DBpia

논문 12-37B-12-11

한국통신학회논문지 '12-12 Vol.37B No.12
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2012.37B.12.1186

# 에너지 효율적 무선 센서 네트워크를 위한 Strike and Bargaining 라우팅 기법

고 승 우◆, 정 진 홍*, 김 성 륜°

# A Strike and Bargaining Routing Algorithm for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks

Seung-Woo Ko◆, Jin Hong Jeong*, Seong-Lyun Kim°

요 약

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율성을 문제를 해결하기 위해 다중 홉 전송 방식을 사용할 수 있다. 다중 홉 전송 방식은 전체 에너지 소비량을 줄일 수는 있으나 네트워크의 라이프타임을 심각하게 감소시킬 수 있다. 노드들은 자신의 잔여에너지에 따라 다른 노드의 패킷을 릴레이 해줄지를 결정해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 우리는 strike and bargaining 알고리즘 (SBA)를 제안한다. 라우팅 경로는 각 노드의 특정값 (wage)에 따라 결정된다. 각 노드는 주변 노드와 wage를 협상한 후 합당한 wage를 결정하고 그에 따라 최적의 라우팅 경로를 결정한다. 분석과 시뮬레이션을 통해 우리는 SBA가 최적의 성능에 근접할 수 있음을 보인다.

**Key Words** : Energy-efficiency, sensor network, lifetime, multi-hop, residual energy

ABSTRACT

In order to resolve the energy efficiency in wireless sensor networks, a multihop transmission technique is utilized. However, multihop transmission in wireless sensor networks (WSN) has pros and cons. It reduces total energy consumption, while it may cause a severe decrease in network lifetime. To solve this problem, we suggest the so called strike and bargaining algorithm (SBA). The routing path is determined by wages of nodes. Each node negotiates its wage with their neighbor nodes and determine a reasonable value to reach a optimally balanced point. By analysis and simulations, we show SBA can achieve a near optimal solution.

## Ⅰ. 서 론

무선기기들의 제조 가격이 저렴해지고 그 크기도 휴대 가능할 정도로 작아지면서 무선 센서 네트워크에 대한 관심은 높아지고 있다. 현재 무선 센서 네트워크는 산업, 국방, 환경 감시 등 다양한 분야에서 활용되고 있지만 확장성, 이동성 지원, QoS 보장 등 여전히 여러 가지 해결해야 될 문제가 남아 있다[1]. 특히 에너지 효율성은 각 노드의 에너지가 제한적인 무선 센서 네트워크에서 중요한 이슈이다. 각 노드의 에너지가 재충전됨을 보장할 수 없기 때문에 각 노드의 에너지를 효율적으로 사용하는 것이 중요하다[2]. 이에 대한 해결 방법으로 다중 홉 전송 기술 (multi-hop transmission)이 떠오르고

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2012-H0301-12-1001)
◆ 주저자 : 연세대학교 전기전자공학부 무선자원최적화 연구실, swko@ramo.yonsei.ac.krm, 정회원
° 교신저자 : 연세대학교 전기전자공학부 무선자원최적화 연구실, slkim@ramo.yonsei.ac.kr, 종신회원
* 삼성전자 무선사업부, jh44.jeong@samsung.com
논문번호 : KICS2012-10-512, 접수일자 : 2012년 10월 29일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 26일



www.dbpia.co.kr

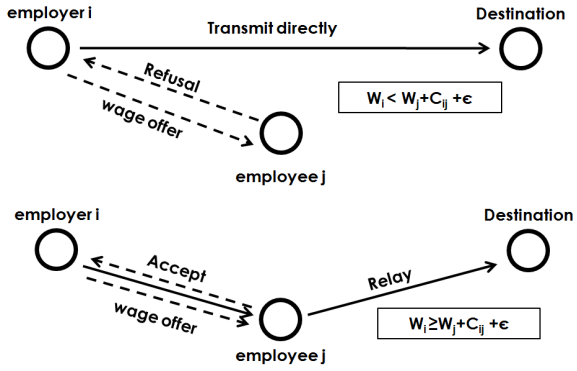


Fig. 1. Illustrations of the strike and bargaining algorithm (SBA). If an employee j declares strike, an employer i starts the bargaining process. If the bargaining breaks down, the employer i transmits packets directly (the upper figure). Otherwise, the employee j receives and relays packets again (the lower figure).

있다[3-5]. 무선 채널 특성 상 센서 간 거리가 멀어질수록 에너지 소모가 심해지기 때문에 짧은 거리를 여러 번 전송해서 패킷을 전달하는 다중 홉 방식이 전체 에너지 소비량이 줄어들게 된다.

