

무선 센서 네트워크에서 트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법

준회원 정연수*, 최 훈*, 종신회원 백윤주*^o

TRaffic-Aware Topology Control Algorithm in Wireless Sensor Networks

Yeonsu Jung*, Hoon Choi* Associate Members, Yunju Baek*^o Lifelong Member

요 약

센서 네트워크는 조밀하게 배치된 많은 수의 센서 노드로 구성되며, 극심한 에너지 제약을 가진다. 또한 네트워크의 충분한 통신 영역과 센싱 영역을 확보 할 수 있도록 스스로 토폴로지를 구성해야 한다. 본 논문에서는 이러한 토폴로지를 구성하기 위해 무선 센서 네트워크의 트래픽 정보를 이용하여 에너지 효율을 향상시키는 기법 (TRaffic-Aware Topology control: TRAT)을 제시한다. 제안한 기법은 트래픽 정보를 근거로 활동 노드의 수와 각 노드의 전송 세기를 조절한다. 실험 결과, 제안한 기법은 기존의 토폴로지 제어 기법과 비교하여 30% 정도의 성능 향상을 보였다.

Key Words : Topology control, Wireless sensor networks, Traffic information, Energy efficiency, Network connectivity

ABSTRACT

In wireless sensor networks, a number of nodes deployed in dense manner should be self-configured to establish a topology that provides communication and sensing coverage under stringent energy constraints. To establish an efficient topology, we propose the TRaffic-Aware Topology control (TRAT) algorithm that reduces energy dissipation by considering total amount of data flows in the network. Our algorithm controls the number of active nodes with traffic information and adjusts nodal transmission power by estimating amount of data flows. According to the result, the proposed algorithm shows about 30% better performance than the other methods in terms of energy efficiency.

1. 서 론

무선 센서 네트워크는 제한된 계산, 무선 통신, 센싱 능력을 가진 많은 수의 센서 노드들로 구성된다. 센서 필드(sensor field)에 배치된 센서 노드들은 사용자가 원하는 정보를 수집·가공하여 센서 필드와

외부 망을 연결하는 싱크(sink)를 통해 사용자에게 해당 정보를 제공한다. 각 센서 노드는 저가의 개발 비용, 소형, 저전력 동작 등의 제약 사항을 가지고 있다.

무선 센서 네트워크의 수명은 각 노드의 배터리 에 의해 좌우되며, 무선 센서 네트워크에 있어서 에

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력 핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음 [A1100-0601-0113, u-City 적용 센서 네트워크 시스템 개발]

* 부산대학교 컴퓨터공학과 임메디드시스템 연구실 ({rookie, hara}@pusan.ac.kr, yunju@pusan.ac.kr)(^o: 교신저자)

논문번호 : KICS2007-07-331, 접수일자 : 2007년 7월 26일, 최종논문접수일자 : 2008년 7월 14일

너지의 효율적 사용은 아주 중요하다. 이로 인해 제한된 에너지를 이용하여 센서 노드의 수명을 극대화하고 무선 센서 네트워크의 수명을 연장하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다.

무선 센서 네트워크의 에너지 효율 향상을 위한 연구 중 하나의 접근 방법은 토폴로지 제어이다. 무선 센서 네트워크에서는 일반적으로 한정된 필드 내에 많은 수의 센서 노드가 뿌려지므로 노드 밀도 (node density)가 매우 높다. 이러한 환경에서 모든 센서 노드가 활동 상태로 최대 전송 세기를 이용하여 서로 통신을 한다면 각 센서 노드의 에너지 소비는 매우 커지며, 네트워크의 수명이 제한된다. 그리고 좁은 영역 내에서 여러 노드들이 동시에 통신하는 경우가 많이 발생하여 충돌이 발생하며, 네트워크의 성능이 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 토폴로지 제어가 제안되었다.

기존의 토폴로지 제어에 대한 연구는 각 센서 노드의 RF 전송 세기의 조절(adjust transmission power) 기법, 각 노드의 동작 상태 제어(sleep/wakeup) 기법으로 구분된다. 그리고 최근에는 전송 세기 조절과 동작 상태 제어, 두 가지 기법을 함께 적용한 접근 방법이 제시되고 있다. 본 논문에서는 트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법(TRaffic-Aware Topology control: TRAT)을 제시하며, 이에 대한 타당성을 기존의 유사 기법과의 비교 실험을 통해 검증한다.

