

이동 애드혹 네트워크에서 생존시간 최대화를 위한 에너지 인지 소스 라우팅 프로토콜

Energy-aware Source Routing Protocol for Lifetime Maximization in Mobile Ad Hoc Networks

최 현 호*
(Hyun-Ho Choi)

요 약

이 논문에서는 이동 애드혹 네트워크 환경에서 네트워크 생존시간을 최대화하기 위한 에너지 인지 기반 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안 라우팅 프로토콜은 소스 라우팅 방식을 기반으로 하며, 이동 노드의 송수신 전력 소모량과 배터리 잔량을 소스 노드와 목적지 노드 종단간 고려하여 생존시간이 가장 긴 경로를 선택한다. 이를 위한 새로운 라우팅 비용을 제안하며, 경로 탐색시 발생하는 제어 패킷 오버헤드를 최소화하는 라우팅 프로토콜을 설계한다. 시뮬레이션 결과 제안방식은 전송 홉 수, 전송률, 에너지 소비량 측면에서 기존 방식과 비슷한 수준의 성능을 보이면서, 생존시간 측면에서는 기존 방식 대비 약 20%의 성능향상을 보여준다.

Abstract

In this paper, we propose an energy-aware source routing protocol for maximizing a network lifetime in mobile ad hoc network environments. The proposed routing protocol is based on the source routing and chooses a path that maximize the path lifetime, by considering both transmit/receive power consumption and residual battery power in the mobile nodes from the perspective of source-destination end-to-end. This paper proposes a new routing cost and designs a new routing protocol for minimizing the control packet overhead occurred during the route discovery. Simulation results show that the proposed scheme has similar performances to the conventional routing schemes in terms of the number of transmission hops, transmission rate and total energy consumption, but achieves the performance improvement of 20 percent with respect to the lifetime.

Key words : Routing, energy-aware, lifetime, ad hoc network

I. 서 론

이동 애드혹 네트워크(Mobile Ad Hoc Network; MANET)는 중앙 관리되는 인프라 없이 이동 무선

노드들만의 집합으로 구성되어 멀티홉 방식으로 서로 간에 패킷을 교환하는 네트워크로, 네트워크에 자율성과 융통성을 부여한 신개념 네트워크이다. 이동 애드혹 네트워크의 구성 노드들은 전파 도달

† 본 연구는 한경대학교 2011년도 학술연구구성비의 지원에 의한 것임

* 주저자 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 교수

† 논문접수일 : 2012년 5월 2일

† 논문심사일 : 2012년 6월 12일

† 게재확정일 : 2012년 6월 15일

거리가 제한되므로 중계 노드로서 데이터를 전달하는 역할을 수행하며, 기본적으로 배터리 전력을 사용하여 에너지의 공급이 일정치 않은 특성을 갖는다[1].

특히 노드의 배터리 소진은 링크 연결을 깨뜨리며 네트워크의 생존성(survivability)에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 네트워크의 생존시간을 증대시키고 연결성을 보장하기 위해서는 노드의 에너지 소비를 고려한 전송경로의 선택이 필수적이다. 지금까지는 일반적으로 가장 짧은 연결 홉 수를 갖거나 링크의 전송률이 높은 경로를 선택하였으나, 이러한 라우팅 방식은 노드가 송수신에 소비하는 전력량이나 원래 갖고 있던 배터리 잔량을 고려하지 않아 네트워크의 생존시간 측면에서는 좋은 성능을 보여주지 못한다[2]. 따라서 노드의 사용 전력량과 배터리 잔량을 고려한 다양한 에너지 효율적인 라우팅 방식들이 제안되었다[2-5]. 이 방식들은 네트워크 생존시간의 증대를 위하여 노드의 소모 전력량과 배터리 잔량을 조합하여 라우팅 비용을 설계하고 이를 기반으로 전체 라우팅 비용을 최소화하는 경로를 최종 선택한다.

