

# 센서네트워크 수명 연장을 위한 에너지 임계값 기반 다단계 Back-Pressure 알고리즘

정회원 정대인\*

## A Back-Pressure Algorithm for Lifetime Extension of the Wireless Sensor Networks with Multi-Level Energy Thresholds

Daein Jeong\* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 센서네트워크의 수명 연장을 위해 에너지 인지 기반의 경로 제어 방안인 TBP(Threshold based Back-Pressure) 알고리즘을 제안하였다. 센서네트워크 수명 연장을 위해서는 에너지의 고른 소비가 필수적이므로, 라우팅 영역 전체에 걸친 고른 트래픽 분배를 설계목표로 갖는다. TBP 알고리즘은 지역적 트래픽 분배와 라우팅 영역 전체에서의 트래픽 분배를 모두 수행한다. 임계값과 back-pressure 신호가 이 두 가지 스케일의 트래픽 분배 수행을 위해 정의되었다. TBP 알고리즘은 라우팅 영역에 속한 다중경로의 최적 활용을 목적으로 하지만 이를 위해 사용하는 임계값과 back-pressure 신호는 한 홉 범위의 지역적 정보로 정의함으로써 망 규모에 제한받지 않는 확장성을 확보하였다. TBP 알고리즘이 에너지 소비를 분산시키는 효과, 즉 네트워크 수명을 연장하는 효과를 가지고 있음을 다양한 실험을 통하여 확인하였다. 또한, TBP 알고리즘은 엄격한 경로 제어를 기반으로 설계되었음에도 지연 및 전송률 지표에서 개선된 결과를 보였다. 에너지 인지 기반의 경로 제어가 트래픽 혼잡 제어의 효과를 부분적으로 갖고 있음을 보여주는 결과이다.

**Key Words** : Wireless sensor networks, Lifetime, Threshold, Energy-awareness, Back-pressure

ABSTRACT

This paper proposes an energy-aware path management scheme, so-called the TBP(Threshold based Back-Pressure) algorithm, which is designed for lifetime extension of the energy-constrained wireless sensor networks. With the goal of fair energy consumptions, we extensively utilize the available paths between the source and the sink nodes. The traffic distribution feature of the TBP algorithm operates in two scales; the local and the whole routing area. The threshold and the back-pressure signal are introduced for implementing those operations. It is noticeable that the TBP algorithm maintains the scalability by defining both the threshold and the back-pressure signal to have their meanings locally confined to one hop only. Throughout several experiments, we observe that the TBP algorithm enhances the network-wide energy distribution, which implies the extension of the network lifetime. Additionally, both the delay and the throughput outcomes show remarkable improvements. This shows that the energy-aware path control scheme holds the effects of the congestion control.

\* 이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음.(KRF-2006-521-D00312)

\* 한국의국어대학교 전자정보공학부 디지털정보공학과(djeong@hufs.ac.kr)

논문번호: KICS2008-08-340, 접수일자: 2008년 8월 11일, 최종논문접수일자: 2008년 11월 11일

## I. 서 론

무선통신기술과 소자기술의 발전으로 무선센서네트워크(WSN)의 광범위한 응용이 기대된다. 이에 따라 다양한 환경에서 최적의 효율성을 확보하기 위한 무선센서네트워크의 설계와 운용 연구가 활발히 진행되고 있다. 무선센서노드들은 프로세싱 성능, 에너지, 메모리 제한 등 여러 가지 물리적 특성에 제한을 받으므로, 이러한 제한적 요소들과 더불어 운용 환경의 특수성 까지 고려한 효율적인 네트워크 운용 기술 정립이 센서네트워크 기반 서비스 전개를 위해 필수적이다<sup>[1]</sup>. 본 연구는 그러한 제한적 요소 중 에너지 사용의 효율성 개선에 초점을 둔다.

무선센서네트워크의 일반적인 운용 환경에서는 각 노드의 에너지 자원 재충전이 어렵거나 불가능하므로 에너지 효율적인 기능 구현이 요구된다. 특히, 네트워크 내에서 생성된 데이터가 싱크 노드로 집중되는 센서네트워크 고유의 트래픽 특성을 고려할 때, 싱크 노드에 인접한 노드들에서 에너지가 집중적으로 소비되는 현상에 대처하기 위한 방안이 필요하다. 이들 노드들은 싱크 노드로의 경로 구성에 필수적이며, 따라서 이들 노드들의 에너지 고갈은 센서네트워크의 **partitioning**을 초래하게 된다. **Energy hole**로 불리는 이러한 문제는 여러 연구에서 다루어졌다<sup>[3][4][5]</sup>. 전력 제어, 밀도 제어, 또는 계위적 망 구성 등 접근 방법은 서로 다르지만 전체 노드들 간에 에너지 소비율을 균등하게 유지하고자 하는 공통된 목표를 갖고 있다. 이와 같은 에너지의 고른 소비를 유도하기 위해서는 네트워크 전반에 걸쳐 트래픽을 광범위하게 분산시키는 것이 필요하다. 데이터 소스 노드로부터 싱크노드로의 가용 경로들을 최대한 활용하여 트래픽을 분산시킴으로써 싱크 노드에 인접한 노드들 간의 트래픽 분산을 유도할 수 있다. 이러한 다중 경로의 활용이 에너지 상태 정보를 참조하여 구현될 때 효율적 에너지 분산 효과를 기대할 수 있다.

이러한 분석에 기초하여 본 연구에서는 에너지 정보를 활용한 다중 경로의 최적 운용 방안을 설계한다. 다중 경로 상에 트래픽을 분산시킴으로써 에너지 소비율이 고르게 분포되도록 하여 특정 노드에서의 에너지 소비 집중을 완화하고, 결과적으로 네트워크 수명을 최대화하는 것이 본 연구의 목표이다. 설계 과정에서 중요하게 고려한 점은 확장성(**scalability**)이다. 소요되는 에너지 정보의 범위와

이를 이용하여 트래픽 분산을 수행하는 기능 구현이 네트워크의 규모에 무관하도록 설계하는 것이다. 이를 위해, 각 노드가 이웃한 노드들의 에너지 상태 정보, 즉 지역 정보에만 의존하여 독립적으로 동작하는 분산제어 구조를 갖도록 하였다. 아울러 이와 같은 분산제어 구조이면서도 그 제어가 미치는 영역은 데이터 소스 노드로부터 싱크 노드 사이의 모든 가용 경로를 포함하는 전체 라우팅 영역이 되도록 하였다. 이러한 특징이 가능하도록 본 연구에서는 다음과 같은 두 가지의 기본 개념을 적극 활용하였다. 첫째, 싱크 노드를 목적으로 하는 라우팅 영역은 모든 경로들의 기점인 데이터 소스 노드에서 가장 넓게 정의되므로, 트래픽 분산효과를 극대화하기 위해서는 소스 노드가 트래픽 분배의 기점이 되도록 한다. 둘째, 노드 간 에너지 소비를 보다 정밀하게 균등화하기 위해서는 에너지 상태를 여러 단계로 나누어, 트래픽 분배 제어를 통한 에너지 소비 균일화가 단계별로 반복 수행되는 것이 필요하다. 즉, 초기 에너지 값의 일정 비율이 소비되는 구간을 한 단계로 정의하고, 노드들의 에너지 소비가 균일하게 이루어진 것이 확인될 때 다음 단계로 진행하는 것이다. 위 두 개념을 통합적으로 실현하는 방안으로 본 연구에서 택한 방법은, 소스 노드에서의 에너지 소비 단계 변환에 의해 전체 라우팅 영역에서의 에너지 소비 단계 변환이 동기 되도록 하는 것이다. 이를 위해, 각 노드별로 유지 관리하는 임계값 변수와 인접 노드 간의 **back-pressure** 신호를 정의하였다. 임계값은 인접 노드들 간의 에너지 소비 균형을 맞추는 과정에 활용되고, **back-pressure** 신호는 노드와 자신이 속한 경로 상의 **upstream** 노드들 사이에서 필요한 경로 제어를 위해 사용된다. 임계값과 **back-pressure** 신호는, 본 제안 방식이 분산 제어 구조이면서도 소스 노드에서 싱크 노드에 이르는 단대단(**end-to-end**) 라우팅 영역을 하나의 제어 영역으로 다룰 수 있게 하는 주요 요소들이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 연구와 관련된 기존 연구내용을 살펴본다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 **TBP(Threshold-based Back-Pressure)** 알고리즘, 즉 임계값을 기반으로 **back-pressure** 신호를 사용하여 단계별 에너지 소비 균등화를 수행하는 방안을 소개하였다. IV장에서는 다양한 실험을 통하여 제안된 방안의 특성 및 성능을 구체적으로 확인하였고, V장에서는 결론을 다루었다.