본 논문의 구성은 II장에서 관련 연구로서 기존의 토폴로지 제어 기법에 대해서 소개한다. III장에서는 제안한 트래픽을 정보를 고려한 토폴로지 제어의 접근 방법을 제시하고, 동작 과정을 기술한다. IV장에서는 본 논문에서 제안한 기법의 성능을 실험을 통해 기존의 토폴로지 제어 기법과 비교한다. 마지막으로 결론에 대해서 언급한다.

II. 관련 연구

토폴로지 제어 기법은 아래와 같이 세 가지 접근 방법으로 분류되며, 그림 1은 기존의 기법들을 접근 방법에 따라 분류한 것이다.

2.1 동작 상태 관리

일반적으로 센서 네트워크는 많은 수의 노드를 필드에 배치한다. 이 특징을 이용하여 위치가 중복되는 노드를 수면 상태로 동작하게 하면 에너지 효

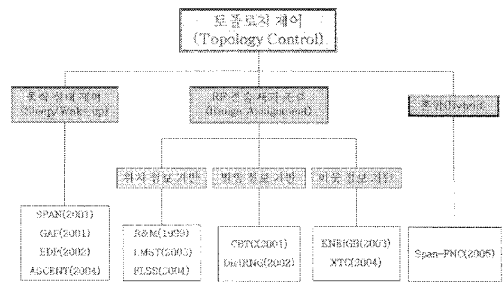


그림 1. 기존 토폴로지 제어 기법의 분류

율은 증가하며, 네트워크의 연결성은 기존의 수준을 유지할 수 있다. SPAN^[1], ASCENT^[2] 등이 이에 속하는 알고리즘이다. 각 알고리즘은 각각의 활동 노드 선택 기준을 가지고, 네트워크상의 센서 노드의 동작 상태를 결정한다. 표 1은 각 알고리즘이 활동 노드를 선택하는 기준을 보여준다.

2.2 전송 세기 조절

전송 세기 조절 기법은 센서 노드의 전송 세기를 조절하여, 사용자가 원하는 연결성을 보장하고 각 노드가 전송하는데 소비하는 에너지를 줄인다. 이에 속하는 기법들은 일반적으로 각 노드의 위치 정보를 이용하여, 기존의 그래프 이론을 적용한다.

기존의 전송 세기 조절 기법은 LMST, FLSS_k 등이 있다^[5]. LMST (Local Minimum Spanning Tree)는 MST (Minimum Spanning Tree) 생성 알고리즘을 센서 네트워크의 토폴로지를 구성하는데 적용하였으며, 이 과정에서 네트워크의 확장성 (scalability)을 위해 각 노드가 주변 지역 정보만을 이용한다. LMST는 에너지 효율의 측면에서 우수하지만, 1-연결성 (connectivity)만을 보장한다. 따라서 환경에 따라 노드의 고장이나 에너지 소진 등의 이벤트가 자주 발생하는 센서 네트워크 환경에서 내고장성 (fault tolerance)을 보장할 수 없다. 이를 보완하기 위해 FLSS_k를 제안하였으며, FLSS_k는 k-연결성을 보장하는 네트워크를 구성한다.

표 1. 각 알고리즘의 활동 노드 선택 기준

기법	동작 상태 결정을 위해 이용하는 정보
Span ^[1]	잔여 에너지, 이웃 노드의 개수 및 연결성
ASCENT ^[2]	주위 네트워크의 데이터 손실률
GAF ^[3]	물리적 위치, 잔여 에너지
EDP ^[4]	잔여 에너지

2.3 혼합 기법

동작 상태 관리 기법은 전송 세기 조절 기법에 비해 에너지 효율 측면의 성능이 우수하다. 하지만 에너지 효율을 극대화할수록 네트워크의 연결성이 저하된다. 전송 세기 조절 기법은 네트워크의 연결성은 원하는 수준으로 얻을 수 있지만, 에너지 효율이 저하된다.

이러한 두 가지 기법의 장점을 모두 취하기 위해 두 기법을 함께 적용하는 접근 방법이 제시되었다. 혼합 기법은 우선 동작 상태 관리 기법을 기존의 네트워크에 적용하여, 네트워크상에서 활동 노드를 선택한다. 그 결과 생성된 네트워크 토폴로지상의 활동 노드들에 대해 전송 세기 조절 기법을 적용한다. 동작 상태 관리 기법을 우선 적용하여 무선 센서 네트워크의 에너지 효율 향상을 피하며, 추가로 전송 세기 조절 기법을 적용하여 연결성을 보장한다.