멀티홉 연결시 소스 노드와 목적지 노드 사이에 존재하는 중계 노드의 경우 패킷을 수신하여 전달하는 역할을 수행하므로, 두개의 송수신 링크를 가지며 각각의 링크에서 수신하고 송신하는데 전력 소모가 발생한다. 다시 말해, 전송 경로상의 하나의 노드를 놓고 보았을 때 이 노드에서 소모되는 전력 값은 수신 링크와 송신 링크 모두와 관련된다. 하지만 기존의 저전력 라우팅 방식들은 한 노드로부터 연결 가능한 다른 한 노드까지의 링크에서 소모되는 전력만을 고려할 뿐, 연결된 노드가 추가적으로 소모해야 하는 다음 송신링크의 전력을 동시에 고려하지 않는다. 아울러 기존 방식은 자신의 배터리 잔량만을 고려하여 라우팅 비용을 계산할 뿐, 연결하려는 노드의 배터리 잔량을 같이 고려하지 않는다[4-6]. 이러한 방식의 중계노드 선택은 한 번에 한쪽 링크에서 발생하는 비용만을 고려하므로 실제 경로 상에서 멀티홉 송수신에 소모되는 노드의 모든 전력 소비량을 엄밀히 반영하지 못하여 생존시간을 최대화하는 최적 라

우팅 경로를 찾기 어렵다[7].

제안 라우팅 방식은 네트워크 생존시간을 최대화하는 라우팅 경로를 찾기 위하여 연결 가능한 경로의 전체 링크에서 소모되는 송수신 전력량과 연결된 노드의 모든 배터리 잔량을 고려한다. 이를 위해 제안방안은 각 노드가 라우팅을 위한 제어 패킷을 네트워크상에 플러딩(flooding)하고 필요한 정보를 수집하여 목적지 노드에게 전달하는 소스 라우팅 방식을 채택한다. 또한 소스 라우팅에서 발생하는 정보 전달 오버헤드(overhead)를 최소화하기 위하여 효과적인 라우팅 비용 값을 설계하고, 이를 기반으로 네트워크 생존시간을 최대화하는 경로를 선택하는 효율적인 라우팅 프로토콜을 함께 제안한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안 라우팅 프로토콜과 관련 기존 연구들에 대해 서술하고, 3장에서는 제안하는 라우팅 프로토콜에 대하여 자세히 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제안 라우팅 방식과 기존 라우팅 방식의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 라우팅 프로토콜

1. 애드혹 라우팅 프로토콜

애드혹 라우팅 프로토콜은 크게 Proactive (Table-Driven) 라우팅과 Reactive (On-Demand) 라우팅 방식으로 나뉜다. Proactive 라우팅 프로토콜은 유선에서 사용하는 라우팅 프로토콜을 무선 환경에서 사용할 때의 자연스러운 확장 버전이라고 볼 수 있다. Proactive 라우팅에서 각 노드는 네트워크상의 다른 노드와의 연결을 위한 최신 정보를 기록하기 위해 하나 이상의 라우팅 테이블을 유지 관리한다. 테이블의 각 행은 어떤 노드나 서브넷에 도달하기 위해 전달해야 할 다음 홉에 대한 정보와 함께 이 경로에 대한 비용을 저장한다. 토폴로지 변경에 대한 정보를 네트워크의 모든 노드에게 어떻게 전달하느냐에 따라 table-driven 라우팅 프로토콜의 종류가 달라지는데 현재 다양한 proactive 라우팅 프로토콜이

제안되어 있다[1].

반면 reactive 라우팅 프로토콜은 on-demand 라우팅 프로토콜이라고도 불리는데, 이는 말 그대로 최신 토폴로지 정보를 라우팅 테이블을 통해 유지 관리하지 않고 필요에 따라 그때그때 경로를 찾아서 쓰는 방식을 따른다. 대표적인 reactive 라우팅 프로토콜로는 Dynamic Source Routing (DSR)[8], ad hoc on-demand distance vector routing (AODV)[9], temporally ordered routing algorithm (TORA)[10] 등이 있다. 본 논문에서 제안하는 에너지 인지 소스 라우팅 프로토콜은 이러한 reactive 방식의 라우팅 프로토콜에 속하며 DSR 프로토콜을 개선한 것이므로 DSR의 동작 방식에 대해 간략히 소개한다.

