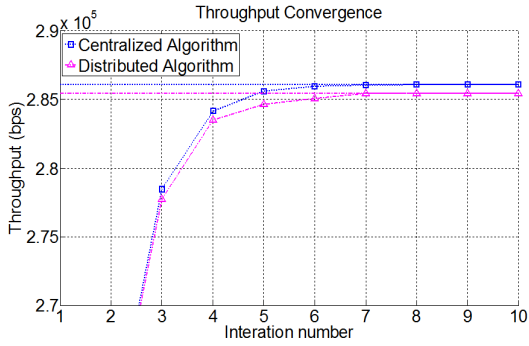


Fig. 2. Throughput convergence

Table 1. Simulation Parameters

파라미터	값
network size	500m X 500m
노드 수	500~600
packet size	64 Kbytes
traffic load λ	0.4
채널 대역폭	2 MHz
slot time t_{slot}	16 μ sec
최대 전송 파워	10 dBm
receiver sensitivity	-85 dBm
path-loss exponent n	3.3

수행하는 횟수를 나타내며 세로축은 실제 데이터 전송량을 나타낸다. 그림에서 보듯이 분산 알고리즘을 이용하더라도 중앙 집중식 알고리즘과 거의 차이가 없이 데이터 전송량이 수렴하는 모습을 볼 수 있으며 5~6번 정도 반복 계산을 통해서 토폴로지를 찾을 수 있다. 이러한 반복적인 계산은 MST 알고리즘을 수행한 후 추가적으로 계산해야 하는 것으로 토폴로지를 결정하는데 필요한 오버헤드로 작용할 수 있다. 하지만 한번 토폴로지가 결정되면 토폴로지를 자주 바꾸지 않고 비교적 오랜 시간동안 유지하기 때문에 토폴로지 제어를 통해 얻을 수 있는 이득과 비교해 적은 수준이라고 할 수 있다 하지만 이동성이 높은 네트워크인 경우에는 자주 토폴로지를 바꾸어야 하므로 본문에서 제시하는 알고리즘은 이동성이 없는 네트워크에 적합하다.

그림 3은 BET 알고리즘을 통해서 찾은 네트워크 토폴로지에서도 실제 전체 네트워크 노드들의 데이터 전송량을 누적 분포 함수를 이용해서 나타낸 그래프이다. 네트워크에는 500개의 노드를 배치하였으며 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량은 910kbps로 설정했다. 아무런 토폴로지 제어 알고리즘을 사용하지

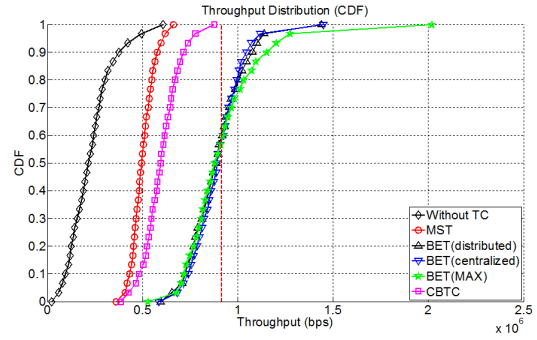


Fig. 3. CDF of throughput distribution

않았을 경우에는 모든 노드들의 데이터 전송량이 매우 낮게 나타남을 볼 수 있다. 이때 평균 데이터 전송량은 220kbps 정도로 나타난다. MST를 이용한 토폴로지 제어의 경우 평균 데이터 전송량은 500kbps 정도가 나오며 CBTC를 사용하는 경우 MST보다 약간 높은 600kbps의 데이터 전송량을 보여준다. BET 알고리즘의 경우 평균 데이터 전송률은 890kbps이며 이는 실제 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량과 거의 비슷한 수치가 나오고 있다. 실제 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 만족하는 노드는 약 42% 정도로 나타난다. 비록 전체 노드들 중에서 42%만 데이터 전송량을 만족하더라도 이렇게 평균 데이터 전송률이 요구 데이터 전송량과 비슷하게 나타나는 이유는 요구 데이터 전송량을 만족시키는 노드들이 실제 응용 서비스에서 요구되는 데이터 전송량보다 더 높은 데이터 전송량을 가지기 때문이다. 이는 토폴로지 전송량을 가지고 데이터 전송량을 계산하여 토폴로지를 찾기 때문에 토폴로지 전송량과 실제 네트워크 노드의 전송량 사이의 차이에서 비롯되는 결과라 할 수 있다. 즉 토폴로지 전송량이 실제 네트워크 전송률의 추세를 정확하게 반영해 주지만 정확한 네트워크 전송량은 계산하지 못하는 결과라 할 수 있다. 따라서 토폴로지 전송량과 실제 네트워크 전송량 사이의 관계를 더 정의할 필요성이 있다. 전체 노드들 중에서 나머지 노드들은 실제 자신이 낼 수 있는 최대한의 네트워크 전송률을 가지게 되는데 이는 그래프에서 BET(MAX)와 비교를 통해서 알 수 있다. BET(MAX)는 BET 알고리즘을 수행할 때 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 무한대로 놓고서 계산한 결과이다. 따라서 이때는 모든 노드들이 자신이 낼 수 있는 최대의 데이터 전송량을 내는 토폴로지를 선택하게 된다. 실제 BET 알고리즘을 통해 나온 결과는 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량보다 낮은