2.4 기존 연구에 대한 고찰

기존의 연구들은 각 노드의 위치, 잔여 에너지, 데이터 손실률, 이웃 노드의 수 등을 고려하였다. 하지만 무선 센서 네트워크에 발생하는 트래픽 양은 고려된 적이 없으며, 이것은 무선 센서 네트워크의 에너지 효율과 직결된다. 따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에 흐르는 트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법을 제안한다.

III. 본 론

3.1 접근방법

이 장에서는 본 논문에서 제안하는 트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법에 대한 기본적인 접근 방법을 기술한다. 무선 센서 노드의 에너지 소모 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 RF 송수신기가 사용하는 에너지이다. 따라서 센서 노드의 에너지 효율을 향상시키기 위해서는 RF 통신에 소모되는 에너지의 효율적 사용이 중요하다. RF 송수신기의 에너지 소모는 동작 상태(송신, 수신, 유휴, 수면)에 따라 다르며, 이를 $P_{tx}(d)$, P_{rx} , P_{id} , P_s 와 같이 나타낸다. $P_{tx}(d)$ 는 d 거리를 전송할 때 소비되는 에너지, P_{rx} 는 수신 소비 에너지, P_{id} 는 유휴 소비 에너지, P_s 는 수면 소비 에너지를 의미한다. 그림 2와 같이 센서 노드 3개로 이루어진 간단한 네트워크를 가정 해 보자.

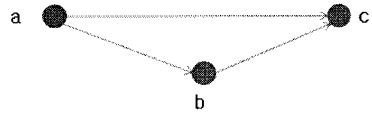


그림 2. 무선 네트워크의 예

센서 노드의 총 대역폭이 B bps이며, 노드 a에서 c로 R bps의 데이터가 발생한다. 이 경우 a에서 c로 한 홉에 전송하는 경로와 a, b, c 노드를 차례로 거쳐서 두 홉에 전송하는 경로, 두 가지 경로가 존재한다. Guoliang Xing는 각 경우의 소비 에너지를 식 1,2와 같이 계산하였다^[7].

$$P1 = \frac{R}{B} \times P_{tx}(acd) + \frac{R}{B} \times P_{rx} + 2 \left(1 - \frac{R}{B}\right) \times P_{id} + P_s \quad (1)$$

$$P2 = \frac{R}{B} \times (P_{tx}(ab) + P_{tx}(bc)) + \frac{2R}{B} \times P_{rx} + (3 - \frac{4R}{B}) \times P_{id} \quad (2)$$

$P1$ 은 한 홉으로 전송할 경우, $P2$ 는 b를 거쳐 두 홉으로 전송할 경우의 에너지 소모이다. 각 식은 각 노드가 전송, 수신, 유휴, 수면 상태일 때의 에너지 소모를 모두 포함하고 있다. $P1$ 의 경우, b 노드는 항상 수면 상태로 동작한다. 식 1, 2를 도식화 하면 그림 3과 같다.

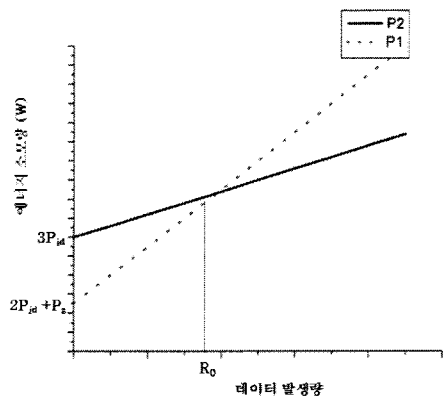


그림 3. 데이터양에 따른 에너지 소모

데이터 전송률이 R_0 이하일 경우, 한 홉으로 전송하는 것이 적은 에너지를 소비하며, R_0 이상일 경우 b 노드를 거쳐서 전송하는 것이 적은 에너지를 소비한다. R_0 값을 계산하면 식 3과 같으며, 이 값을 라디오 에너지 모델에 의존한다^[7].

$$R_0 = \frac{P_{id} - P_s}{P_{tx}(acd) - P_{tx}(bc) - P_{tx}(ab) + 2P_{id} - P_{rx}} \quad (3)$$

이와 같이 무선 센서 네트워크의 에너지 효율은 네트워크에 발생하는 데이터의 양에 영향을 받는다. 식 1에서 볼 수 있듯이 R 값이 작으면 RF 신호를 전송하는데 소모하는 에너지보다 유휴 상태에서의 에너지 소모가 큰 비중을 차지한다. 따라서 데이터 전송률이 낮은 경우, 활동 노드의 수를 감소시키고 각 활동 노드의 전송 세기를 조절하여, 각 노드의 평균 전송 범위를 크게 하면, 다수의 수면 노드가 에너지를 절약할 수 있으므로 에너지 효율이 향상된다. 반대로 데이터 발생량 R 값이 커지면 식 2에서 볼 수 있듯이 전체 소모 에너지 중 RF 신호를 전송하는데 소모하는 에너지의 비율이 높아진다. 그러므로 활동 상태 노드의 수를 증가시키고 각 노드의 전송 범위를 작게 하면 에너지 효율을 향상시킬 수 있다.