DSR은 가장 일반적으로 사용되는 reactive 라우팅 프로토콜로, DSR에서는 한 노드가 전송 경로를 찾고자 할 때 route request 메시지를 주변 이웃 노드에게 방송한다. 이를 수신한 이웃 노드는 route request 패킷의 헤더에 자신의 주소 정보를 추가하여 다시 주변 노드에게 방송을 한다. 이러한 과정을 통해 route request 메시지가 목적지 노드나 목적지 노드로의 경로를 알고 있는 노드에게 전달되면, route request 헤더에 저장되어 있는 경로 정보를 따라 역으로 소스 노드에게 route reply 메시지를 전송함으로써 소스 노드에게 목적지 노드까지의 발견된 경로 정보를 알려주게 된다. 이와 같이 라우팅 경로를 찾기 위한 route request와 같은 제어 패킷에 소스-목적지 사이의 경로 정보를 모두 저장하는 방식을 소스(source) 라우팅이라고 부른다. 일반적으로 DSR은 목적지 노드에 가장 먼저 도착한 route request 패킷의 경로를 선택하여 가장 짧은 홉 수를 갖는 라우팅 경로를 사용한다.

2. 저전력 라우팅 프로토콜

제안 라우팅 프로토콜의 목적인 생존시간 최대화와 관련되어 기존에 제안된 대표적인 저전력 라우팅 프로토콜에 대해 설명한다.

Minimum Power Routing (MPR)[2]은 소스에서 목적지로 패킷을 전송하는데 소모되는 총 전력량(비

트당 에너지)을 최소화하는 것을 목적으로 다음과 같은 라우팅 전략을 사용한다.

$$\min \sum_{i \in path} P(i, i+1) \quad (1)$$

여기에서 $P(i, i+1)$ 은 노드 i 가 노드 $i+1$ 에게 송신할 때 사용하는 전력 값으로 링크 비용에 해당한다. 링크별 전력 값 P 는 노드가 고정된 송신 파워를 사용하는 경우에는 패킷을 송신하는데 걸리는 시간에 비례하여 결정되며, 노드가 송신 파워를 동적으로 변경할 수 있는 경우에는 링크의 물리적인 거리에 따른 경로 손실(path loss) 값을 기반으로 결정된다.

Minimum Battery Cost Routing (MBCR)[3]은 노드의 서로 다른 배터리 잔량을 고려하여 배터리 잔량의 역수를 라우팅 비용으로 정의하고, 다음과 같이 라우팅 경로상의 모든 노드들의 배터리 비용의 합을 최소화하는 것을 목적으로 경로를 선택한다.

$$\min \sum_{i \in path} \frac{1}{R_i} \quad (2)$$

여기에서 R_i 는 노드 i 의 배터리 잔량을 나타낸다. 결국 MBCR 방식은 배터리 잔량의 총합이 가장 큰 경로를 선택하게 함으로써 선택된 전송 경로의 생존시간을 증대시키는 효과가 있다.

Min-Max Battery Cost Routing (MMBCR)[2, 3]은 MBCR의 라우팅 비용을 그대로 사용하면서 최종 경로 선택 전략만을 변경하여 경로 상에서 가장 작은 배터리 잔량을 가진 노드를 피하도록 다음과 같이 전송경로를 결정한다.

$$\min \max \left\{ \frac{1}{R_i} \right\}, i \in path \quad (3)$$

MBCR은 각 노드의 배터리 잔량을 공평하게 해주는 효과를 가져다줌으로써 전체 네트워크 생존시간을 증대시킨다.

Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR)[3]은 MBCR과 MMBCR을 결합하여 사용하는 방식으로 경로상의 모든 노드의 에너지 잔량이 정해진 임계값보다 큰 경우에는 MBCR을 적용하여 전송에 소비되는 전체 전력량을 감소시키는 전략을 취하고, 경로상의 하나의 노드라도 에너지 잔량이 임

계치보다 떨어지는 경우에는 MMBCR을 사용하여 경로 생존시간을 최대화하는 전략을 취한다.

$$\begin{cases} \min \sum_{i \in path} \frac{1}{R_i} & \text{If } \forall P_i > \text{threshold} \\ \min \max \left\{ \frac{1}{R_i} \right\} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

이러한 CMMBCR은 기존 두 전략의 장점을 결합한 것으로 적절한 임계값(threshold)을 선택함으로써 네트워크 에너지 소비 효율과 생존시간을 동시에 증대시킬 수 있다.