## II. 관련 연구

센서네트워크에서 에너지 소비가 불균형적으로 이루어지는 현상은 네트워크의 효율성 향상을 위해 개선되어야 할 문제이다. 특히 주어진 환경에 따라서는 energy hole 발생으로 인한 네트워크 분리를 야기할 수 있다는 점에서 중요하게 다루어야 한다.

Bhardwaj<sup>[2]</sup>는 센서네트워크 수명에 대한 해석적 모델을 유도하였다. 특정 소스 노드로부터 데이터를 수집하는 네트워크 모델에서 소스 노드와 싱크 노드 간의 최적의 홉의 개수를 매개로 하여 네트워크 수명의 상한을 제시하였다. 주어진 거리를 전송하기 위해 필요한 경로 별 최소 에너지 산출 방법을 보였지만, 네트워크에서 불균등한 에너지 소비 패턴이 고려되지 않았다. Mohapatra<sup>[3]</sup>는 energy hole 발생 배경에 대한 해석적 분석 틀을 제시하였다. 균일한 밀도를 갖는 센서네트워크를 전제하고, 싱크 노드를 제외한 모든 노드들에서 주기적으로 데이터가 생성되어 싱크 노드로 전송되는 환경에서 싱크노드로부터의 거리(홉)를 변수로 하는 각 노드의 부하를 구하였다. 이를 이용하여 노드별 에너지 소비율(ECR: Energy Consuming Rate)이 싱크 노드에 근접해 갈수록 지수적으로 증가함을 보였다. 이와 같이 energy hole 문제는 부하의 집중이 주요 요인이며, 따라서 노드 간 부하 분산이 필요하다. Wu<sup>[4]</sup>는 네트워크 내의 각 노드가 감당하는 트래픽 부하가 노드의 위치에 관계없이 균일하도록 설계함으로써 energy hole 문제를 해결하는 방안을 제시하였다. 즉, 부하가 증가하는 싱크 노드 주변 영역에는 노드 밀도를 크게 하여 결과적으로 노드별 부하를 균등하게 하는 방법이다. 싱크 노드를 중심으로 균일한 폭(노드의 전송 거리)을 갖는 링 형태로 전체 망 영역을 분할하고 각 링의 노드 밀도 관계식을 유도하였다. 싱크 노드로 근접할수록 지수적으로 밀도가 증가해야함을 보였다. 이는 [3]에서 보인 ECR의 변화 패턴과 일치하는 결과이다. Olariu<sup>[5]</sup>는 밀도는 균일하게 유지하면서 각 노드의 전송 범위를 달리하는 방안을 제시하였다. 부하가 큰 영역의 노드는 전송 거리를 작게 하여 단위 데이터 당 에너지 소비를 줄이는 방식이다. 이는 [4]의 네트워크 형상에 비추면, 싱크 노드에 가까운 링일수록 링의 폭이 감소하는 것과 같다. 위 두 방법 모두 네트워크 토폴로지의 조절을 통해 노드별 균일한 에너지 소비를 갖도록 하는 것으로, 센서네트워크가 설치되는 다양한 환경을 고려할 때 접근의 용이성 여부에

의한 제한을 극복하기 어렵다. 또한 싱크 노드를 제외한 모든 노드들이 데이터를 생성하는 환경만을 전제 한 분석이므로 적용의 제한이 있다.

에너지 상태 정보를 활용한 트래픽 제어를 통해서 에너지 소비의 불균형성을 극복하고자 하는 연구도 활발히 이루어지고 있다. 토폴로지를 조절하는 방법과는 달리 주어진 네트워크 환경에서 라우팅을 활용한 접근 방법이다. 다양한 형태로 정의된 비용을 경로별로 산출하고, 각 노드에서는 이를 참조한 라우팅이 수행된다. 애드 혹 네트워크에서 에너지 인지 기반의 라우팅 방안을 연구한 내용으로서 센서네트워크에 활용이 가능한 주요 방안을 Toh<sup>[6]</sup>의 연구에서 볼 수 있다. [6]에서 제안된 CMMBCR 방식은 각 노드 수명의 최대화와 에너지 소비의 균등화를 동시에 고려한 라우팅이다. 경로별 각 노드의 에너지 상태를 참조하여 경로별 비용과 병목 노드를 동시에 고려한 라우팅 선택을 한다. Shah<sup>[7]</sup>는 센서네트워크에서의 에너지 인지 기반 라우팅(EAR: Energy Aware Routing)을 제안하였다. 에너지 상태를 반영한 메트릭에 근거하여 다중 경로 간에 트래픽을 확률적으로 분산하는 방식이다. 싱크 노드는 필요할 때 flooding 메시지를 사용하여 데이터 소스 노드까지의 경로를 구성하는데, 이 때 가능한 경로들을 대상으로 경로별 에너지 메트릭을 산출한다. 데이터 전송을 위해 각 노드에서 싱크 노드 방향으로의 가용 경로들 중에서 에너지 메트릭을 기반으로 확률적인 선택을 한다. 즉, 경로별 가용 에너지양에 비례하는 확률적 선택을 기반으로 라우팅이 이루어진다. 이 방식은 구성된 경로별 에너지 메트릭의 refresh를 위하여 주기적으로 flooding에 의존하며, 이는 에너지 소비의 주요 요인이 된다. 위 두 방식은 경로별 비용 정보에 기반을 두고 있다.

센서네트워크의 일반적인 환경을 고려할 때 라우팅은 토폴로지에 종속되지 않고, 경로 기반의 비용을 참조하기 보다는 각 노드가 인접 지역 내에서 확보된 정보만을 활용하는 방식이 적합하다고 본다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 임계값 변수와 back-pressure 신호를 정의하여 다중 경로 상에서의 트래픽 분산을 적극적으로 유도하는 기능을 갖춘 경로 제어 알고리즘을 제안한다. [6],[7]과는 달리 지역적 정보를 기반으로 트래픽 분배가 이루어지며, 임계값과 back-pressure 신호는 경로 제어 기능이 전체 라우팅 영역을 대상으로 수행되도록 하는데 활용된다.

### Ⅲ. 임계값 기반 다단계 경로 재구성

#### 3.1 센서네트워크 모델링

다음과 같은 무선센서네트워크를 가정한다. 동일한 기능을 갖는 다수의 센서노드들과 하나의 싱크 노드로 이루어지며, 모든 노드들은 중복되지 않는 고유 ID를 갖는다. 자가 구성 기능을 통해 각 노드는 자신과 자신의 이웃 노드들에 대한 정보를 확보한다. 이를 기반으로 주기적 또는 이벤트 감지에 따르는 데이터를 생성하고, 생성된 데이터를 싱크 노드 방향으로 전송하며, 다른 노드의 데이터 패킷을 싱크 노드로 중계하고, 주기적으로 자신의 광고 메시지를 이웃 노드에게 전송한다.

각 노드와 직접 통신이 가능한 한 홉 거리에 있는 노드들을 이웃 노드라 하며, 그 중에서 싱크노드에 가까운 쪽으로 있는 노드들을 부모 노드로 부른다. 각 노드는 이웃테이블에 부모 노드들을 엔트리로 갖는데, 각 부모 노드에 대해 <노드 ID, 에너지, 타이머, 태그>의 네 필드를 정의한다. 에너지 인지기반의 트래픽 제어를 위해서 부모 노드들의 에너지 상태를 보유하며, 각 엔트리는 타이머에 의해 제한된 유효 기간을 갖는다. 태그 영역은, 해당 부모 노드의 일시적 사용 정지 여부를 표시한다. 제안 내용을 기술하는 과정에서 구체적으로 설명된다. 부모 노드들에 대한 정보는 광고메시지 수신을 통해 확보하게 되는데, 광고 메시지는 이웃 노드들에게만 브로드캐스팅 되는 메시지이다. 광고메시지는 <노드 ID, 에너지, back-pressure> 등의 정보를 포함한다. 송신 노드의 ID 및 에너지 잔량을 통보하며, back-pressure 영역은 임계값 운용에 관련된 정보로서 뒤에서 설명한다. 각 노드는 개별적으로 교유의 임계값을 보유, 관리 한다. 초기 임계값은 모두 일정한 상수로 동일하게 지정되며, 네트워크 운용 과정에서 각 노드별로 독립적으로 조정된다. 임계값 운용에 대해서는 다음 절에서 상세히 기술한다.