3.2 트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법

본 논문에서 제안하는 기법이 각 노드의 전송 세기를 조절하기 위해 LMST 기법을 적용한다. LMST는 각 노드가 자신의 위치 정보를 알고 있다는 가정 하에 제안된 기법이며, 각 센서 노드는 모두 자신의 위치 정보를 알고 있다는 가정이 필요하다. 전송 세기를 조절하기 위해 위치 정보가 필요치 않은 다른 기법을 적용한다면 이 가정은 완화될 수 있다.

트래픽 인지 토폴로지 제어 기법의 전체적인 동작 과정은 다음 네 단계가 주기적으로 반복된다.

- ① 트래픽 인지: 트래픽 정보를 이용하여 활동 노드 밀도(Active Node Density: AND) 결정
- ② 동작 상태 관리: 활동 노드 밀도와 잔여 에너지를 고려하여 활동 노드 선택
- ③ 전송 세기 조절: 각 활동 노드의 RF 전송 세기를 조절
- ④ 데이터 전달 및 트래픽 정보 저장

제안한 기법은 트래픽 인지 단계로 시작하며, 본 단계에서 무선 센서 네트워크의 각 센서 노드들이 이전 라운드에 발생한 트래픽의 양에 근거하여, 활동 노드 밀도를 결정한다. 이전 라운드에서 각 활동 노드들은 수신 및 송신한 데이터의 양을 저장한다. 이 정보를 트래픽 인지 단계에서 활동 노드 밀도를 결정하기 위해 이용한다. 활동 노드 밀도는 네트워크의 평균 활동 이웃 노드의 수를 의미하며 활동 노드의 수를 조절하는 역할을 한다. 활동 노드 밀

도를 결정하는 모델은 식 4와 같이 정의한다. α 값은 트래픽의 양의 변화를 활동 노드 밀도에 반영할 정도를 의미한다. β 는 트래픽 양이 적은 경우, 확보해야 하는 최소한의 활동 노드의 수이다. α, β 값은 시스템 설계자에 의해 미리 결정되고 적용되며, 배치되는 노드의 밀도 및 형태에 따라서 달라져야 한다. 이전 라운드에서 활동 상태였던 노드들은 이전 라운드의 트래픽 양을 수집·저장하여, 활동노드 밀도를 계산하고, 밀도 값을 주위 노드에게 전송한다. 이전 라운드에서 수면 상태로 동작했던 노드는 이전 라운드의 트래픽 양을 알 수 없으므로 이웃 노드가 전송하는 활동 노드 밀도 값을 수집하여, 이 값들의 평균값을 자신의 활동 노드 밀도로 취한다.

$$\text{활동노드밀도(AND)} = \alpha(\text{개}/\text{bits}) \times \text{이전 라운드의 트래픽양}(\text{bits}) + \beta \quad (4)$$

동작 상태 관리 단계에서는 활동 노드로 동작할 노드를 결정하며, 각 노드는 잔여 에너지양에 따라 활동 노드가 되는 우선순위를 가진다. 우선순위를 부여하기 위해 지연시간을 식 5와 같이 정의하고 이용한다. R은 잔여 에너지양이 같은 경우, 우선순위를 차등 부여하기 위한 무작위 변수이다.

$$\text{지연시간} = \left(1 - \frac{\text{에너지 잔여}}{\text{에너지 초기}}\right) + R \quad (5)$$

식 5에 따라 잔여 에너지양이 많은 노드가 짧은 지연시간을 가지게 되므로 활동 상태로 동작할 확률은 커진다. 각 노드는 지연시간 계산 후, 그림 4와 같이 지연시간 동안 대기 상태에서 Node_Hello 메시지를 수신하며, 송신 노드의 정보를 이웃 노드 정보로 저장한다. 지연시간 동안 메시지를 수신하여, 활동 노드 밀도 값보다 많은 수의 Node_Hello 메시지를 수신하지 못한 경우, 주위에 충분한 수의 활