Power-Aware Source Routing (PASR)[4]과 Energy Aware Routing (EAR)[5]은 전송 링크에서 소비되는 전력과 노드의 배터리 잔량을 동시에 고려하여 다음과 같은 전략으로 라우팅 경로를 결정한다.

$$\min \sum P_{ij}^\alpha \left(\frac{1}{R_i} \right)^\beta \quad (5)$$

여기에서 α 와 β 는 양수를 갖는 가중치이다. 따라서 사용하는 라우팅 비용은 링크 ij 의 생존시간의 역수에 해당되며, 전송 경로 상의 모든 링크의 생존시간의 합을 최대화 하는 경로를 최종 선택하게 된다. 두 라우팅 방식은 각 링크의 생존시간을 라우팅 비용으로 고려하므로 기존에 소비 전력량이나 배터리 잔량만을 고려한 라우팅 방식 대비 보다 생존시간 측면에서 보다 나은 성능을 제공한다.

III. 제안 라우팅 프로토콜

제안 라우팅 방식은 기본적으로 기존 DSR 프로토콜의 동작을 기반으로 하며 PASR이나 ESR과 같이 전송 경로를 구성하는 각 링크에서 소모되는 송수신 전력 값과 각 노드의 배터리 잔량 값을 동시에 고려한다. 하지만 제안 방안의 경우 각 노드에서 소모되는 송수신 전력 값이 연결된 두 링크의 전송률을 기반으로 계산되어 멀티홉 패킷 전송시 발생하는 실제 전력소모가 전송 경로 결정에 반영된다. 이를 기반으로 최소 생존시간을 갖는 노드를 경로 상에 최대한 포함시키지 않도록 하는 min-max 라우

팅 전략을 채택하여 네트워크 생존시간을 최대화한다. 여기에서는 고려하는 네트워크 생존시간과 환경을 정의하고 제안하는 라우팅 비용과 프로토콜 동작절차에 대해서 자세히 설명한다.

1. 목적 함수 및 환경 변수

제안 라우팅 방식은 전송경로의 생존시간을 최대화하는 것을 목적으로 한다. 본 논문에서 전송경로의 생존시간은 경로를 구성하는 노드 중 배터리가 소진되는 첫 번째 노드가 발생할 때까지의 시간으로 정의된다. 따라서 <그림 1>과 같이 소스 노드(S)와 목적지 노드(D)를 연결하는 하나의 경로에 대하여 생존시간(L_{e2e})은 다음과 같이 정의된다.

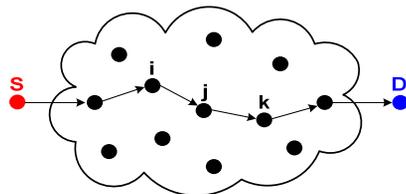
$$L_{e2e} = \min \{L_S, \dots, L_i, L_j, L_k, \dots, L_D\} \quad (6)$$

여기에서 L_j 는 전송경로 상의 노드 j 의 생존시간을 의미한다. 따라서 제안 라우팅 방식의 목적함수는 다음과 같이 L_{path} 를 최대화 하는 S-D간 경로 (벡터 \mathbf{P})를 찾는 것이 된다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} L_{e2e} &= \max_{\mathbf{P}} \min \{L_S, \dots, L_i, L_j, L_k, \dots, L_D\} \\ \text{s.t. } \mathbf{P} &= [S, \dots, i, j, k, \dots, D] \end{aligned} \quad (7)$$

애드혹 네트워크 환경에서 라우팅 설계를 위한 환경 변수를 다음과 같이 정의한다.

- D_{req} : 전송하는 패킷의 크기 (bits)
- P_{tx}/P_{rx} : 각 노드에서 단위 시간당 송신/수신하는데 드는 일정한 에너지 (watt)
- R_{ij} : 노드 i 에서 노드 j 로의 링크 전송률 (bps)
- E_j : 노드 j 의 배터리 잔량 (Joul)
- L_j : 노드 j 의 생존시간 (second)
- C_j : 노드 j 에서 발생하는 라우팅 비용(cost)



<그림 1> 애드혹 네트워크 라우팅 환경
<Fig. 1> Ad hoc network routing environments

2. 라우팅 비용 설계

제안 라우팅에서 사용하는 라우팅 비용(C_j)을 도출한다. 먼저 전송경로를 통해 D_{req} 크기의 패킷을 전송한다고 할 때 경로상의 노드 j 에서 필요로 하는 패킷 수신시간(T_j^{rx})과 송신시간(T_j^{tx})은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$T_j^{rx} = \frac{D_{req}}{R_{ij}}, \quad T_j^{tx} = \frac{D_{req}}{R_{jk}} \quad (8)$$