#### 3.2 임계값 운용에 따른 지역적 분배

본 논문이 제안하는 임계값 운용 방법에서 주목할 점은, 각각의 노드들이 자신의 임계값을 자신이 아닌 부모 노드들 간의 균등한 에너지 소비가 이루어지도록 하는데 사용한다는 점이다. 상세한 설명을 위하여 그림 1과 같은 네트워크를 가정한다. 편의상 데이터의 소스 노드는 한 개로 두었고, 모든 데이터의 흐름은 소스 노드에서 싱크 노드 방향으로 이루어진다. 임의의 노드에서 항상 부모 노드로만 데이

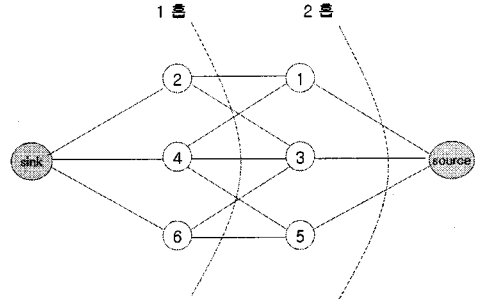


그림 1. 네트워크 예시

터가 전송되는 원칙을 고려하여 이에 해당하는 링크만을 그림에 도시하였다. 운용 도중, 노드 4의 에너지가 노드 3이 갖고 있는 임계값보다 작은 상태를 노드 3이 감지한 경우를 예로 든다. 이러한 경우 다음과 같은 과정이 순차적으로 진행된다.

- (a) 노드 3은 노드 4를 자신의 이웃테이블에서 태그 하여, 일시적으로 노드 4로의 데이터 전송을 금한다. 이후 노드 3은 모든 데이터를 노드 2 또는 6에게 전송하게 된다. 노드 1과 노드 5는 각각 자신의 임계값에 따라 노드 4의 태그 여부를 결정한다.
- (b) 네트워크 운용 중 노드 2와 노드 6의 에너지가 노드 3의 임계값 이하로 내려가면 노드 3은 자신의 가용 부모노드들이 태그 되는 상황에 이른다.
- (c) 가용한 부모노드가 없게 된 노드 3은 부모 노드를 재 확보하는 작업을 수행한다. 즉, 임계값을 일정한 규정에 의해 감소시켜 부모 노드들의 에너지를 비교하여 임계값 보다 큰 에너지를 가진 부모 노드가 있으면 그 노드의 태그를 지워 가용 부모 노드로 취한다. 임계값의 감소는 태그를 지울 수 있는 부모 노드가 확보될 때 까지 반복한다.

위 과정 (c) 에서와 같이, 임계값을 낮추어 가용 부모 노드를 재 확보하는 과정을 본 논문에서는 '라우팅 재구성'으로 부르며, 이렇게 확보된 부모 노드들을 이용하여 다시 데이터 전송을 수행한다. 새로 조율된 임계값 이하로 부모 노드들의 에너지가 감소하면 다시 라우팅 재구성을 수행한다. 이러한 동작은 에너지가 소멸될 때까지 반복되며, 이와 같이 부모 노드들 간의 에너지 소비 균등화가 각 노드에서 독립적으로 수행되는 것을 본 논문에서는 '지역적 분배'로 부른다.

### 3.3 Back-pressure 신호를 통한 경로 기반의 트래픽 분산

지역적 분배에 그치지 않고 트래픽 분산을 더욱 넓은 영역에서 이루어지도록 하기 위해, 데이터 소스 노드로부터 싱크 노드에 이르는 모든 가용 경로들 간에 트래픽을 분산시키는 것이 필요하다. 경로 간의 트래픽 분산은 모든 경로들의 루트 노드인 소스 노드에서 지역적 분산을 최대한 활용할 때 가장 효과적이다. 이는 싱크 노드에서 멀어질수록 싱크노드로의 라우팅 영역이 넓어지는 것에 근거를 둔다. 이를 위해, 본 논문에서는 위 지역적 분배 과정에 back-pressure 신호를 도입한다. Back-pressure 신호는 가용 부모 노드가 없음을 다른 노드들에게 알리기 위해 사용하며, 이를 수신한 노드는 해당 노드로의 데이터 전송을 일시적으로 제한한다. 그림 1의 예에서, 임계값을 적용하여 지역적 분배를 수행하는 방식에 더하여 back-pressure 신호를 추가하면 다음과 같다. 위 (c) 과정은 다음의 (c') 으로 대체되고 이어서 (d) 부터 (g)에 이르는 시나리오가 추가된다.

- (c') 가용한 부모 노드가 없게 된 노드 3은 부모 노드를 재 확보하는 작업을 수행하는데, 자신의 임계값과 부모 노드들의 에너지를 비교하여 임계값 보다 큰 에너지를 가진 부모 노드가 있으면(back-pressure 신호에 의해 태그 된 노드이다.) 그 노드의 태그를 지워 가용 부모 노드로 취한다. 없으면 임계값을 규정에 의해 감소시켜 다시 비교를 수행한다. 이러한 라우팅 재구성은 태그를 지울 수 있는 부모 노드가 확보될 때까지 반복한다. 동시에, 노드 3은 back-pressure 신호를 자신을 부모 노드로 인지하고 있는 모든 노드들에게 브로드캐스팅 한다.
- (d) 소스 노드는 노드 3으로부터 back-pressure 신호를 수신하였으므로 노드 3을 태그하고 이후의 모든 데이터는 노드 1 또는 5 에게 전송한다. 노드 3은 유휴 상태에 있게 된다.
- (e) 추후 노드 1과 5의 에너지가 모두 소스 노드의 임계값 이하로 내려가는 것을 감지하게 되면 소스 노드도 가용한 부모 노드가 없는 상태에 이르게 되며, 앞의 (c') 동작과 같은 라우팅 재구성을 소스 노드에서 수행한다.
- (f) 가용 부모 노드를 확보한 소스 노드는 이들에게 싱크 노드 방향으로의 패킷 전송을 재개한다.
- (g) 소스 노드로부터 데이터를 수신하게 되면 노드 3은 유휴상태에서 벗어나 이미 (c') 에서 확보

해 둔 가용 부모 노드들을 활용하여 데이터 패킷의 중계를 재개한다.

노드 3의 downstream 노드가 소스 노드가 아닌 경우 위 (d)~(e)와 같은 동작이 그 노드들에서 순차적으로 수행되며, 여기에 더하여 자신을 부모 노드로 인지하고 있는 모든 노드들에게 back-pressure 신호를 브로드캐스팅 한다. 이와 같이 단계적으로 이루어지는 downstream 노드로의 back-pressure 신호 전송이 소스 노드에 이르게 되면 (d)~(g)가 수행된다. 앞의 방식에서 달라진 점은 부모 노드가 back-pressure 신호에 의해서도 태그 된다는 점이다. 지역적 분배에 더하여 back-pressure 신호를 적용한 효과는 다음과 같다. 임계값 적용 시나리오에서는, 각 노드들에서 반복적으로 이루어지는 지역적 분배가 라우팅 재구성과 동시에 재개되었다. 이에 비하여 back-pressure 신호를 사용하는 위의 방법에서는 지역적 분배의 재개가 소스 노드에서의 지역적 분배 재개가 있을 때 까지 늦추어진다. 각 노드는 가용 부모 노드가 고갈될 경우 라우팅 재구성을 함과 동시에 자신을 부모 노드로 인지하고 있는 노드들에게 back-pressure 신호를 보낸다. 이를 수신한 노드는 해당 노드를 태그한다. 이 downstream 노드에서도 추후 라우팅 재구성이 있을 때 back-pressure 신호를 자신의 downstream 노드에게 전송하는데, 이와 같이 back-pressure 신호는 소스 노드 쪽으로 전파되어지는 방향성을 갖는다. 소스 노드에서는 라우팅 재구성 이후 자신이 생성한 데이터 패킷을 능동적으로 전송한다. 이렇게 전송되는 패킷들은, 라우팅 재구성 이후 유휴 상태에 있는 경로 상의 노드들에서 지역적 분배가 재개되도록 하는 역할을 한다. 결과적으로, 각 노드들의 지역적 분배가 소스 노드의 동작에 동기화 되어 재개되는 효과를 볼 수 있다. 지역적 분배가 단계적으로 반복되면서 에너지 소비의 단계별 균등화가 모든 가용 경로를 대상으로 이루어지게 된다.

Back-pressure 신호는 기존의 광고 메시지를 활용하여 구현한다. Back-pressure 신호 구현을 위하여 광고 메시지에 1-bit 의 back-pressure 필드를 추가하였다. Back-pressure 신호의 경우에만 그 필드를 1로 채운다. 광고 메시지는 주기적 또는 상태의 변화가 있을 때와 더불어 위 (c')의 조건이 만족될 때에 생성, 전송하도록 한다.

위 (a)~(g)의 과정을 통해 다중 경로를 제어하는 방식을 이후 TBP(Threshold-based Back-Pressure)

```

    || A가 B로부터 광고메시지 수신||
    A의 라우팅 테이블에서 노드 B 에너지 update;
    if((back-pressure==1)||(energy_B<threshold_A))
        B를 A의 라우팅 테이블에서 태그함;
        if(가용 부모 노드 부재)
            ||라우팅 재구성 및 back-pressure 신호 전송||
            back-pressure 신호 생성 및 전송;
            for(모든 부모 노드 PA 에 대해)
                if(energy_PA>threshold_A)PA 태그 지움;
            while(가용 부모노드부재) ||부모노드 확보||
                threshold_A 조정; ||임계값 하향 조정 ||
            for(모든 부모 노드 PA에 대해)
                if(energy_PA>threshold_A)PA 태그지움;
        end if
    end if

```

그림 2. TBP 알고리즘에서 광고 메시지 수신 시 처리 과정

알고리즘으로 부르며 그림 2에 정리하였다. 광고 메시지가 수신되었을 때의 동작으로 기술하였다. 편의상 수신 노드는 A, 송신 노드는 B로 나타내었다. 이미 A의 이웃 테이블에 B 항목이 있는 경우를 가정하였으며, 그렇지 않은 경우 우선 A의 이웃 테이블에 B를 추가한 후 아래 알고리즘을 적용한다.