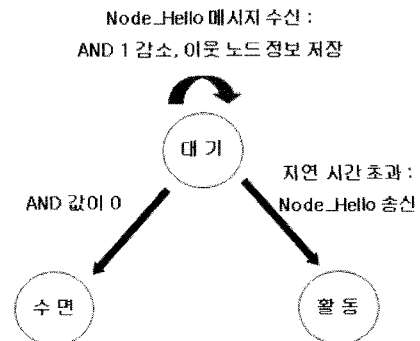


그림 4. 동작 상태 관리 단계

동 노드가 없으므로 해당 노드는 활동 노드로 결정되고, Node_Hello 메시지를 주위 노드에 전송한다. Node_Hello 메시지에는 노드 ID, 위치 정보 등이 포함된다. 반면 노드가 지연 시간이 모두 지나기 전에 활동 노드 밀도 값 이상의 Node_Hello 메시지를 수신한 경우, 주위에 이미 많은 수의 활동 노드가 존재하므로 해당 노드는 수면 상태로 동작한다.

전송 세기 조절 단계에서 이전 단계에서 활동 상태로 동작하도록 설정된 노드의 전송 세기를 조절하는 단계이다. 이 단계에서는 기존의 전송 세기 조절 기법 중 하나인 LMST 기법을 적용한다. LMST에서 각 활동 센서 노드는 이전 단계에서 수집한 이웃 노드의 ID와 위치 정보를 이용하여, MST를 구성하고, 각 노드의 전송 세기를 조절한다⁵⁾.

다음은 트래픽 전송 단계이며, 이 단계에서는 트래픽 인지, 동작 상태 관리, 전송 세기 조절 단계를 거치면서 구성된 네트워크를 이용해 소스에서 싱크로 데이터를 전달한다. 활동 노드들이 데이터를 전달하는 역할을 수행하며, 수면 노드들은 다음 라운드까지 미세한 에너지만을 사용하며 동작한다. 각 활동 노드는 자신에게 수신되는 모든 트래픽의 정보를 저장하여 다음 라운드의 토폴로지 구성을 위해 이용한다.

IV. 성능 평가

제안한 기법의 성능을 평가하기 위해서 PARSEC 플랫폼 기반의 NESLsim을 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. PARSEC (PARallel Simulation Environment for Complex systems)는 C 기반의 이산적 이벤트 시뮬레이션 언어이다. 이것은 이산적 이벤트 시뮬레이션에 프로세스의 상호 작용 접근 방법을 채택한다. NESLsim에서 센서 네트워크는 센서 노드, 채널, 노드를 생성하는 감독 개체의 집합으로 설계된다. 시뮬레이션 사나리오를 위해서 700m × 700m 지형을 설정하고, 각 1000 개의 센서 노드를 배치하였다. 각 센서 노드의 초기 위치는 무작위로 생성되었으며, 각 센서 노드의 최대 전송 범위는 100m이며, 전송 속도는 40Kbps이다.

각 센서 노드의 에너지 모델은 표 2와 같다. 싱크는 센서 필드의 중앙인(350,350) 위치에 하나가 배치되었다. 그리고 센서 필드 지역의 모서리를 포함한 가장 자리에 20개의 소스 노드가 배치되었다.

싱크는 센서 필드의 중앙인(350,350) 위치에 하나가 배치되었다. 그리고 센서 필드 지역의 모서리를

표 2. 센서 노드의 에너지 모델

동작 상태	$P_{tx}(d)$	P_{rx}	P_{id}	P_s
에너지 소비	$6W \times (d/d_{max})^2$	25mW	24mW	6μW

포함한 가장자리에 20개의 소스 노드가 배치되었다. 각 센서 노드의 데이터 라우팅은 최소 홉 라우팅을 사용한다. 최소 홉 라우팅은 싱크까지 데이터를 전송하는 경로 중, 전송 횟수가 최소인 경로를 찾아 데이터를 전달한다. TRAT의 실험 및 성능 평가는 고정 활동 노드 모델과의 성능 비교와 EDP, Span-FNC 기법과의 성능 비교로 나뉜다. 각 실험에서 적용된 α 값은 0.0003이며, β 값은 3이다. 모든 실험의 에너지 소비량은 TRAT에서 이용하는 제어 패킷의 교환을 위해 소비하는 에너지를 포함하고 있다.

4.1 고정 활동 모델과의 성능 비교

표 3과 같이 활동 노드의 수와 전송 세기가 고정되어 있는 정적인 모델과의 성능 비교를 통하여, TRAT의 성능 평가를 수행한다.