또한 노드 j 에서 D_{req} 크기의 패킷을 전송할 때 소모되는 수신에너지(E_j^{rx})와 송신에너지(E_j^{tx})는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$E_j^{rx} = P_{rx} T_j^{rx}, \quad E_j^{tx} = P_{tx} T_j^{tx} \quad (9)$$

따라서 식 (8)과 (9)로 부터 노드 j 에서 소모되는 전체 송·수신 에너지의 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E_j^{rx/tx} &= E_j^{rx} + E_j^{tx} \\ &= \frac{P_{rx} D_{req}}{R_{ij}} + \frac{P_{tx} D_{req}}{R_{jk}} = \left(\frac{P_{rx}}{R_{ij}} + \frac{P_{tx}}{R_{jk}} \right) D_{req} \end{aligned} \quad (10)$$

노드 j 가 갖고 있는 배터리 잔량 E_j 과 식 (10)을 고려하여 노드 j 가 멀티홉 전송에 참여할 때 노드 j 의 생존시간은 다음과 같이 결정된다.

$$L_j = \frac{E_j}{E_j^{rx/tx}} = \frac{E_j}{\left(\frac{P_{rx}}{R_{ij}} + \frac{P_{tx}}{R_{jk}} \right) D_{req}} \quad (11)$$

따라서 노드 j 의 선택에 따른 라우팅 비용은 노드 j 의 생존시간의 역수로 결정가능하며 이때 D_{req} 값은 모든 경로에서 동일하므로 생략 가능하므로, 제안하는 라우팅 비용은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_j &= \frac{1}{L_j} = \frac{\left(\frac{P_{rx}}{R_{ij}} + \frac{P_{tx}}{R_{jk}} \right) D_{req}}{E_j} \\ \rightarrow \therefore C_j &= \frac{P_{rx} R_{jk} + P_{tx} R_{ij}}{E_j R_{ij} R_{jk}} \end{aligned} \quad (12)$$

즉, 제안 라우팅 비용은 각 노드의 배터리 잔량과 각 노드에 연결되는 수신링크와 송신링크의 전송률에 의존한다. 기존 라우팅 비용의 경우 노드 간 하

나의 링크 상황에 따라 결정되는 에너지 소모량을 고려한 각 링크의 생존시간을 사용한 반면, 제안 라우팅 비용의 경우 각 노드에 연결된 두 송수신 링크의 전송률에 따라 소모되는 노드의 모든 에너지 소모량을 고려한 각 노드의 생존시간을 사용한다.

아울러, 라우팅 비용 계산식에 다음과 같은 제약 사항을 포함할 수 있다.

$$\text{If } E_j < E_{threshold} \text{ or } R_{ab} < R_{threshold} \text{ then } C_j = \infty \quad (13)$$