하지만 무선 센서 네트워크에서 다중홉 전송을 사용하는 것은 네트워크 라이프 타임에 악영향을 미칠 수도 있다. 싱크나 access point (AP) 근처에 있는 노드들은 다른 노드들의 패킷을 릴레이 해주기 때문에 좀 더 많은 에너지를 쓰게 되고 그로 인해 도리어 네트워크의 라이프 타임이 감소하게 된다. 그러므로 무선 센서 네트워크의 라우팅을 결정할 때 에너지 소비량을 최소화 하는 것뿐만 아니라 각 노드의 남아있는 에너지들 간의 균형을 유지하는 것도 고려를 해야 한다. 많은 기존 연구가 네트워크 라이프 타임을 향상시키기 위해 노력하고 있다[6-13]. 논문 [6]에서는 각 노드의 잔여 에너지를 고려한 비용 함수를 최소화 될 수 있는 라우팅 경로를 찾는 알고리즘을 제시했다. 논문 [7]에서는 전송 파워와 전송 속도를 동시에 조절하여 네트워크 라이프 타임을 증가시키는 방법을 제시하였다. 논문 [8]에서는 무선 채널의 페이딩 특성과 잔여 에너지량을 동시에 고려한 medium access control (MAC)을 제안하였다. 논문 [9]에서는 sub-gradient 방식을 활용해서 네트워크 라이프 타임을 분산적으로 해결할 수 있는 방법에 대해서 연구를 하였다. 논문 [10]에서는 shortest path 알고리즘을 사용하여 네트워크 라우팅을 향상 시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 논문 [11]에서는 데이터를 수집하는 AP가 여러 개 존재를 할 때 네트워크 라이프 타임을 최대화

Table 1. Strike and bargaining algorithm (SBA)

| Algorithm: Strike and Bargaining Algorithm (SBA) |
|---|
| $g_i$: the number of packet in the queue of node $i$ |
| Strike $(W_i, W_j, C_{ji})$<br>if $W_i > W_j - C_{ji}$<br>$g_i = g_i - f_{ji}$<br>$g_j = g_j + f_{ji}$<br>$f_{ij} = 0$ |
| Bargaining $(W_i, W_j, C_{ij}, F_{ij})$<br>if $W_i > W_j + C_{ij}$<br>$\rho = \min(g_i, F_{ij})$<br>$g_i = g_i - \rho$<br>$g_j = g_j + \rho$<br>$f_{ij} = f_{ij} + \rho$ |
| While $g_i > 0$<br>if $\min_{j \in I^+}(W_j + C_{ij}) < \min_{j \in I^-}(W_j - C_{ji})$<br>$W_i = \min_{j \in I^+}(W_j + C_{ij} + \epsilon)$<br>$j^* = \arg\min_{j \in I^+}(W_j + C_{ij} + \epsilon)$<br>Bargaining$(W_i, W_{j^*}, C_{ij^*}, F_{ij^*})$<br>else<br>$W_i = \min_{j \in I^-}(W_j - C_{ji} + \epsilon)$<br>$j^* = \arg\min_{j \in I^-}(W_j - C_{ji} + \epsilon)$<br>Strike $(W_i, W_{j^*}, C_{ij^*}, F_{ij^*})$ |

하는 방법에 대해 연구를 하였다. 논문 [12]에서는 각 노드의 에너지 상태에 따라 전송 거리를 조절하는 방법으로 네트워크 라이프 타임 성능을 향상 시켰다. 논문 [13]에서는 노드가 멈춰있지 않고 움직일 때 네트워크 라이프 타임을 올릴 수 있음을 분석과 실험을 통해 보였다.

네트워크 라이프 타임 측면에서 AP 근처에 있는 노드들은 자신의 잔여 에너지양이 너무 작을 때는 다른 노드의 패킷을 릴레이 전송 하는 것을 거절할 필요가 있다. 이러한 현상은 노사 관계에서 고용주 (employer)와 고용인 (employee) 사이의 갈등과 흡



www.dbpia.co.kr

사하다[14]. 고용주는 자신의 일을 대신 시키기 위해 고용인을 고용하고 그에 해당하는 wage을 지급한다. 고용인은 고용주에게 합당한 wage을 받고 그에 상응하는 일을 수행한다. 고용주와 고용인이 원하는 것은 서로 상반된다. 고용주는 고용인들에게 지급하는 wage을 최대한 줄이면서 많은 일을 시키려고 한다. 반대로 고용인들은 wage을 많이 받고 싶어 한다. 서로의 상반된 이해관계는 수차례의 파업과 협상으로 이어지며 반복되는 과정 끝에 하나의 균형 포인트에 이르게 된다.