소스 노드가 라우팅 재구성 이후 다시 라우팅 재구성을 수행하기까지의 시간 구간을 생각하자. 이 시간 구간 동안 경로 상의 모든 노드에서는 지역적 분배가 개별적으로 이루어진 후 각각 라우팅 재구성에 따르는 유휴 상태에 이르게 된다. 이로부터, 소스 노드에서의 라우팅 재구성은 전 라우팅 영역에서의 지역적 분배를 재개시키는 역할을 하는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 시간 구간을 하나의 단계로 구분 짓는다. 이 단계가 반복되면 에너지 소비의 균등화가 반복되는 것을 의미하므로 보다 정밀한 균등 분배를 기대할 수 있다.

단계 설정은 초기 임계값 설정과 임계값 재조정 규칙에 의존한다. 임계값 운용 방식은 운용자의 의도에 따라 다양하게 정의될 수 있다. 본 논문에서는 4장에서 TBP 알고리즘에 관한 실험을 수행할 때 다음과 같은 임계값 운용 방식을 적용하였다. 초기 에너지를  $E_0$ , 임계값 파라미터를  $A(0 \leq A < 1)$ , 단계  $i(\geq 1)$ 에서의 임계값을  $T_i$ 로 두면 다음과 같은 관계를 갖도록 한다.

$$T_i = A^i E_0 \quad (1)$$

즉, 초기 임계값은  $A E_0$ 가 되고, 각 노드는 라우

팅 재구성 시 임계값을 조정할 때 현재 임계값의 A 배로 조정한다.  $A=0$ 이면 임계값을 적용하지 않은 경우이며, 따라서 라우팅 재구성도 없다. 4장에서 최적의 A 값을 실험을 통하여 제시하였다.

소스 노드가 두 개 이상인 상황에서는 소스별로 설정되는 다중 경로가 중첩될 수 있는데, 이러한 중첩 영역에 속한 노드는 여러 개의 소스 노드 중 라우팅 재구성을 마친 후 처음 도착하는 패킷의 소스 노드에 의해 트래픽 전송 기능이 재개된다. 이 경우에도 각 소스 노드가 갖는 라우팅 영역 내에서 해당 소스로부터의 트래픽에 대해서는 단계별 지역적 재분배가 유지된다. 4장에서는 단일 소스 노드뿐 만 아니라 복수의 소스 노드를 가진 네트워크에 대한 실험을 통해서 TBP 알고리즘의 타당성을 확인한다.

### 3.4 네트워크 수명 분석

TBP 알고리즘에 의한 네트워크 수명 연장에 대한 분석은 다음과 같다. 설명을 간단히 하기 위해 그림 3(a)와 같은 단순한 네트워크를 가정한다. 소스 노드로부터 싱크 노드로의 경로는 두 개이며 각각 노드 a와 b를 경유한다. 각 노드의 에너지 소비율(ECR)은 다루는 패킷의 양에 비례하는 것으로 가정한다. 소스 노드에서의 임의의 라우팅에 의한 노드 a와 b의 에너지 소비율을 각각  $r_1$ 과  $r_2$ 로 두고  $r_1 > r_2$ 를 가정한다. 각 노드의 초기에너지는  $E_0$ 이고, 단계  $i$ 에서의 임계값은  $A^i E_0$ 이다. 그림 3(b)에 초기 시점부터 에너지가 소비되는 패턴을 도시하였다.  $r_1 > r_2$ 이므로, 네트워크 동작 개시 후 노드 a가 먼저 라우팅 재구성을 경험하게 되고 동시에 back-pressure 신호를 전송함으로써 소스 노드로부터의 데이터가 차단되고, 이후 노드 b는 자신의 라우팅 재구성시점까지  $r_1 + r_2$ 의 ECR을 갖는다. 이후 노드 b에서 라우팅 재구성이 발생하면 동시에 소스 노드에서도 라우팅 재구성이 수행되며 이는 다음 단계의 시작을 의미한다. TBP 알고리즘이 적용되지 않으면 그림 3(a)의 네트워크 수명은 감소율  $r_1$ 을 갖는 노드 a의 에너지 커브에 의해 결정된다. 그러나 TBP 알고리즘이 적용되면 소스 노드에서 라우팅 재구성 과정을 통해 노드 a와 b의 에너지 균형을 맞추게 되므로 노드 a의 에너지 커브는 그림 3(b)에서 보인 바와 같이 매 단계마다 오른쪽으로 shift된다. 이는 노드 a의 에너지 고갈 시점이 늦추어지는 효과를 가져 오며, 따라서 네트워크 수명은 연장된다. 그림 3(b)에 따르면, 단계  $i$ 의 시작부터 노드 a와 b의 라우팅 재구성이 발생하기까지 소

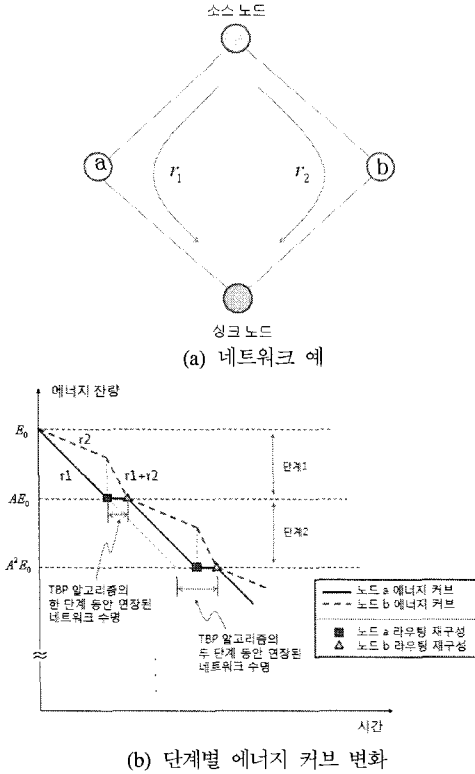


그림 3. TBP 알고리즘 적용 시 에너지 커브의 변화 예시

요된 시간을 각각  $R_a^i$ ,  $R_b^i$  라 두면 다음과 같다.

$$R_a^i = A^{i-1}(1-A)E_0 \frac{1}{r_1}$$

$$R_b^i = A^{i-1}(1-A)E_0 \frac{2}{r_1+r_2}$$

이 때, 병목 노드인 노드 a의 에너지 커브가 단계  $i$  에서 shift 된 양을  $L_i$ 로 두면 다음과 같다.

$$L_i = R_b^i - R_a^i$$

$$= A^{i-1}(1-A)E_0 \frac{r_1 - r_2}{(r_1+r_2)r_1}$$

위 내용을 확장하여, 임의의  $n$  개 부모 노드를 갖는 노드에서  $L_i$ 를 다음과 같이 정의하자. 즉, 단계  $i$  에서 부모 노드 중 가장 먼저 라우팅 재구성이 발생하는 시점과 가장 나중에 라우팅 재구성이 발생하는 시점 간의 차이를  $L_i$ 로 정의한다. 간단한 계산을 통해  $L_i$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$L_i = A^{i-1}(1-A)E_0 \frac{nr_{\max} - \sum_{j=1}^n r_j}{r_{\max} \sum_{j=1}^n r_j} \quad (2)$$

여기서  $r_{\max} = \max\{r_i : 1 \leq i \leq n\}$  이다.  $L_i$ 를 달리 해석하면,  $n$  개의 부모 노드 중 병목 노드(ECR =  $r_{\max}$  인 노드)의 에너지 커브가 단계  $i$  에서 shift되는 양을 나타내며, 따라서 네트워크 수명도 그만큼 증가하게 된다.

#### IV. 실험 및 결과

##### 4.1 실험 환경

제안된 TBP 알고리즘의 검증을 위한 실험은 자체 개발한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 수행하였다. TBP 알고리즘의 에너지 효율성 확인에 집중하기 위하여, 각 노드에서의 라우팅 선택은 단순한 round robin을 적용하였다. 이는 가용 부모 노드 중에서 순환적으로 라우팅을 선택하는 방식이다.