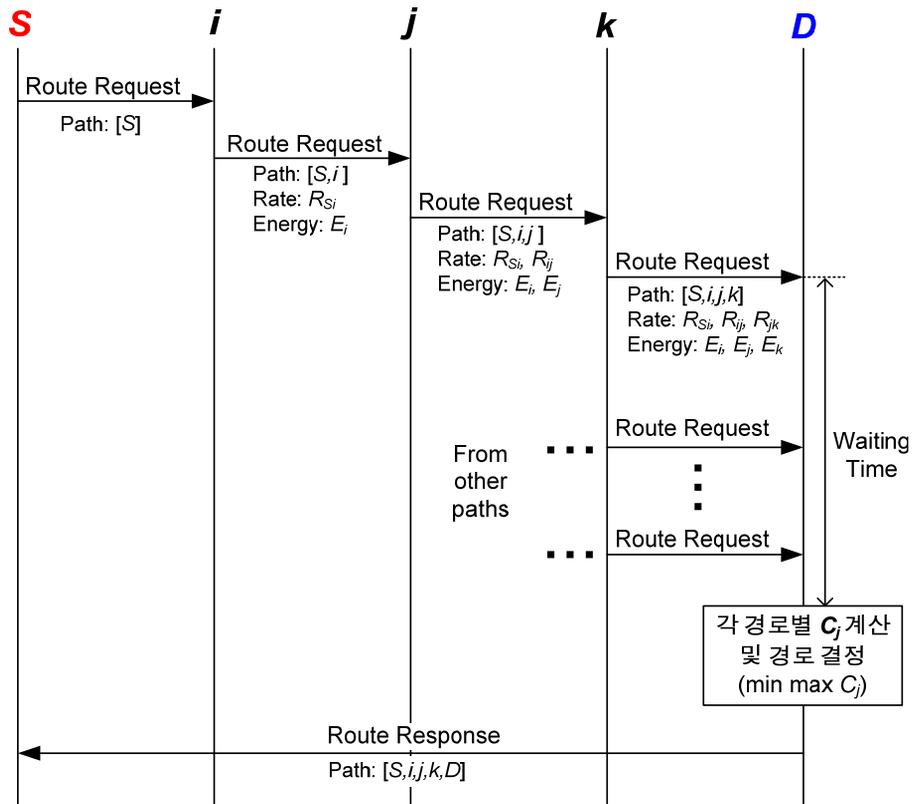
즉, 노드의 에너지 잔량이 사전에 정해진 임계치보다 작거나 두 노드 사이의 링크 전송률이 정해진 임계치보다 작은 경우에는 라우팅 비용 값을 무한대로 설정하여 해당 노드를 경로 상에 포함되지 않도록 할 수 있다.

3. 라우팅 프로토콜 동작

제안 라우팅 프로토콜은 on-demand 라우팅 방식을 기반으로 하여 기존의 DSR과 같은 소스 라우팅 프로토콜에 쉽게 접목이 가능하다. 단지, 제안 방안의 경우 라우팅 비용 계산에 필요한 노드의 에너지 잔량(E_j) 정보와 링크 전송률(R_{ij}) 정보가 필요하므로 라우팅 시에 이들 정보가 새롭게 추가된다. 이외에 라우팅에 사용되는 제어 패킷의 종류 및 기능, 경로 탐색 및 유지를 위한 시그널링 절차 등은 앞 장에서 설명한 DSR 프로토콜의 것을 그대로 사용가능하다. 따라서 제안 라우팅 프로토콜은 기존 DSR 프로토콜과 호환성을 가지며 약간의 변경을 통해서 쉽게 구현 가능하다는 장점을 갖는다.

<그림 2>는 제안하는 라우팅 프로토콜의 동작 절차를 보여주며, 다음과 같은 절차에 따라 동작한다.

- 1) 소스 노드는 목적지 노드로의 전송 경로를 찾기 위해 먼저 route request 패킷을 발송한다. 이 route request 패킷에는 패킷이 거쳐 온 경로(path) 정보, 링크 전송률(rate) 정보, 노드 에너지 잔량(energy) 정보가 포함되는데, 소스 노드는 일단 경로 정보로 자신의 ID(identity)만을 포함하여 route request 패킷을 발송한다.
- 2) 발송되는 route request 패킷을 수신하는 모든 노드는 자신의 ID를 경로 정보에 추가하고,



〈그림 2〉 제안하는 라우팅 프로토콜의 동작절차
 (Fig. 2) Operational flow of the proposed routing protocol

패킷을 수신하면서 측정된 링크 quality 값을 기반으로 링크 전송률 값을 계산하여 전송률 정보에 추가하고, 자신의 에너지 잔량을 에너지 정보에 추가한다. 이후 추가된 정보를 포함한 route request 패킷을 다시 방송한다.

- 3) 이러한 방법으로 route request를 수신하는 모든 노드는 해당하는 세 가지 정보를 추가하면서 route request 패킷을 전체 네트워크로 플러딩 함으로써, 가능한 전송 경로마다 라우팅 결정에 필요한 링크 전송률 정보와 노드 에너지 잔량 정보를 축적하게 된다.
- 4) 목적지 노드는 route request 패킷을 수신하면 더 이상 route request 패킷을 방송하지 않고, route request 패킷 내에 포함된 링크 전송률과 노드 에너지 잔량 정보를 바탕으로 식 (12)에

따라 해당 경로의 라우팅 비용을 결정한다.