그림 5는 600초 동안 데이터 전달을 수행하였을 경우, 각 모델의 데이터 발생량에 따른 에너지 소비를 나타낸다. x축은 각각의 20개의 소스가 발생시킨 패킷의 크기이다. y축은 네트워크에 속한 모든 노드가 사용한 에너지의 누적 수치이다. 트래픽이 적은 경우, 모델 High는 다른 모델에 비해 에너지 소모량이 많다. 모델 High는 다른 모델과 비교하여

표 3. 네 가지 고정 활동 노드 모델

모델	활동 노드 수	전송 세기
모델 High	170	30
모델 M1	110	45
모델 M2	70	70
모델 Low	50	100

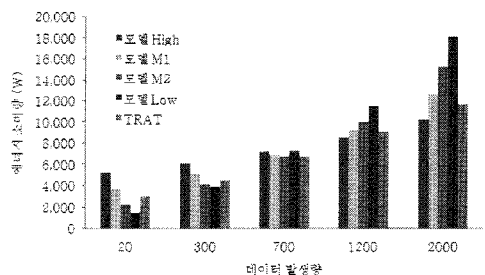


그림 5. 데이터 발생량에 따른 에너지 소비

표 4. 가변 트래픽 응용에서의 에너지 소모량

기법	에너지 소모 (W)	효율성 (%)
모델 High	7,180.31	79.52
모델 M1	7,421.10	76.94
모델 M2	7,708.16	74.08
모델 Low	8,848.02	64.53
TRAT	5,709.87	100.00

활동 노드의 수가 많아 각 노드가 유휴 상태로 동작하는 시간이 많기 때문이다. 반면 모델 Low는 활동 노드의 수가 적기 때문에 유휴 상태에서 낭비되는 에너지가 적다.

반대로 트래픽의 양이 많은 경우, 모델 High는 전송 소비 에너지가 다른 모델에 비해 월등히 적으며, 모델 Low는 전송 소비 에너지가 급격히 증가하여 아주 많은 에너지를 사용하고 있다.

TRAT의 경우, 트래픽의 양을 파악하고 그에 따라 활동 노드의 수를 조절함으로써 에너지 소모를 줄인다. TRAT의 에너지 소모량은 다른 네 가지 모델의 에너지 소모량의 최소값에 근접한다.

표 4는 각 소스가 발생시키는 데이터의 크기를 라운드마다 20, 300, 700, 1200, 2000 bits로 변화시켰을 때, 각 모델의 에너지 소모량을 측정하는 것이다. 한 라운드의 시간은 10초이며, 실험은 60라운드 동안 수행되었다. TRAT은 고정 활동 노드 모델보다 최소 20%에서 최대 35%의 높은 에너지 효율을 보였다.

4.2 EDP, Span-FNC 기법과의 성능 비교

기존의 동작 상태 관리 기법 중 하나인 EDP와 Span-FNC 기법과 비교하여 네트워크 수명 및 에너지 소모량을 평가한다. Span-FNC는 동작 상태 관리 기법과 전송 세기 조절 기법을 차례로 적용하는 접근 방법을 지칭하며, 실제 구현은 EDP와 LMST의 혼합이다⁶⁾. 각 센서 노드의 초기 에너지는 5W, 각 라운드의 기간은 1초, 실험 수행 시간은 500 라운드이다. 그림 6은 각 기법의 네트워크 수명을 측정하는 결과이다. 네트워크 수명은 더 이상 네트워크의 연결성이 보장될 수 없어 데이터 전달이 불가능해지는 시점까지의 라운드 수를 뜻한다. EDP는 전송 세기를 조절하지 않는 알고리즘이며, EDP-X의 X는 각 기법에서 사용된 노드의 전송 세기를 의미한다.

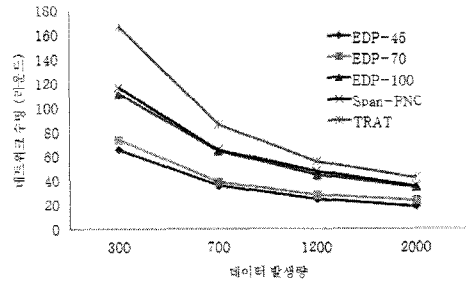


그림 6. 각 기법의 네트워크 수명

실험 결과, EDP-45는 네트워크의 수명이 매우 짧다는 것을 알 수 있었다. EDP는 각 노드가 잔여 에너지의 양을 고려하여 확률적으로 활동 노드로 동작을 하기 때문에 시간이 지남에 따라 각 노드가 활동할 확률은 적어지게 된다. 전송 세기가 적은 경우, 각 노드의 전송 범위 안에 활동 상태의 이웃 노드가 존재할 확률이 적으며, 시간이 지남에 따라 그 확률은 더욱 희박해진다. 따라서 전송 세기가 45m인 EDP-45의 경우는 네트워크 수명이 제한되는 것을 볼 수 있다. Span-FNC는 EDP-100과 비슷한 수준의 성능을 보였다. TRAT은 EDP와 Span-FNC에 비해 평균 활동 노드 수가 적어서 유휴 상태 소모 에너지를 절약하였으며, RF 전송 세기를 조절하여 네트워크의 수명이 약 20% 정도 연장된 것을 볼 수 있다.