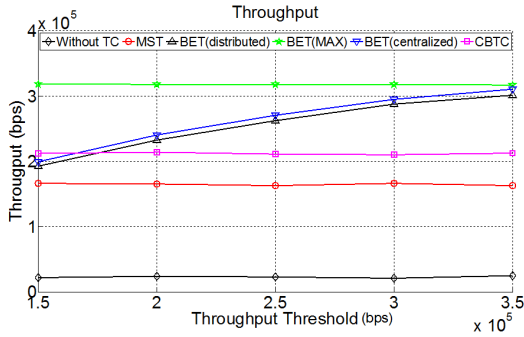


Fig. 4. Throughput as target throughput of a service changes

부분의 분포는 BET(MAX)와 거의 유사하게 나타남을 알 수 있는데 이를 통해서 모든 노드들이 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 만족시키기 위한 가장 좋은 토폴로지를 찾는다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 응용 서비스의 데이터 전송량을 증가시킬 때 실제 토폴로지의 데이터 전송량 변화를 나타낸 그래프이다. 가로축이 응용 서비스가 요구하는 전송량을 나타낸다. 이 시뮬레이션의 그림 3과 동일한 조건에서 노드 수만 600개로 변경한 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 BET를 제외한 다른 알고리즘은 항상 동일한 데이터 전송량을 보여 주지만 본 논문에서 제시하고 있는 BET 알고리즘은 응용 서비스의 데이터 요구 전송량에 맞추어서 데이터 전송량이 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 그림 4와 동일한 환경에서 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량이 변할 때 네트워크 전체 노드의 파워 소모를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량이 증가할수록 네트워크 전체에서 노드가 소모하는 파워는 함께 증가하게 된다. 또한 1.3×10^5 bps 미만에서는 파워 소모에 변화가 없는데 이는 이미 MST로 찾은 토폴로지가 요구 데이터 전송량을 만족시켜 추가적으로 BET 알고리즘에서 수행하는 작업이 아무것도 없기 때문이다. 즉, MST로 찾은 네트워크는 이미 1.3×10^5 bps의 속도를 만족시키는 토폴로지라 할 수 있다. 하지만 그 이상의 속도를 요구할 경우에는 파워 소모가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량이 높을수록 더 많은 용량의 배터리를 가지는 센서 노드를 사용해야만 센서 네트워크의 수명을 동일하게 가져갈 수 있음을 알 수 있다.

[12]에서는 전송 파워와 전송량을 이용한 네트워크 유틸리티 값을 정의하고 이를 α 값을 변경하며 네트워크 유틸리티, 즉 네트워크의 전송량을 변화시킬 수 있

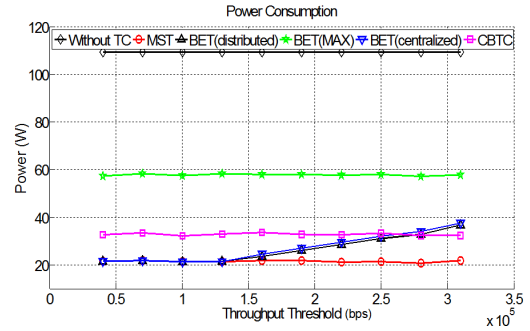


Fig. 5. Power consumption as target throughput of a service changes

는 알고리즘을 제안하고 있다. 하지만 실제 응용 서비스의 전송량을 가지고 계산하는 것이 아니며 원하는 데이터 전송량을 가지는 전송 파워를 얻을 수 있는 것도 아니기 때문에 실제 네트워크에 적용하여 사용하기에는 부적합한 알고리즘이다. [13]에서는 네트워크의 전송량을 최대화하기 위해서 토폴로지로부터 간섭 신호 분석을 통한 스케줄링을 통해 라우팅을 동적으로 하는 방법을 제시하고 있다. 이런 방법은 네트워크 혼잡이 발생한 지역에서 네트워크의 전송량을 향상시킬 수 있지만 본 논문에서 제시하는 바와 같이 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량에 대한 고려가 없는 문제점들을 가지고 있다. [12,13]과 달리 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 실제 응용 서비스의 요구를 만족시킬 수 있으며 분산 알고리즘 방식을 통해 실제 네트워크에 쉽게 적용할 수 있는 알고리즘이다.