본 논문의 주된 목적은 이러한 wage 결정 시나리오를 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적 라우팅 설계에 적용시키는 것이다. 우리는 strike and bargaining 알고리즘 (SBA)를 제안한다. 각 노드는 자신의 잔여 에너지와 큐에 남아있는 패킷 숫자를 바탕으로 자신이 고용인이 될지 고용주가 될지를 결정한다. 잔여 에너지양이 적거나 너무 많은 양의 패킷을 릴레이 하고 있을 때는 자신의 현재 wage 상태에 만족 못하게 된다. 이 때 고용인 노드는 기존의 고용 계약을 폐기하고 고용주의 패킷을 릴레이 하는 것을 거부한다. 반대로 잔여 에너지양이 충분하거나 적은 수의 패킷이 큐에 있을 때에는 상대적으로 wage 요구가 낮기 때문에 조금 더 많은 노드와 고용계약을 맺으려고 노력을 한다. 이러한 프로세스를 통해 자신의 wage을 주변 노드와 협상하고 최종적으로 적당한 wage이 결정된다. 우리는 SBA가 네트워크 라이프 타임 최적화 문제를 parallel and distributed 한 방식으로 해결 할 수 있음을 증명했다. 또한 다양한 환경에서의 시뮬레이션을 통해 SBA가 최적의 성능에 근접할 수 있음을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 제안하는 SBA 알고리즘이 동작 방식에 대해 설명하고 SBA가 네트워크 라이프 타임을 해결 해줄 수 있음을 수학적으로 보인다. III 장에서는 SBA의 성능을 검증하기 위해 다양한 환경에서 시뮬레이션을 실행하였다. 마지막으로 IV 장에서 논문의 결론을 내린다.

## Ⅱ. Strike and Bargaining 알고리즘

### 2.1. 알고리즘 설명

네트워크 안에 있는 두 개의 노드 $i$ 와 $j$를 고려하자. 노드 $i$는 고용주, 노드 $j$는 고용인이라고 하자. 두 개의 노드는 모두 자신의 패킷을 최종 목적지 (AP)까지 전송을 해야 한다. 패킷을 전송하는 방법은 두 가지가 있다. 하나는 직접 AP로 전송하는 방법이고 다른 하나는 고용인을 고용해서 자신의 패킷을 고용인에게 전달하고 고용인이 AP에 전달하게 하는 방식이다. 첫 번째 방식은 직접 전달하는 비용이 동반되기 때문에 노드는 직접 전송 비용만 지불하면 된다. 하지만 AP까지 거리가 길어지게 되면 직접 전송 비용이 증가하게 된다. 두 번째 방식은 자신의 전송 비용을 줄일 수 있는 대신 고용인에게 wage를 지급해야 한다. 고용주 노드 $i$는 두 가지 방법 중 자신의 비용을 최소화 할 수 있는 최선을 방법을 선택한다. 이런 프로세스를 bargaining 이라고 부른다. 고용인 노드 $j$는 반복적인 bargaining process를 통해 또 다른 고용인을 고용할 수도 있다. 예를 들어 고용인 노드 $j$는 또 다른 노드 $k$에게 자신의 큐에 남아있는 패킷을 대신 전송할 수 있는 계약을 할 수도 있다.

노드 $i$가 노드 $j$를 고용했다고 가정하자. 시간이 지남에 따라 노드 $j$의 잔여 에너지는 줄어들고 반대로 큐에 남아있는 패킷 숫자는 증가하게 된다. 노드 $j$는 자신의 wage에 비해 너무 많은 일을 하고 있다고 생각하게 된다. 최종적으로 노드 $i$의 패킷을 릴레이 하는 것을 거절하고 wage 인상을 요구한다. 이러한 과정을 strike 이라고 부른다. 노드 $j$가 strike을 선언하면 노드 $i$는 bargaining 프로세스를 다시 시작한다. 노드 $i$는 노드 $j$와의 bargaining 프로세스를 통해 노드 $j$의 요구사항이 들어줄 수 있는지 판단한다. 마약 노드 $j$의 요구조항이 가능하다고 판단하면 노드 $i$는 wage을 올려주면서 두 노드 사이의 계약은 지속된다. 하지만 불가능하다고 판단하면 노드 $j$와의 계약을 파기하고 wage 요구조건이 저렴한 또 다른 고용인 노드를 찾게 된다. 이런 strike 과 bargaining 과정들이 자신의 이웃 노드들과 부분적으로 이뤄지고 이러한 전체 프로세스를 strike and bargaining 알고리즘이라고 부른다. Figure 1은 strike and bargaining 알고리즘이 어떻게 진행되는지에 대해 설명을 하고 있다.

SBA에서 가장 중요한 과정은 어떻게 wage을 결정하느냐 이다. 노드 $j$가 strike을 선언을 했을 때 고용주 노드 $i$는 노드 $j$의 wage을 가능한 한 가장 적게 올려주고 싶어 한다. 하지만 wage 제안이 너무 낮을 경우, 어떤 노드도 노드 $i$의 요구를 받아드리지 않는다. 그러므로 노드 $i$의 오퍼는 다음의 조건이 만족할 때까지 증가시켜야한다:



www.dbpia.co.kr

$$W_i = \min_{j \in I^+} \{ W_j + C_{ij} + \epsilon \} \quad (1)$$

위 식에서 $I^+$는 노드 $i$의 고용인 후보군이고 $C_{ij}$는 노드 $i$부터 노드 $j$까지 전달하는 데 필요한 이동 비용이며 $\epsilon$는 perturbation margin이다. 이와는 반대로 노드 $j$의 목적은 자신의 고용주로부터 최대한 많은 wage를 받는 것이다. 하지만 자신의 wage 요구가 너무 클 경우 자신의 고용 상태가 보장되지 않을 수가 있다. 그러므로 노드 $j$의 wage 요구는 다음의 조건이 만족할 때 까지만 증가시킨다.