그림 7은 각 기법의 라운드 당 평균 에너지 소모량을 나타낸다. EDP-100이 가장 많은 에너지 소모를 보이고 있다. EDP-45는 트래픽이 적은 환경에서 에너지 소모가 많고 트래픽의 증가에 따른 에너지 소모의 증가는 EDP-100에 비해 적다. Span-FNC는 EDP보다는 에너지를 절약하지만 전송 소비 에너지를 최적화하는 것에 불과하며 에너지 효율 향상은 크지 않다. 하지만 TRAT은 에너지 소모량이 약 25% 정도 줄어든 것을 볼 수 있다.

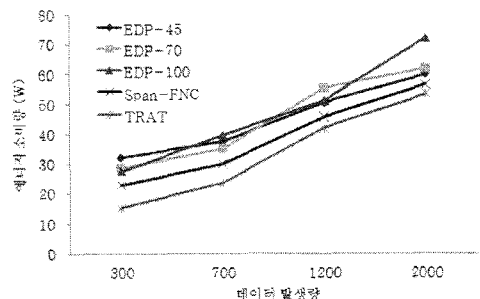


그림 7. 각 기법의 평균 에너지 소비량

다음은 소스가 발생시키는 데이터의 크기를 라운드마다 20, 300, 700, 1200, 2000 bits로 변화시켰을 때, 각 기법의 평균 에너지 소모, 평균 수명을 비교하였다. EDP-45와 EDP-100은 네트워크 수명이나 에너지 소모 측면에서 좋지 못한 성능을 보였으며, Span-FNC는 EDP-100 비해 약간의 에너지 향상을 보였다. TRAT의 네트워크 수명은 Span-FNC와 비교하여 20% 정도의 성능 향상을 보였으며, 에너지 소모는 약 20% 정도 향상되었다. 이것은 기본적으로 EDP와 Span-FNC가 네트워크 초기에는 모든 노드가 활동 상태로 동작하여 많은 에너지를 유향 상태에서 낭비하기 때문이다.

표 5. 가변 응용에서의 에너지 소모 및 네트워크 수명

기법	에너지 소모 (W)	효율성 (%)	수명 (라운드)
EDP-45	46.09	78.63	26
EDP-70	42.22	85.84	33
EDP-100	49.83	72.73	49
Span-FNC	45.74	79.23	51
TRAT	36.24	100.00	62

4.3 활동 노드 밀도 결정 모델에 대한 고찰

활동 노드 밀도를 결정하는데 있어서 α , β 값이 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 하였다. 그림 8은 β 값을 3으로 고정하고, α 값을 변화시켰을 때, TRAT의 에너지 소모이다. α 값이 0.003, 0.0003 일 때가 좋은 성능을 보였다. α 값이 0인 경우, 데이터의 발생량에 상관없이 적은 수의 활동 노드만을 동작시킨다. 결과적으로 데이터 발생량이 2000일 때, 에너지 소비가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. α 값이 0.03로 지나치게 클 경우, 너무 많은 노드를 활동 상태로 동작시키므로 전 구간에서 많은 에너지 소비량을 보이고 있다.

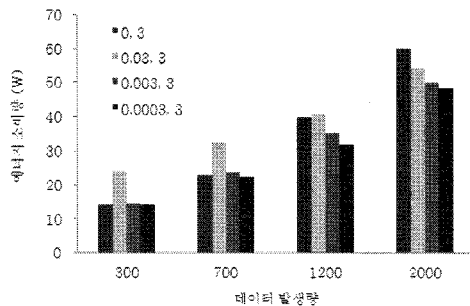


그림 8. α 값 변화에 따른 TRAT의 에너지 소비

그림 9는 α 값을 0.0003으로 고정하고, β 값을 3, 6, 9로 변화시켰을 경우, TRAT의 성능을 측정 한 것이다. β 값의 증가는 데이터 발생량이 적은 경우, 에너지 소비량의 증가시켰다. 그 이유는 β 값을 증가시키면 데이터 발생량이 적은 경우, 활동 노드의 수를 증가시키기 때문이다. 데이터 발생량이 증가하면 β 값이 활동 노드 밀도 모델에 미치는 영향보다 α 값의 영향이 아주 크므로, 이러한 효과는 사라진다.