- 5) 목적지 노드는 첫 route request 패킷을 수신한 뒤 일정 시간 동안에 추가적으로 수신된 route request 패킷들의 정보만을 가지고 최종 경로를 선택하게 된다. 전송 경로의 생존시간을 최대화하기 위하여 수신된 route request 패킷마다 계산된 라우팅 비용 값을 이용하여 min max C_i 전략에 따라 각 경로의 라우팅 비용을 최소화 하는(즉, 각 경로의 생존시간을 최대화 하는) 전송 경로를 최종 선택한다.
- 6) 목적지 노드가 최종 경로를 선택하면 해당 경로 정보가 포함된 route response 패킷을 소스 노드에게 전송하여 이를 알려준다. 이때 route response 패킷은 결정된 최종 경로정보의 역순에 따라 소스 노드에게 전달된다.

IV. 성능 평가

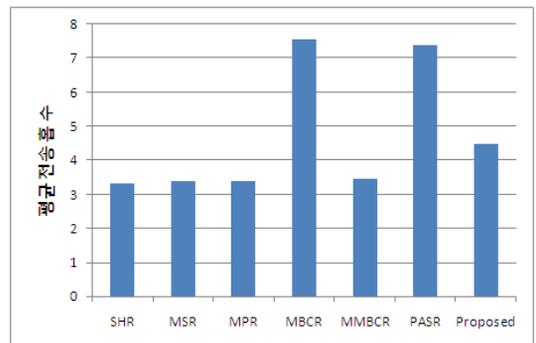
제안 방안과 성능 비교를 위하여 앞에서 설명한 MPR, MBCR, MMBCR, PASR 외에 가장 짧은 홉 수를 갖는 경로를 선택하는 Shortest Hop Routing (SHR)과 경로 상의 각 링크 전송률의 총 합이 가장 큰 경로를 선택하는 Max Sum Rate (MSR) 라우팅 방식을 추가적으로 고려하였다[1]. MATLAB을 사용하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였고, 각 결과는 1000번의 수행에 대해 평균을 취한 값이다.

<표 1>은 사용한 시뮬레이션 파라미터를 보여준다. 20개의 노드가 1000×1000 m의 정사각형 영역에서 랜덤하게 설치되며 이들 중 소스 노드와 목적지 노드도 랜덤하게 선택된다[4]. 각 노드가 갖고 있는 배터리 잔량 값은 실제 다수 노드의 배터리 상태를 고려할 때 일반적으로 normal 분포를 따른다고 볼 수 있으므로 평균 500 Joul과 표준편차 100 Joul을 갖는 normal 분포를 따르도록 설정하였다. 1024×10 바이트의 패킷을 23 dBm의 고정 송신 파워를 사용하여 전송한다고 할 때 각 링크 상태에 따라 해당 노드가 송수신해야 하는 시간이 결정되도록 하였다. 이때 모든 노드가 송수신하는데 드는 초당 전력 소비량은 각각 1.65와 1.4 watt로 설정된다[11]. 제안 방안의 경우 최종 경로 선택을 위하여 목적지 노드에서 정해진 시간만큼 route request 메시지를 기다리는데, 여기에서는 shortest hop을 통해 가장 먼저 도착한 메시지 이후에 이 shortest hop 보다 5홉이 더 큰 경로까지만 수신한다고 가정하여, 각 라우팅 수행 마다 [shortest hop, shortest hop+5] 사이의 전송 홉 수를 갖는 route request 패킷의 정보만을 이용하여 최종 경로를 결정한다.

<그림 3>은 각 라우팅 방법의 평균 전송 홉 수를 나타낸다. 항상 가장 짧은 경로를 선택하는 SHR이 당연히 가장 작은 전송 홉 수를 보여주며, MSR과 MPR은 SHR과 비슷한 성능을 갖는다. 이들 MSR과 MPR은 링크 상태에 기반하여 결정되는 전송률과 전송 전력량을 각각 라우팅 비용으로 사용하므로 서로 동일한 성능을 갖는다. 반면, 배터리 잔량을 라우팅 비용으로 사용하는 MBCR과 생존시