TBP 알고리즘이 적용되면 가용 부모 노드 군이 에너지 상태에 따라 변하게 된다. 모든 노드는 동일한 초기 에너지를 가지며, 일정한 주기로 데이터를 생성한다. 또한 모든 노드는 다른 노드들의 데이터를 싱크 노드로 중계하는 기능을 갖는다. 각 노드는 네트워크 초기화 과정에서 확보한 이웃 정보를 이용하여 라우팅 테이블을 완성한다. 이웃 노드 중에서 자신보다 싱크 노드에 가까운 노드만을 가용 부모 노드로 분류함으로써 loop-free 경로 구성을 가능하게 한다. 이후 자신의 정보를 이웃 노드들에게 알리기 위한 광고 메시지를 주기적으로 전송하여 네트워크 구성을 유지한다. 실험에서 시간은 슬롯 단위로 나누며 하나의 슬롯은 데이터 패킷의 한 홉 전송 시간으로 정의한다. 모든 실험은 10회 이상 반복하여 수행하였다. 표 1에 보인 실험 관련 변수들 중 에너지 모델은 참고문헌 [8]에 따랐다. 네트워크 수명은, 네트워크 가동 시점부터 에너지가 고갈되는 첫 번째 노드가 발생하는 시점까지 경과된 슬롯 개수로 정의하였다.

표 1. 실험 파라미터 값

파라미터	설정 값
무선통신거리	110m
재전송 허용회수	7회
충돌 시 최대 backoff 기간	5 slots
센서노드 내 이웃테이블 용량	16 entries
센서노드 내 버퍼 용량	4 패킷
수신회로 구동 에너지	50nJ/bit
송신회로 구동 에너지	100pJ/bit/m <sup>2</sup>
채널 감지회로 구동 에너지	50nJ/bit

### 4.2 임계값 설정 실험

본 절의 실험에서는 우선 임계값에 대한 네트워크의 반응을 관찰하기 위해 식 (1)의 다양한  $A$  값에 대하여 관측한다. 그림 4와 같은 20노드x10노드의 격자형 토폴로지를 가정하였다. 격자의 한 변은 50m이다. 격자점마다 센서 노드가 위치하며 각 센서 노드의 전송 거리는 110m이다. 싱크 노드는 그림 4와 같이 한 개를 가정하였다. 소스 노드의 위치에 따르는 초기 임계값의 영향을 관측하기 위해 소스 노드를 싱크 노드로부터 2홉~15홉의 거리에 설정하여 각각 실험을 수행하였다. 그림 4에서 검은색 노드들이 소스 노드이며 싱크 노드로부터의 홉 거리를 숫자로 표기하였다. 각 실험에서는 한 개씩만 활성화하여 싱크 노드와의 거리에 따라 다양한 초기 임계값  $A$ 가 미치는 영향을 확인하였다. 활성화된 소스 노드는 50 slot 마다 한 개의 데이터 패킷을 생성하여 싱크 노드 방향으로 전송한다.

그림 5에서 실험 결과를 보였다. 소스 노드와 싱크 노드와의 간격이 2홉부터 15홉에 이르는 각각의

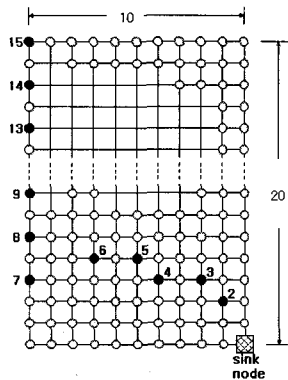


그림 4. 격자형 망에서 싱크 노드와 소스 노드의 구성도

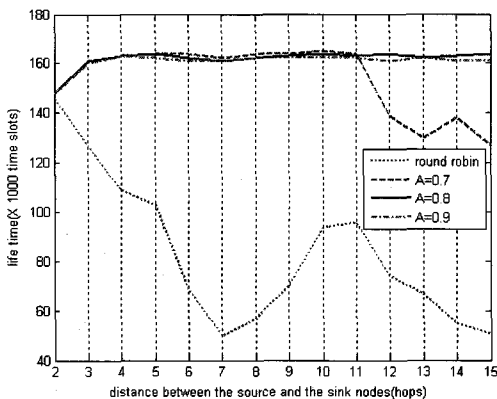


그림 5.  $A$ 값과 데이터 경로의 거리에 따르는 망 수명 비교

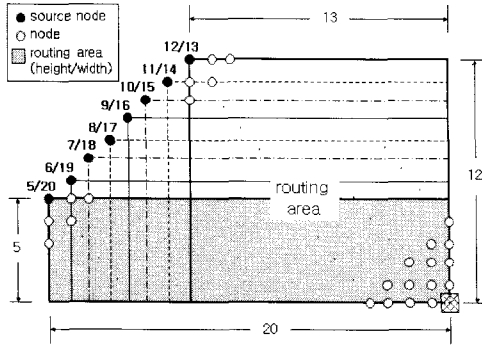
환경에서 갖는 네트워크 수명을 보였다.  $A$  값과는 무관하게 라우팅은 가능한 부모 노드 중에서 round robin 형태로 선택이 되므로 임계값이 0인 경우는 TBP 알고리즘이 적용되지 않은 단순한 round robin 방식이다. 이 경우를 본 논문에서는 이후 모든 실험에서 round robin 방식으로 부른다. 그림 5에서는 round robin 방식과 더불어 0.7 이상의  $A$  값에 대한 결과들을 도시하였다.  $A$  값이 작으면 라우팅 재구성이 개시되는 시점이 에너지가 많이 소비된 이후로 늦추어지며, 따라서 TBP 알고리즘의 효과는  $A$ 가 비교적 큰 값에서 명확히 확인된다.

그림 5에서 보듯이, round robin 방식( $A=0$ )에 비해 TBP 알고리즘을 적용하는 경우 네트워크의 수명이 상당히 개선되었다.  $A$  값에 상관없이 동일한 round robin 방식의 라우팅이 이루어지는 점을 고려하면, TBP 알고리즘의 에너지 인지 기반 다중 경로 운용 방식이 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

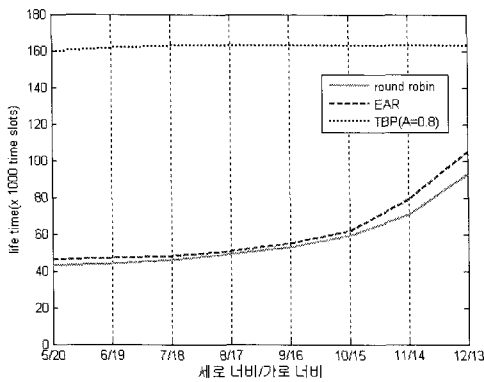
그림 5에서 주목할 점은 네트워크 수명이 소스 노드의 위치에 따라 받는 영향이다. 그림 4에서 서로 다른 소스 노드들은 싱크 노드로부터의 거리뿐만 아니라 라우팅 영역을 서로 달리 갖는다. 예를 들면, 7홉을 갖는 노드는 9홉을 갖는 노드에 비해 라우팅 영역이 작아 적은 개수의 가능 경로를 갖게 된다. 11홉 노드의 경우 라우팅 영역은 정방형에 가까우며, 따라서 round robin 방식에서도 상대적으로 많은 가능 경로를 활용할 수 있어 네트워크 수명이 증가되는 것을 그림 5에서 볼 수 있다. 반면에 TBP 알고리즘에서는 이러한 영향이 감소하는 것을 보인다. 특히,  $A$ 가 0.8인 경우 소스 노드와 싱크 노드의 거리에 무관하게 항상 일정한 최적의 네트워크 수명을 유지하고 있다. 이는 제안된 TBP 알고리즘의 성능이 네트워크 토폴로지에 영향 받지 않는 범용성을 갖추고 있음을 보여주는 결과이다. 그러한 범용성은 다음의 실험에서 더욱 명확하게 확인된다.

두 번째의 실험에서는 위에서 언급한 범용성을 확인하기 위하여, 소스 노드와 싱크 노드간의 거리(홉)는 일정하게 유지시키며 두 노드간의 라우팅 영역을 다양하게 변화시켜가며 네트워크 수명을 확인하는 실험을 수행하였다. 그림 6 (a)에서 실험 환경을 보인다. 센서 노드의 배치는 그림 4와 같은 격자형 네트워크와 동일하다. 검은 색 소스 노드들은 모두 싱크 노드로부터 12홉 거리에 위치하고 있다는 공통점을 갖는 반면 싱크노드의 라우팅 영역은 모두 다르다. 그림 6 (a)에서 각 소스 노드들과 싱크 노드를 꼭지점으로 하는 사각형의 라우팅 영역





(a) 라우팅 영역과 해당 소스 노드



(b) 라우팅 영역 대비 네트워크 수명

그림 6. 라우팅 영역이 네트워크 수명에 미치는 영향

들을 도시하였으며, 각 영역별 소스 노드는 세로길이/가로길이 값으로 표기하였다. 라우팅 영역이 정방향에 가까울수록 이 값은 1에 접근한다. TBP 알고리즘에서 A 값은 앞의 실험에서 확인된 최적 값 0.8을 적용하였다. 아울러 이 실험에서는, 본 제안과의 향후 비교로 활용하고자 하는 EAR<sup>[7]</sup> 방식의 실험도 동시에 수행하여 그 결과를 비교하였다. 그림 6 (b)에 실험 결과를 도시하였다. 그림 6 (b)에서 가로축은 라우팅 영역의 세로길이/가로길이 값을 나타내며 세로축은 네트워크 수명을 표시한다. Round robin과 EAR 방식에서는 라우팅 영역의 변화에 대해 네트워크 수명이 크게 영향 받는 것을 볼 수 있는 반면, 제안된 TBP 방식에서는 라우팅 영역과는 무관하게 일관된 수명이 지속적으로 유지되고 있는 점이 확인된다. 또한 그림 5의 실험결과와 마찬가지로 네트워크 수명에서도 TBP 알고리즘의 우수성이 확인된다. 그림 5의 결과와 더불어 이번 실험 결과로부터 TBP 알고리즘이 네트워크 토폴로지에 독립적인 매우 유용한 네트워크 수명 연장 방안임이 확

인된다. EAR 방식은 경로별 비용을 기반으로 확률적인 라우팅을 수행하는 에너지 인지 기반의 라우팅 방식으로서, 한 개의 소스 노드가 있는 본 실험 환경에서는 round robin 방식에 비해서 약간의 성능 개선만을 보여주고 있다.