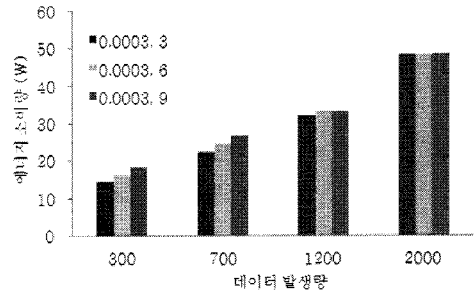


그림 9. β 값 변화에 따른 TRAT 에너지 소비

V. 결론

본 논문에서는 기존의 토폴로지 제어 기법들이 고려하지 않았던 트래픽 정보를 이용하여, 무선 센서 네트워크의 에너지 효율을 향상하기 위한 기법을 제안하였다. 기존의 기법들은 이웃 노드의 수, 노드의 에너지 잔량, 데이터 손실률 등의 정보를 이용하였다. 네트워크에 발생하는 트래픽의 양 또한 무선 네트워크의 에너지 소모에 큰 영향을 주는 요인이다. 따라서 본 논문에서는 트래픽 정보를 이용하여, 네트워크에 참여하는 활동 노드의 수를 조절하고, 각 센서 노드의 RF 전송 세기를 조절하여 에너지 효율을 향상시키는 기법을 제안하고 구현 및 실험을 통한 성능 평가를 하였다.

트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법을 고정 활동 노드 모델과 비교한 결과, 트래픽의 양이 변하는 응용에 적용하여 고정 활동 노드 모델에 비해 약 20%~35%의 에너지 효율 향상을 확인하였다. 또한 EDP, Span-FNC와 비교하여 네트워크 수명이 20% 정도 연장됨을 알 수 있었다.

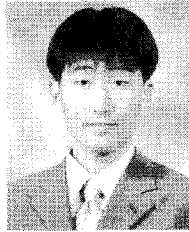
본 논문에서 제안한 트래픽 정보를 이용한 토폴로지 제어 기법은 노드 밀도가 높고, 트래픽 양이 변하는 환경에서 에너지 효율 향상을 극대화하였다.

참고문헌

- [1] Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Robert Morris, "Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in Ad Hoc wireless networks," *In Proceedings of the 7th annual ACM international conference on Mobile computing and networking*, pp.85-96, 2001.
- [2] A Cerpa and D Estrin, "ASCENT: Adaptive Self-Configuring sSensor Networks Topologies," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.3, Issue 3, pp. 272 - 285, 2004.
- [3] Ya Xu and John Heidemann, "Geography informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," *In Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 70-84, 2001.
- [4] Marc R. Pearlman, Jing Deng, Ben Liang, and Zygmunt J. Haas, "Elective Participation in Ad Hoc Networks Based on Energy Consumption," *IEEE Global Telecommunications Conference*, Vol.1, pp. 26 - 31, 2002.
- [5] N. Li, J. C. Hou, and L. Sha, "Design and analysis of an MST-based topology control algorithm," *In Proceedings of IEEE INFOCOM*, Vol.3, pp.1702 - 1712. 2003.
- [6] Hongchi Shi and Yi Shang, "A Two Level Strategy for Topology Control in Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, Vol.2, pp.358 - 362, 2005.
- [7] Guoliang Xing, Chenyang Lu, Ying Zhang, Qingfeng Huang, Robert Pless. "Sensor networks: Minimum power configuration in wireless sensor networks," *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing MobiHoc*, 2005.

정연수 (Yeonsu Jung)

준회원

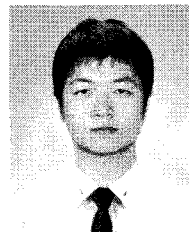


2005년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 학사
 2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사
 2007년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 센서 네트워크, Active RFID system, RTLS

최훈 (Hoon Choi)

준회원



2005년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 학사
 2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사
 2007년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 센서 네트워크, 임베디드 시스템, Active RFID system

백윤주 (Yunju Baek)

종신회원



1990년 2월 한국과학기술원 전산학과 학사 졸업
 1992년 2월 한국과학기술원 전산학과 석사
 1997년 2월 한국과학기술원 전산학과 박사
 1999년~2002년 NHN 기술연구소 소장

2003년~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 부교수
 <관심분야> 임베디드시스템, 센서 네트워크