$$W_j = \min_{i \in J^-} \{ W_i - C_{ij} + \epsilon \} \quad (2)$$

위 식에서 $J^-$는 노드 $j$의 고용주 집합이다. 앞에서도 언급했듯이 각 노드는 고용주가 될 수도 있고, 동시에 고용인이 될 수도 있다. 그러므로 노드 $i$는 다음의 조건이 만족할 때 까지 wage를 증가시킨다.

$$W_i = \min \begin{bmatrix} \min_{i \in I^+} \{ W_j + C_{ij} + \epsilon \}, \\ \min_{i \in I^-} \{ W_j - C_{ji} + \epsilon \} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 수식에서 만약 첫 번째 조건이 선택된다면 노드 $i$는 자신의 패킷을 노드 $j$에게 전달하고 wage $W_i$을 지급한다. 반면에 두 번째 조건이 선택이 된다면 노드 $i$는 노드 $j$의 패킷을 전달하는 것을 중지하고 wage $W_i$을 요구한다. 표 1은 SBA가 어떻게 동작하는 지에 대해 자세히 설명하고 있다. 다음에는 SBA가 네트워크 라이프 타임 문제를 어떻게 해결 할 수 있는지 살펴보도록 한다.

### 2.2. 라이프타임 최대화 문제

연속된 타임 슬랏 $t = 0,1,2,...$를 고려하자. 타임 슬랏 $t$에 노드 $i \in V$는 잔여 에너지 $E_i(t)$를 가지고 있다. 노드가 가지고 있는 초기 잔여 에너지 양은 $E_i(0)$이다. 본 논문에서 편의를 위해 $E_i(0) = 1$로 하기로 한다. $f_{ij}(t)$는 타임 슬랏 $t$에 노드 $i$에서 $j$로 흐르는 패킷 숫자이다. $P_{ij}$와 $P_r$은 하나의 패킷이 노드 $i$에서 $j$로 전송할 때 필요한 전송 파워 소비량 그리고 패킷 하나를 받을 때 필요한 파워 소비량이다.

본 논문에서 네트워크에 있는 노드 중 잔여 에너지가 0이 되는 노드가 생길 때까지의 시간을 네트워크 라이프 타임이라고 정의한다. 네트워크 라이프 타임을 증가시키기 위해서는 각 노드의 에너지 소비량을 최소화 하는 것뿐만 아니라 노드 간 에너지 차이를 줄이는 것도 중요하다. 이를 위해 energy elastic parameter $x$를 이용하여 다음과 같은 최적화 문제를 고려해보자:

$$\min_{f_{ij}(t)} \sum_{i \in V} E_i(t)^{-x} \quad (4)$$

$s.t.$

$$\sum_{j \in V} f_{ij}(t) - f_{ji}(t) = S_i(t), \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) + E_i(t) = E_i(t-1), \quad (6)$$

$$0 \le f_{ij}(t) \le F_{ij}(t) = \frac{E_i(t)}{P_{ij}}, \ i,j \in V, \quad (7)$$

여기서 $S_i(t)$는 노드 $i$가 타임 슬랏 $t$에 전송해야 하는 패킷 숫자이다. AP를 제외한 모든 노드의 $S_i(t)$는 양수이다. 당연히, 네트워크 내에 있는 트래픽은 밸런스 되어야 하기 때문에 $\sum_{i \in V} S_i(t) = 0$가 만족한다. 위 최적화 문제의 목적은 각 노드의 잔여 에너지를 아끼면서 트래픽 요구량 $S_i(t)$를 만족시키는 것이다. 파라미터 $x$는 목적 함수 (4)가 에너지에 따라 얼마나 줄어드는 지를 정해준다. 예를 들어 $x$가 0일 경우 잔여 에너지양에 대한 고려가 전여 되지 않기 때문에 시간의 지나도 라우팅 경로는 변하지 않는다. 반대로 $x$가 커지게 되면 각 노드의 에너지 소비량을 줄어들 뿐만 아니라 각 노드의 에너지도 균형을 이루게 된다.