이후의 실험에서는, TBP 알고리즘에서 확인된 네트워크 수명 연장이 에너지 소비의 고른 분포의 결과임을 확인하고, 더 나아가 TBP 알고리즘의 지연 및 전송률 성능지표를 관측한다. 실험은 단일 소스 노드인 경우와 특정 지역에 분포된 다수의 소스 노드의 경우에 대해 각각 수행하며, 앞선 실험 결과에 근거하여 향후 모든 실험에서 TBP 알고리즘의 A 값은 0.8로 두었다.

### 4.3 단일 소스 노드 실험

이번 실험에서는 라우팅 영역 전반에 걸친 에너지 소비 패턴 특성을 확인한다. 우선 단일 소스 노드 환경에서 수행하고 이후 소스 노드의 개수를 증가시키면서 에너지 소비의 균등성을 확인한다. 앞의 실험들과 마찬가지로 격자형 토폴로지를 갖는 망에서 수행하였으며, 전체 망의 구성은 그림 7에 보였다. 400개의 노드가 950m x 950m 영역 내에 격자형으로 분포되어 있고, 각 노드의 전송 범위는 110m 이다. 싱크 노드는 아래 변 한 가운데에 위치하며, 소스 노드는 싱크노드로부터 가장 멀리 떨어져 있는(15 홉) 그림 7의 노드 a로 설정하였다. TBP 방식과 더불어 round robin, 그리고 EAR 방식도 비교를 위하여 병행 실험하였다. 방식별 에너지 소비 특성에 초점을 두기 위해 망 구성은 고정된 것으로 가정하여 주기적 광고 메시지 전송은 생략하고 각 방식별 기본적인 오버헤드만 고려하였다. 따라서, round robin 방식의 경우 에너지 정보를 필

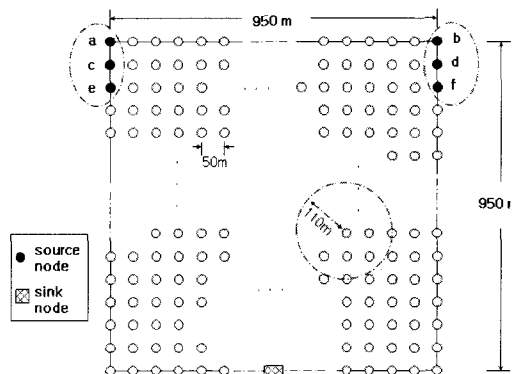


그림 7. 실험을 위한 격자형 토폴로지

요로 하지 않으므로 별도의 오버헤드는 없다. 반면, TBP 알고리즘의 경우에는 이웃 노드의 에너지 정보가 필요하므로, 본 실험에서는 특정한 양 만큼의 에너지가 감소되는 시점마다 이웃 노드들에게 광고 메시지를 전송하는 방식을 적용하였는데, 그 양은 초기 에너지의 1/25에 해당하는 값으로 하였다. A 값이 0.8일 때 20번째 단계에서의 임계값은 초기 에너지의 1% 정도이며, 그 단계에 이르기 까지 25회에 가까운 광고메시지가 제공되므로 적절한 설정이다. EAR 방식의 경우에는 경로별 비용 refresh가 주기적으로 수행되어야 하는데, 본 실험에서는 10,000 타임 슬롯마다 refresh 되도록 하였다. 소스 노드는 50 slot 마다 한 개의 데이터 패킷을 생성한다. 각 노드의 초기 에너지는 0.5J 로 두었고 그 외의 실험에 쓰인 파라미터 및 설정 값들은 앞의 표 1과 같다.

실험이 종료된 시점에 측정된 각 노드들의 잔류 에너지 분포의 전형적인 예를 그림 8에 도시하였다. 앞에서와 마찬가지로 어느 노드에서든 첫 번째 에너지 고갈이 발생하는 시점에 시뮬레이션은 종료되도록 하였다. 네트워크 수명의 연장과 에너지의 고른 분포와의 관계를 볼 수 있는 실험이다. 그림 8 (a), (b), (c)에 각각 round robin, EAR, 그리고 TBP 방식의 결과를 보였다. 어두운 부분은 에너지의 소모가 많은 곳이고 밝은 곳은 에너지 소비가 적은 곳이다. 시뮬레이션이 종료된 시점, 즉 네트워크 수명도 명시하였다. 소스 노드는 왼쪽 위 모서리에 있고 싱크 노드는 아래 한 가운데에 놓여 있을 때 세 방식 모두 그림과 같이 왼쪽 절반 직사각형 태의 라우팅 영역이 형성된다. 싱크 노드를 포함하는 가운데 수직선상의 노드들이 라우팅 영역의 경계를 이루는 이유는, 그림 7의 격자형 토폴로지와

전송범위 설정에 따르면 이들 노드가 가질 수 있는 싱크 노드로의 부모 노드가 동일한 수직선상에 있는 노드뿐이기 때문이다. 이러한 노드들도 매우 제한된 개수의 부모 노드를 가지므로 싱크 노드 인접 노드들과 더불어 에너지 소비가 집중되는 특성을 갖는다. 따라서 네트워크 수명을 연장하기 위해서는 이들 노드에서의 부하 집중 완화가 필수적이다. TBP 알고리즘의 경우 다른 방식에 비해 3배에 가까운 네트워크 수명을 지원할 수 있는 것은 그림 8 (c)에서 확인할 수 있듯이, 이러한 노드들에서의 부하 분산이 적절하게 이루어졌기 때문이다. 라우팅 영역을 보다 넓게 활용하도록 설계된 TBP 알고리즘이 갖는 강점이다.

EAR의 경우 경로별 비용을 기반으로 다중 경로를 활용하는 방식인데, 단순한 round robin 방식에 비해 크게 개선된 결과를 볼 수 없었다. 가변적인 경로별 비용을 지속적으로 업데이트하는 과정이 네트워크 전 영역을 통해 이루어지고, 확실적인 라우팅 선택에서 결여될 수 있는 치밀성이 그러한 원인의 일부로 관측된다. 반면, TBP 방식에서는 지역적인 에너지 정보 교환으로 실시간 반응이 충분하고, back-pressure 신호를 통한 적극적 관리를 기반으로 한다는 점에서 두 방식간의 성능 차이가 설명될 수 있다. 다음 실험에서 이러한 특성을 명확히 확인하고자 네트워크의 전체 운영 기간 동안 한 홉을 갖는 노드의 에너지 잔량 변화 추이를 관측하였다. 그림 9에는 두 가지의 실험 네트워크를 도시하였는데, 채색된 부분이 이번 실험을 위한 네트워크 구성이다. 한 개의 소스 노드와 싱크 노드를 그림과 같이 설정하고, 격자 간격과 각 노드의 전송 범위를 앞 실험들과 같이 두면 채색된 네트워크 전체 영역이 소스 노드의 라우팅 영역이 된다. 그림에서 다섯 개