IV. 결론

본 논문에서는 응용 서비스가 요구하는 데이터 전송량을 만족시키기 위한 BET 알고리즘을 제안하였다. 기존의 토폴로지 제어 알고리즘들은 다양한 분야에 적용이 가능한 센서 네트워크의 특성과 달리 모두 동일한 방법을 이용하여 토폴로지를 찾는다. 하지만 BET 알고리즘은 토폴로지 데이터 전송량을 기반으로 각 노드에서 응용 서비스에서 요구하는 데이터 전송량을 만족시키는 토폴로지를 찾는다. 따라서 여러 가지 응용 서비스에 따라서 쉽게 네트워크의 토폴로지를 구성할 수 있다. 또한 노드들은 분산된 방법을 이용하여 토폴로지를 찾음으로써 실제 네트워크에 쉽게 적용할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 BET 알고리즘이 응용 서비스의 데이터 전송량 요구에 맞는 토폴로지를 찾아주고 있음을 보여주고 있으며 또한 응용 서비스의 요구 데이터 전송량이 높을수록 센서 노드의 파

위 소모가 커진다는 사실을 확인할 수 있었다.

References

- [1] N. Li, J. C. Hou, and L. Sha, "Design and analysis of an MST-based topology control algorithm," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 1195- 1206, May 2005.
- [2] L. Li, J. Y. Halpern, P. Bahl, Y.-M. Wang, and R. Wattenhofer, "A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 13, no. 1, pp. 147-159, Feb. 2005.
- [3] N. Li and J. C. Hou, "Localized fault-tolerant topology control in wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Paralle. Distrib. Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 307-320, Apr. 2006.
- [4] Y. Xiong, Q. Zhang, F. Wang, and W. Zhu, "Power assignment for throughput enhancement (PATE): A distributed topology control algorithm to improve throughput in mobile ad-hoc networks," *IEEE 58th VTC 2003-Fall*, vol. 5, pp. 3015-3019, Oct. 2003.
- [5] W. Tao, C. Chen, B. Yang, and X. Guan, "Adaptive topology control for throughput optimization in wireless sensor networks," *12th IEEE Int. Conf. Commun. Technol. (ICCT)*, pp. 1299-1302, Nanjing, Nov. 2010.
- [6] Y. Gao, J. C. Hou, and H. Nguyen, "Topology control for maintaining network connectivity and maximizing network capacity under the physical model," *IEEE INFOCOM*, pp. 1013-1021, Phoenix, AZ, Apr. 2008.
- [7] S. K. Oh and E. B. Goldsmith, "The better manuscript preparation for speedy publication," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 39, no. 12, pp. 817-821, Dec. 2014.
- [8] J.-I. Kong, J.-H. Lee, J. Kang, and D.-S. Eom, "Energy efficient clustering algorithm for surveillance and energy efficient clustering algorithm for surveillance," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 37, no. 11, pp. 1172-1183, Nov. 2012.
- [9] M. Youn, H. E. Jeon, S.-G. Kim, and J. Lee "An energy efficient topology control algorithm using additional transmission range considering the node status in a mobile wireless sensor network," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 37, no. 9, pp. 767-777, Sept. 2012.
- [10] IEEE Standard for information technology - Telecommunications and information exchange between systems. (2006), *PART 15.4:Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS): Amendment to add alternate PHY (Amendment of IEEE Std 802.15.4)*, IEEE Std P802.15.4a/D6.
- [11] IEEE Recommended Practice for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements (2003), *Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks With Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands*, IEEE Std 802.15.2-2003.
- [12] M. Tang, J. Bai, J. Li, and Y. Xin, "Distributed optimal power and rate control in wireless sensor networks," *The Scientific World J.*, vol. 2014, no. 580854, p. 8, 2014.
- [13] M. A. Kafi, D. Djenouri, J. B. Othman, A. Ouadjaout, M. Bagaa, N. Lasla, and N. Badache, "Interference aware congestion control protocol for wireless sensor networks," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 37, pp. 181-188, 2014.

윤명준 (Myungjune Youn)



2005년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2007년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 석사
2014년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학과 박사
2014년 9월~현재 : LG전자

<관심분야> Ubiquitous Sensor Network, M2M

김 석 규 (Seog-gyu Kim)



1990년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 공학사

1992년 8월 : 연세대학교 전자
공학과 공학석사

1997년 8월 : 연세대학교 전자
공학과 공학박사

1997년 9월~2004년 3월 : SK
텔레콤 선임연구원

2004년 3월~2006년 3월 : 연세대학교 전기전자공학
부 연구교수

2006년 4월~현재 : 안동대학교 공과대학 정보통신공
학과 교수

<관심분야> Wireless Sensor Network, 유,무선 통
합망에서 QoS Architecture, TCP 성능 분석, 이
동통신, IoT

이 재 용 (Jaiyong Lee)



1977년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업

1984년 5월 : IOWA State Uni-
versity 석사

1987년 5월 : IOWA State Uni-
versity 박사

1987년 6월~1994년 8월 : 포항
공과대학 교수

1994년 5월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

<관심분야> Protocol Design for Wired/Wireless
QoS Management, Ubiquitous Sensor Network,
Wireless Multihop Network