목적함수 (4)는 (6) 수식에 의해 다음과 같이 정리될 수 있다:

$$E_i(t)^{-x} = \left\{ E_i(t-1) - \sum_{j \in V} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) \right\}^{-x}$$

Taylor series 전개를 통해, 위 식은 다음과 같이 전개할 수 있다.



www.dbpia.co.kr

$$= E_i(t-1)^{-x} + x E_i(t-1)^{-x-1} \sum_{j \in V} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) + x^2 E_i(t-1)^{-x-2} \left\{ \sum_{j \in V} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) \right\}^2 + \ldots$$

만약 다음과 같이 가정한다면

$$E_i(t-1) > x \sum_{j \in V} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) \quad (8)$$

$E_i(t)^{-x}$는 다음과 같이 근사 할 수 있다.

$$E_i(t-1)^{-x} + x E_i(t-1)^{-x-1} \sum_{j \in V} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) \equiv \hat{E}_i(t)^{-x} \quad (9)$$

수식 (9)을 이용하여 목적함수 $E_i(t)^{-x}$ (4)를 $\hat{E}_i(t)^{-x}$로 대체하게 되면 우리는 다음과 같은 비용 최소화 문제를 만들 수 있다.

$$\min_{f_{ij}(t)} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left[ E_i(t-1)^{-x} + \frac{x}{E_i(t)^{x+1}} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) \right] \equiv \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \frac{1}{E_i(t)^{x+1}} (P_{ij} f_{ij}(t) + P_r f_{ji}(t)) = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} f_{ij}(t) \quad (10)$$

$s.t$ (5) and (7)

여기서 비용 계수 $C_{ij}$는 $\frac{P_{ij}}{E_i(t)^{x+1}} + \frac{P_r}{E_j(t)^{x+1}}$이다. 위 문제를 분산적으로 풀기 위해 Lagragian relaxation 방법을 사용한다. 그에 해당되는 Lagragian 함수는:

$$L(f, W) = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (C_{ij} + W_j - W_i) f_{ij}(t) + \sum_{i \in V} S_i(t) W_i \quad (11)$$

$W_i$는 노드 $i$의 Lagragian multiplier이다. Lagragian 함수 (11)를 최소화하기 위한 $f_{ij}(t)$는 다음과 같다.

$$f_{ij}^*(t) = \begin{cases} 0 & C_{ij} + W_j - W_i \geq 0 \\ F_{ij}(t) & C_{ij} + W_j - W_i < 0 \end{cases} \quad (12)$$

이에 대한 Lagragian dual 함수는 다음과 같다:

$$\max q(W) = \max L(f^*, W) \quad (13)$$

위의 dual 문제를 풀기 위해 우리는 나머지 Lagragian multiplier들을 고정시킨 상황에서 $W_i$에 대한 부분적 최적화를 실행하는 비선형 Gauss-Seidal [15] 방법을 사용한다. :

$$W_i = \arg\max_{\alpha \geq 0} q(W_1, \ldots, W_{i-1}, \alpha, W_{i+1}, \ldots, W_{|V|}) \quad (14)$$

함수 $q(W_1, \ldots, W_{i-1}, \alpha, W_{i+1}, \ldots, W_{|V|})$는 $W_i$에 대해 piecewise concave 함수이기 때문에 이 함수의 기울기는 $W_i$가 밑에 두 개 조건 중 하나를 만족할 때 마다 변화한다.

$$W_i = W_j + C_{ij}, \quad i, j \in V \quad (15)$$

$$W_i = W_j - C_{ji}, \quad i, j \in V \quad (16)$$

이러한 포인트를 break point라고 부른다. 최적화된 $W_i$를 선택하기 위해 각 break point마다 기울기를 체크한다. break point를 지날 때마다 기울기는 점점 줄어들게 된다. 기울기가 처음으로 음수가 되는 break point가 최적의 $W_i$가 되게 된다. 그러므로 노드 $i$는 자신의 Lagragian multiplier $W_i$를 다음 조건이 만족할 때 까지 증가시킨다.

$$W_i = \min \begin{bmatrix} \min_{i \in I^+} \{ W_j + C_{ij} + \epsilon \}, \\ \min_{i \in I^-} \{ W_j - C_{ji} + \epsilon \} \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 $I^+$와 $I^-$는 각각 $f_{ij}(t) < F_{ij}(t)$, $f_{ji}(t) > 0$인 노드 $j$의 집합이다. (17) 식은 SBA 알고리즘의 wage 결정과정 (3)과 동일하다.



www.dbpia.co.kr

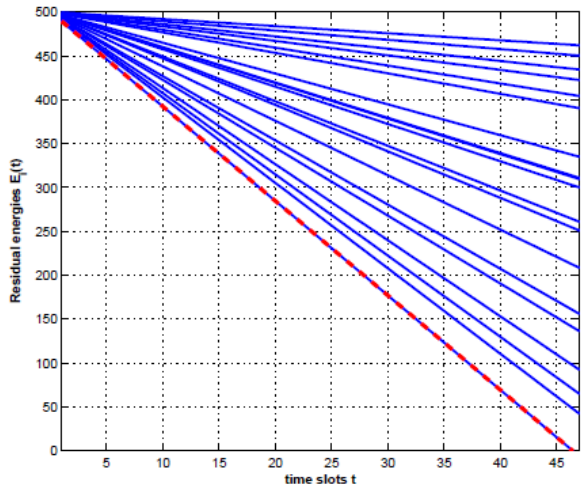


Fig. 2. Residual energies as a function of time slot $t$ ($x = 0$)