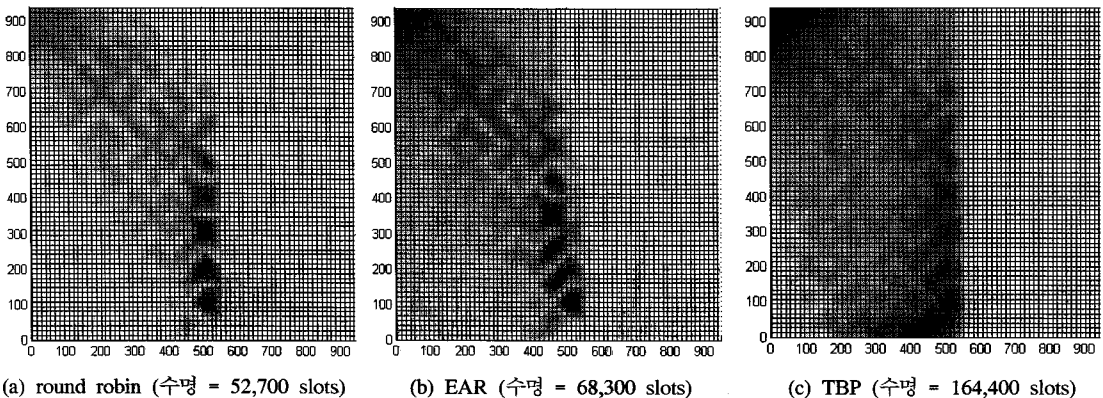


그림 8. 잔류 에너지 분포도(소스 노드: 그림 7의 노드 a)

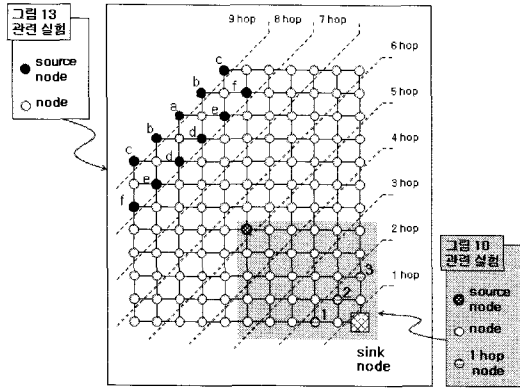
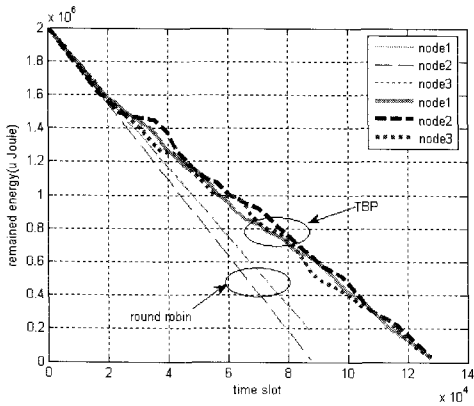
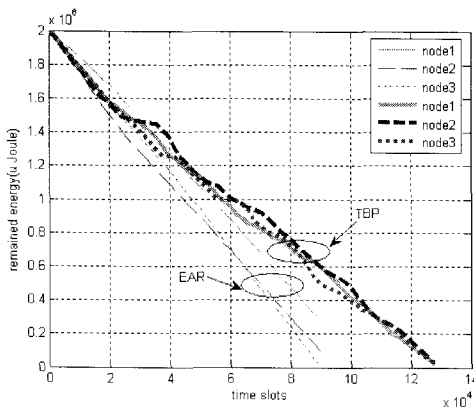


그림 9. 에너지 변화 추이(그림 10)와 전송률 및 지연 측정(그림 13)을 위한 실험 네트워크



(a) Round robin vs. TBP



(b) EAR vs. TBP

그림 10. 한 홉 노드들의 에너지 커브 비교

의 한 홉 노드가 있는데, 그 중 노드 1, 2, 3의 에너지 상태를 관찰한다. 소스 노드에서 50 slot 마다 데이터를 생성하는 환경에서 이들 한 홉 노드들의 에너지 커브를 관찰하였다. 각 노드들의 초기 에너지는 0.2J로 하였다. Round robin과 EAR, 그리고

TBP 알고리즘 각각을 적용하여 실험을 수행하였으며, 그림 10에 한 홉 노드들의 에너지 변화 커브를 각 방식별로 도시하여 비교하였다. Round robin과 EAR 방식에서는 각 노드들의 에너지 소비 균등화를 위한 외형적 조절 효과가 보이지 않고 단지 각각 일정한 비율로 감소하는 모습을 보이고 있다. 반면, TBP 알고리즘에서는 한 홉 노드들 간의 에너지 소비 균등화를 위한 조절 효과가 명확히 보이고, 더 나아가 에너지 소비율이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 이들 한 홉 노드들을 부모 노드로 갖는 두 홉 노드들이 에너지 인지 기반 트래픽 분산을 적절히 수행하고 있음을 보여주는 결과이다.

#### 4.4 복수의 소스 노드 실험

TBP 알고리즘 설계의 기본 개념은 한 개의 소스 노드가 존재할 때 가장 명확하며, 실제 앞 절의 실험 결과에서 확인되었다. 본 절에서는 소스 노드의 개수를 다양하게 설정하여 이에 대한 TBP 알고리즘의 반응을 확인한다. 라우팅 영역을 최대한 넓게 활용하기 위해, 그림 7에서 상부 좌우 모서리에 있는 노드들 a, b, c, d, e, f를 순차적으로 늘리면서 각 개수 별 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 소스 노드들은 50 slots을 주기로 하여 데이터 패킷을 생성하도록 하였고, 각 발생 시점은 노드 간 연관성 없이 독립적인 시점에 이루어진다. 각 노드들의 초기 에너지는 0.5J로 하였다. 소스 노드 개수별 실험을 round robin, EAR, 그리고 TBP 방식별로 수행하여 얻은 네트워크 수명을 그림 11에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 복수개의 소스 노드에 대해서도 TBP 알고리즘이 네트워크 수명을 연장하는데 매우 효과적임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 그림 12

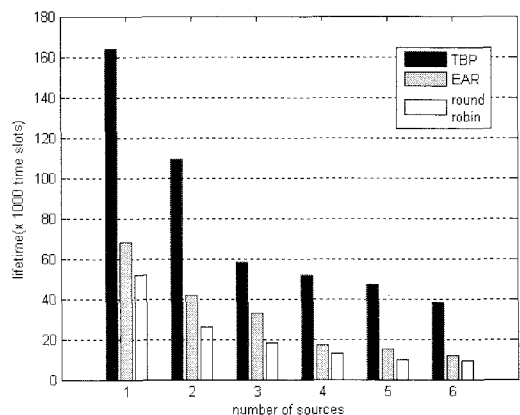
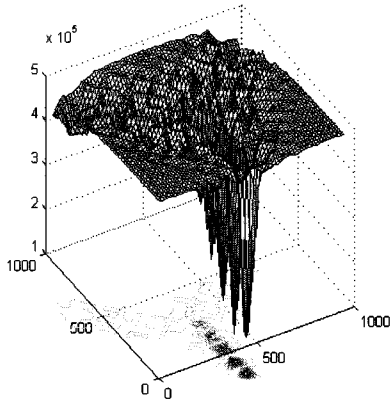
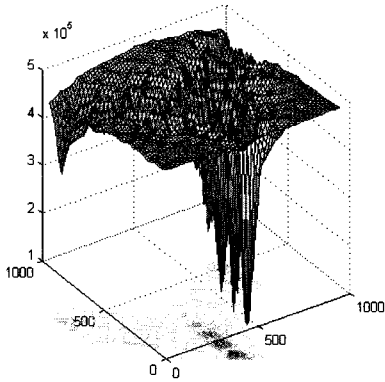


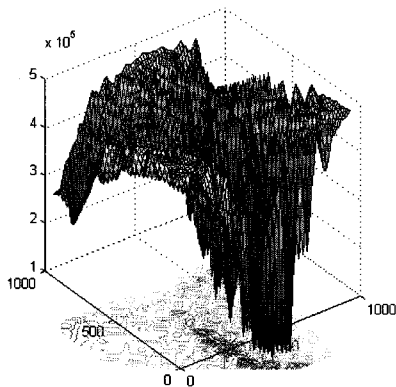
그림 11. 부하 증가에 따른 네트워크 수명 비교



(a) round robin 방식



(b) EAR 방식



(c) TBP 알고리즘 방식

그림 12. 여섯 개의 소스 노드(그림 7) 시뮬레이션 종료 후 에너지 잔류 분포

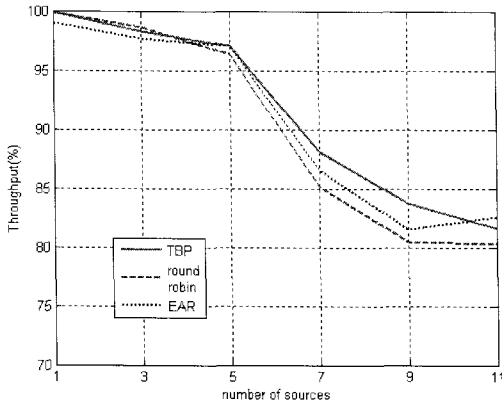
를 참조하면 다음과 같이 명확히 설명된다. 앞에서도 언급하였듯이, 그림 7의 토폴로지에서 에너지 소비가 집중되는 노드들은 한 홉 노드뿐만 아니라 가용 부모 노드를 한 개만 갖는 노드들, 즉 싱크 노드를 포함하는 한가운데 수직선상의 노드들이다. 이들