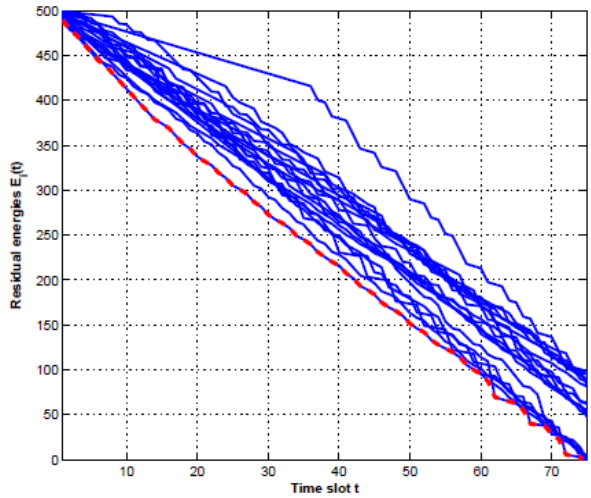


Fig. 3. Residual energies as a function of time slot $t$ ($x = 7$)

Perturbation margin $\epsilon$에 의해 $W_i$는 정확한 최적화 포인트에서 $\epsilon$-최적화 포인트로 수렴하게 된다. 책 [15]의 Proposition 3.9 (pp. 219)에 따르면 위 알고리즘은 Lagragian dual 함수의 최적화 포인트로 수렴하게 되고, convex 최적화 문제의 strong duality 정리에 따라 비용 최소화 문제 (10) 의 최적화 포인트를 찾을 수 있다.

## Ⅲ. 실험 결과

SBA 성능을 검증하기 위해 우리는 다음과 같은 환경에서 시뮬레이션을 실행하였다. 노드 $i$와 $j$ 사이의 거리가 $d_{ij}$이고 path-loss 상수가 $\alpha$일 때 에너지 소비 모델은$P_{ij} = 0.8 + 0.2\, d_{ij}^{\alpha}$ J/bit 와 $P_r = 1$ J/bit 이다[16]. 본 시뮬레이션에서는 $\alpha$는 4로 고정한다. 각 노드의 최초 잔여 에너지 량은 500 J이고 perturbation margin $\epsilon$은 0.0001로 하였다.

Fig. 2-4는 네트워크 라이프 타임의 energy elastic parameter $x$에 대해 얼마나 영향을 받는지 보여준다. 네트워크 안에는 20개의 노드 (AP 포함)가 존재 하고 파란 색 선들은 각 노드들의 잔여 에너지양이다. 빨간 색 점선은 매 타임 슬랏 중 잔여 에너지가 최소가 되는 노드의 에너지를 표시한 것이다. $x = 0$ (Fig. 2) 일 때는 비용 함수 (10)이 잔여 에너지양과 관계가 없어진다. 그러므로 잔여 에너지양이 라우팅 결과에 영향을 주지 못하고 에너지 소비가 최소가 되는 방향으로 라우팅이 결정되게 된다. 그로 인해 AP근처에 있는 노드의 에너지가 급속도로 빨리 줄어 라이프 타임에 짧은 것을 확인할 수 있다. $x$가 증가하게 되면 비용함수가 잔여에너지양을 고려하기 때문에 라우팅 결정 시 에너지 균형을 고려하게 된다. 특히 $x$가 커질수록 각 노드의 잔여에너지 양이 점점 비슷해짐을 그림 3과 4를 통해 확인 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 $x = 50$ (Fig. 4) 일 때 네트워크 라이프 타임이 $x = 7$ 일 때 보다 라이프타임이 더 짧아지게 된다. II장에서 비용 최소화 문제를 조건 (8)이 성립한다는 가정 아래 만들었다. 하지만 $x$가 너무 커지게 되면 에너지가 충분히 남아있음에도 불구하고 조건 (8)이 만족하지 않는 경우가 생길 수 있으며 그로 인해 일부 노드가 잔여 에너지가 적음에도 불구하고 릴레이를 계속 해주게 된다. 그로 인해 전체 네

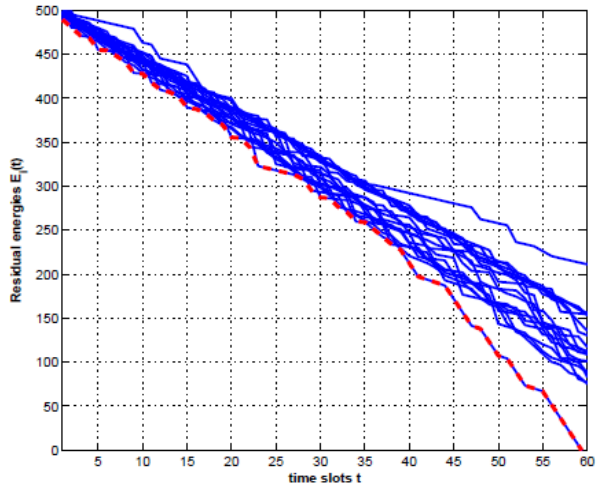


Fig. 4. Residual energies as a function of time slot $t$ ($x = 50$)