노드들에서의 에너지 분산이 수명 연장을 위해 중요하다. 이러한 점을 확인할 수 있도록 그림 12에는 실험 종료시점에서의 에너지 잔량을 전체 네트워크 영역에 대해 공간적으로 도시하였다. 여섯 개의 소스 노드를 운용한 경우이다. 그림 12 (a)와 (b)를 보면, round robin과 EAR 방식에서는 뚜렷하게 이들 라우팅 영역 경계에 있는 노드들 가운데 소수의 노드에서만 에너지 소비가 집중되는 것을 볼 수 있다. 처음으로 에너지 고갈이 발생하는 노드도 이들 노드 중 하나이다. 반면에 그림 12(c)에 보인 TBP 알고리즘 적용의 경우를 보면 한 홉 노드와 라우팅 영역 경계에 놓인 노드들 사이에 광범위하게 에너지 소비가 분산된 것이 확인된다. 그림 11에서 확인되는 결과는 이러한 특성에 근거를 두고 있다. 전형적으로 싱크 노드에 인접한 노드들에 트래픽이 집중되는 문제뿐만 아니라, 본 실험 토폴로지와 같이 가용 부모 노드를 충분히 갖지 못한 노드들이 있는 환경에서도 우수한 부하 분산 성능을 보임으로써, TBP 알고리즘은 토폴로지에 무관하게 네트워크 수명을 연장하기 위한 방안으로서 활용될 수 있음을 입증하였다.

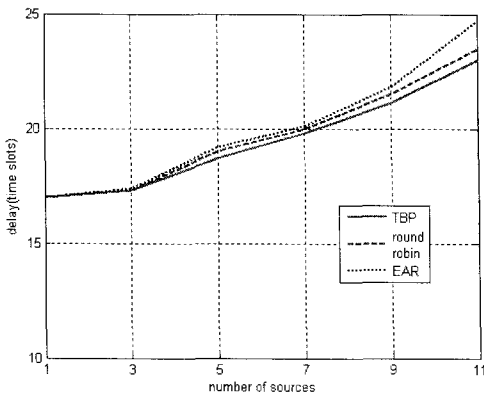
그림 11에 의하면, 선형적 부하 증가에 대해 수명의 감소는 지수적 감소 형태에 근사한 커브를 보여주고 있다. 이는 초기의 급격한 감소 이후 어느 정도 이상의 부하에 이르면 매우 한정된 버퍼 용량으로 인해 데이터의 손실이 증가하며, 따라서 데이터 패킷 중계 처리를 위한 에너지 소비는 점차 수렴해 가는 추세를 보여주는 것으로 해석된다. 표 1에 보듯이, 본 실험은 센서네트워크의 극히 한정된 자원 현황을 반영하여 각 노드별로 버퍼의 용량이 데이터 패킷 4개만을 저장할 수 있도록 하였다.

#### 4.5 전송률과 지연 성능 실험

지금까지의 실험에서는 주로 네트워크 수명 지표에 초점을 두었는데, 이러한 수명의 연장을 가져온 TBP 알고리즘이 전송률(throughput)이나 전송 지연 성능의 저하를 동반하는지 여부를 확인하는 것이 필요하다. 특히 TBP 알고리즘에서는 각 노드의 데이터 중계 기능이 에너지 상태에 따라 활성화 또는 비활성화 되므로 전송 지연의 증가 여지가 보인다. 따라서, TBP 알고리즘의 타당성 확인을 위해서는 네트워크 수명 연장효과와 더불어 네트워크 성능 지표인 전송률 및 전송 지연 성능을 확인하는 것이 필요하다. 이를 위해, 이번 실험에서는 부하의 증가에 따라 네트워크의 성능 지표인 전송률과 전송 지



(a) 전송률 변화



(b) 전송 지연 변화

그림 13. 부하의 증가에 따른 전송률과 전송 지연 성능 변화

연의 변화를 관측하였다. 소스 노드의 개수를 1개에서 점차 늘려 11개 까지 설정하여 실험하였다. 이번 실험은 관측하고자 하는 전송률과 전송지연 성능에 소스 노드들이 상호 미치는 영향을 크게 하여, 방식별 성능의 차이가 강조되는 환경을 택하였다. 이를 위한 네트워크는 앞의 그림 9에서 보인 전체 네트워크 영역이다. 즉, 왼쪽 위 모서리에 모두 11개의 소스 노드를 그림 9와 같이 설정하여, 동일한 라우팅 영역을 모든 소스 노드들이 공유하도록 하였다.

다섯 노드는 9홉, 여섯 노드는 8홉 만큼 싱크 노드로부터 떨어져 있다. 모든 소스 노드들은 50 slot 마다 한 개씩의 데이터 패킷을 독립적으로 발생하도록 하였다. 실험은 소스 노드를 한 개부터 열한 개까지 그림 9의 알파벳 순으로 두 개씩 증가시켜 가며 수행하였다. 전송률은 모든 노드들의 평균값으로 산출하였고, 전송 지연은 9홉을 갖는 노드들의 평균값을 구하여 그림 13에 도시하였다.

그림 13에서 주목할 점은, TBP 방식에서는 라우

팅 재구성 단계마다 각 노드들이 유휴 기간을 가지므로 위 두 성능 지표에 대해 부정적인 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 오히려 가장 우수한 지표를 보여주고 있다는 점이다. 이는 트래픽 분산의 효과로 설명할 수 있다. 즉, 적절한 트래픽 분산의 결과 각 노드에서의 큐잉 지연이 감소되고, 더 나아가 극히 제한적인 버퍼 용량으로 인해 있을 수 있는 빈번한 데이터 손실에 대해서도 트래픽 분산은 효과적인 대응 방안이 될 수 있음을 보여주고 있다.

## V. 결론

분산된 제어 구조를 유지하면서, 센서네트워크에서 에너지 소모의 형평을 유도하기 위해 임계값 활용에 기반을 둔 TBP 알고리즘을 제안하였고, 다양한 실험을 통하여 개선된 네트워크 성능을 확인하였다. 임계값 운용 방법 및 소스 노드의 다양한 설정 등에 따른 실험을 수행하였고, 네트워크 수명에 초점을 두어 실험하였다. 실험 결과 제안된 TBP 알고리즘은 다양한 환경에서 안정적이고 연장된 네트워크 수명을 제공할 뿐만 아니라, 라우팅 재구성에 따르는 일시적 유휴 상태를 동반하는 방식임에도 지연 및 전송률 지표에서 개선되는 결과를 확인할 수 있었다. 기본적으로 적용한 라우팅인 round robin 방식이 단순하지만 순환식 분배를 지향한다는 점에서 어느 정도의 트래픽 분배가 기대되지만, TBP 알고리즘의 다중 경로 운용 기능을 이에 더할 경우 네트워크 수명, 지연, 전송률 등 모든 성능 지표에서 괄목할 만큼 개선되는 것을 확인하였다. 에너지 인지 기반의 경로 제어를 통해 라우팅 영역을 최대한 활용함으로써 균등한 에너지 소비를 실현하고자 하는 것이 본 연구의 주제인데, 단순한 지역적 정보만을 사용하는 분산 제어 구조로 구현될 수 있다는 점이 TBP 알고리즘의 강점이다. 분산 제어 구조를 유지하면서 다양한 네트워크 환경에서 다양한 라우팅 방식을 접목하여 제안된 기능의 적용에 따르는 네트워크 반응을 분석하는 것이 향후에 연구 되어질 내용이다.

## 참고 문헌

- [1] I. A. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.8, pp.102-114, Aug. 2002.

- [2] M. Bhardwaj, T. Garnett, and A. P. Chandrakasan, "Upper bounds on the lifetime of sensor networks," *In Proc. of IEEE ICC*, 2001.
- [3] J. Li and P. Mohapatra, "Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problems in sensor networks," *Pervasive and Mobile Computing*, Vol.3, No.8, pp.233-254, 2007.
- [4] X. Wu, G. Chen, and S. K. Das, "Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol.19, No.5, May 2008.
- [5] S. Olariu and I. Stojmenovic, "Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting," *In Proc. of IEEE INFOCOM*, Apr. 2006.
- [6] C. K. Toh, "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.39, No.6, pp.138-147, June 2001.
- [7] R. C. Shah and J. M. Rabaey, "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks," *in Proc. in WCNC2002*, Orlando, Fl. Mar. 2002.
- [8] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *IEEE Proc. Hawaii Int'l Conf. Sys. Sci.* pp.1-10, Jan. 2000.

정 대 인 (Daein Jeong)

정회원

1984년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업

1986년 2월 서울대학교 제어계측공학과 석사

1987년 5월~1999년 8월 한국통신 선임연구원

1998년 1월 Polytechnic Univ. 박사(E.E)

2000년 9월~현재 한국외국어대학교 정보산업공과대학 전자정보공학부 교수

<관심분야> 패킷네트워크 QoS, 초고속 라우터, 유무선네트워크 성능분석