www.dbpia.co.kr

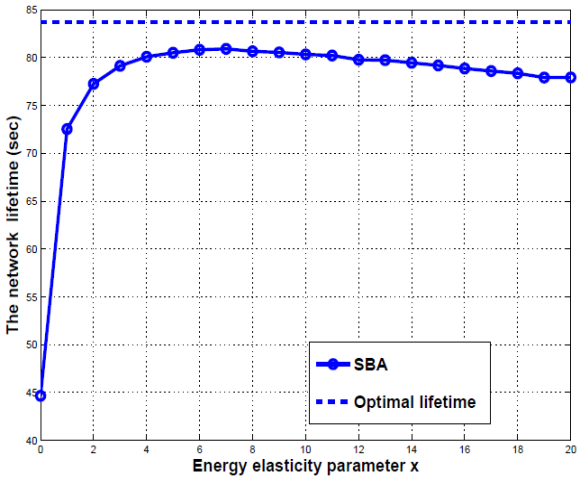


Fig. 5. The network lifetime as a function of energy elastic parameter $x$

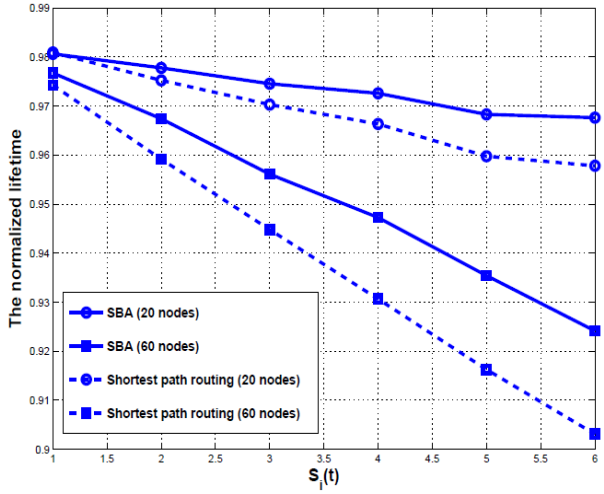


Fig. 6. The normalized lifetime as a function of $S_i(t)$

트워크 라이프 타임이 짧아지게 된다 (Fig. 4). Fig. 5는 $x$가 변할 때 네트워크의 평균 라이프 타임이 어떻게 변하는지 보여주고 있다. 그래프의 모든 포인트는 100개의 서로 다른 토폴로지의 평균값이다. Fig. 5에서 보듯이 $x$가 7보다 커지게 되면 라이프 타임이 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 최적의 $x$는 네트워크 사이즈, 최초 잔여 에너지 량 등 여러 가지 들에 의해 결정된다. 본 논문에서는 최적의 $x$에 대해 결정하는 것은 포함하지 않는다. 대신, 다음 시뮬레이션에서는 $x$은 7로 고정을 하였다.

Fig. 6에서는 네트워크 라이프 타임이 $S_i(t)$에 의해 어떻게 변화하는 것에 대해 보여주고 있다. 각 포인트는 그림 5처럼 서로 다른 100개의 토폴로지의 평균값이다. $S_i(t)$는 각 노드가 매 타임 슬랏에 보내야 하는 패킷 숫자이기 때문에 $S_i(t)$는 네트워크 라이프 타임에 중요한 영향을 끼치게 된다. SBA의 성능을 최적화 된 라이프 타임과 비교를 위해 SBA의 라이프 타임을 최적의 라이프 타임으로 정규화 시키고 이를 normalized lifetime이라 정의하였다. SBA의 성능을 평가하기 위해 동일한 비용 함수 (10) 을 가지고 shortest path routing을 실행한 [9] 논문과 비교를 하였다. 만약 AP를 제외한 $S_i(t)$가 1로 동일할 때 shortest path routing과 SBA의 성능이 동일함을 알 수 있다. 우리의 비용 최적화 문제는 모든 노드의 $S_i(t)$가 1일 경우에는 shortest path routing 을 찾는 문제와 동일해 지기 때문이다. 하지만 $S_i(t)$가 증가할수록 두 그래프 사이의 차이가 증가함을 볼 수 있다. shortest path routing은 $S_i(t)$를 고려하지 않고 비용이 최소화가 되는 경로를 선택한다. 그에 반해 SBA는 모든 노드의 $S_i(t)$가 만족되는 feasible region 안에서 최적화된 라우팅 경로를 선택한다.

Fig. 6에서는 노드 숫자가 SBA에 어떤 영향을 미치는 지에 대해서도 설명을 하고 있다. 노드 숫자가 많아지게 될수록 normalized lifetime이 점점 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 라이프 타임 최대화 문제를 parallel and distributed 한 형태로 풀 때 생기는 손실이다. 노드 숫자가 많아지게 되면 다양한 경우의 수가 존재하게 되고 이를 parallel and distributed 한 형식으로 찾는 것에는 어느 정도 한계가 존재하게 된다. 이로 인해 최적의 라이프 타임과의 성능 차이가 점점 커짐을 확인 할 수 있다. 하지만 shortest path routing과 비교를 했을 때 상대적으로 성능 차이가 적게 남을 볼 수 있다.

## Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 에너지 효율적 라우팅 경로를 찾는 문제를 parallel and distributed 한 형식으로 해결 할 수 있는 strike and bargaining 알고리즘을 제안하였다. 우리는 소스 노드와 릴레이 노드 사이의 관계는 고용주와 고용인 사이의 갈등 관계와 비슷함을 찾았다. 만약 하나의 노드가 어떠한 행동을 실행하면 다른 노드는 그에 상응하는 행동을 하게 된다. 우리는 strike and bargaining 알고리즘을 통해 이런 고용주와 고용인의 관계를 무선 센서 네트워



www.dbpia.co.kr

크에 적용시켰다. 여러 번의 strike와 bargaining 프로세스를 거쳐서 각 노드는 자신의 유틸리티를 최대화 할 수 있는 최선의 선택을 고르게 된다. 우리는 이러한 결과가 네트워크의 라이프 타임을 최대화 하는 것과 동일함을 분석과 시뮬레이션을 통해 보였다. 본 논문은 하나의 access point (AP)가 있는 경우에 대해서만 다루고 있다. 하지만 여러 개의 AP가 존재하는 상황에서도 적용이 가능하다.

## References


[1] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey", *Elsevier Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330, Aug, 2008.

[2] I. Dietrich and F. Dressler, "On the lifetime of wireless sensor networks," *ACM Trans. Sensor Networks*, vol. 5, no. 11 Feb, 2009.

[3] J. Monks, J.-P. Ebert, W.-M. W. Hwu and A. Wolisz, "Energy saving and capacity improvement potential of power control in multi-hop wireless networks," *Computer Networks*, vol. 41, no. 3, pp. 313-330, Feb, 2003.

[4] Q. Gao, K. J. Blow, D. J. Holding, I. W. Marchall and X. H. Peng, "Radio range adjustment for energy efficient wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 75-82, Jan, 2006.

[5] Z. Shelby, C. P.-Raez, H. Karvonen and J. Haapola, "Energy Optimization in Multihop Wireless Embedded and Sensor Networks," *Int. J. Wireless Inform. Networks*, vol. 12, no. 1, pp.11-21, Jan, 2005.

[6] C. K. Toh, "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, no. 6, pp. 138-147, Jun. 2001.

[7] R. Jäntti and S. L. Kim "Joint data rate and power allocation for lifetime maximization in interference limited ad hoc networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 5, pp. 1086-1094, May 2006.

[8] Y. Chen and Q. Zhao, "On the lifetime of wireless sensor networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 976-978, Nov. 2005.

[9] R. Madan and S. Lall, "Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 8, pp. 2185-2193, Aug. 2006.

[10] J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum life routing in wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 12, no. 4, pp. 609-619, Aug. 2004.

[11] M. Marta and M. Cardei, "Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks," *Elsevier Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 542-555, Oct, 2009.

[12] C. Song, M. Liu, J. Cao, Y. Zheng, H. Gong and G. Chen, "Maximizing network lifetime based on transmission range adjustment in wireless sensor networks," *Elsevier Computer Commun.*, vol. 32, no. 11, pp. 1316-1325, Jul. 2009.

[13] Y. Yang, M. I. Fonoage and M. Cardei, "Improving lifetime with mobile wireless sensor networks," *Elsevier Computer Commun.*, vol. 33, no. 4, pp. 409-419, Mar, 2010.

[14] J. H. Jung, "A study on energy efficient routing algorithms for wireless sensor networks," *Master thesis, Dept. EEE, Yonsei Univ.*, Seoul, Korea, Feb. 2010.

[15] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, *Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods*, Athena Scientific, 1997.

[16] Texas Instruments, "2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver," from : http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf




www.dbpia.co.kr

**고 승 우** (Seung-Woo Ko)

2006년 2월 연세대학교 전기전자공학부 공학사
2007년 8월 연세대학교 전기전자공학부 공학석사
2007년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정
<관심분야> Information theory, wireless multihop network, radio resource management, mobility control

**정 진 홍** (Jin Hong Jeong)

2008년 2월 연세대학교 전기전자공학부 공학사
2010년 2월 연세대학교 전기전자공학부 공학석사
2010년 3월~현재 삼성전자 무선사업부 선임연구원
<관심분야> Radio resource management, mobility control, wireless sensor network, robotic network

**김 성 륜** (Seong-Lyun Kim)

1994년 8월 KAIST 공학박사
1994년~1998년 ETRI 이동통신기술연구단 선임 연구원
1998년~2000년 스웨덴 KTH Dept. Signal, Sensor & System 조교수
2000년~2004년 ICU 조교수, 부교수
2004년~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수, 교수
<관심분야> Wireless multihop networks, radio resource management, information theory, robotic network, economics of wireless systems



www.dbpia.co.kr