<표 1> 시뮬레이션 파라미터
(Table 1) Simulation Parameters

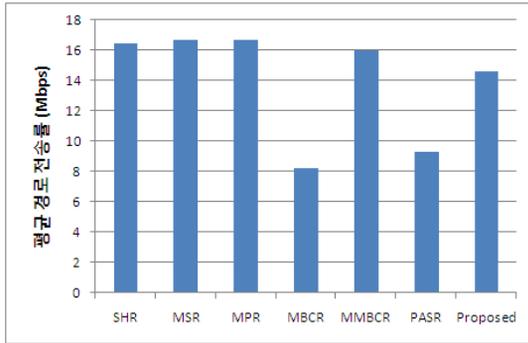
파라미터	값
시뮬레이션 횟수	1000 번
노드 수	20 개
노드 설치 방법	Uniformly random in 1000m×1000m square
최대 통신 반경	300 m
노드 배터리 잔량 분포	Normal distribution (평균: 500 Joul, 표준편차: 100 Joul)
전송 패킷 크기	1024×10 bytes
노드 송신 파워	23 dBm (200 mW)
송신 전력 소비량	1.65 watt
수신 전력 소비량	1.4 watt
목적지 노드에서 기다리는 전송경로의 최대 홉 수	Shortest hop + 5 홉
채널 대역폭	10 MHz
경로 손실(path loss) [12]	-128.1-37.6log ₁₀ (d) [dB] d는 노드간 거리 (km)
Noise figure	9 dB



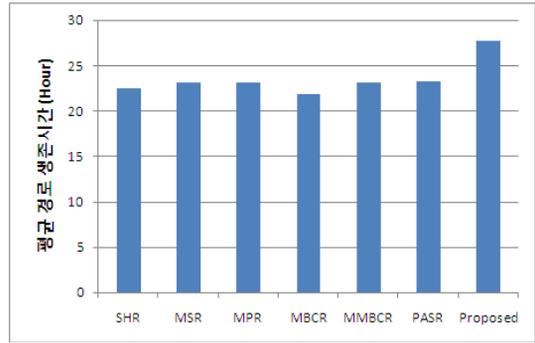
<그림 3> 평균 전송 홉 수

(Fig. 3) Average number of transmission hops

간을 라우팅 비용으로 고려하는 PASR의 경우 라우팅 비용의 전체 합을 최소화하는 방식(min-sum)으로 동작하므로 전송 홉 수가 증가하게 된다. 제안방식의 경우 SHR 대비 전송 홉 수가 약간 증가됨을 볼 수 있다.



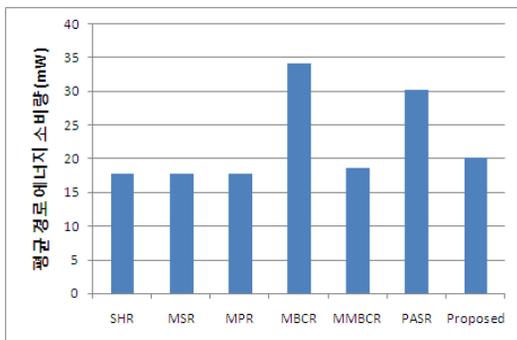
〈그림 4〉 평균 경로 전송률
(Fig. 4) Average path transmission rate



〈그림 6〉 평균 경로 생존시간
(Fig. 6) Average path lifetime

〈그림 4〉는 라우팅 방법에 따라 결정된 전송 경로의 종단간 평균 전송률을 나타낸다. 전송률의 경우 전송률을 최대화하는 방식으로 동작하는 MSR이 가장 좋은 성능을 보이며, MPR도 같은 링크 상태에 따라 전송 파워를 결정하므로 같은 성능 값을 갖는다. SHR도 비슷한 성능을 가지며, 노드의 배터리 잔량을 라우팅 비용으로 고려하는 MBCR, MMBCR, PASR 그리고 제안 방식은 높은 전송률을 갖는 경로 대신 배터리 잔량이 많은 노드를 선택하게 되므로 전송률은 다소 떨어지게 된다. 특히 MBCR과 PASR은 MMBCR과 제안 방식과 같이 min-max 전략을 취하지 않고 min-sum 전략을 취하므로 전송 홉 수와 마찬가지로 전송률도 낮게 나오게 된다.

〈그림 5〉은 라우팅 경로 상의 모든 노드가 패킷을 송수신하는데 필요한 에너지의 총 합을 보여준다. MPR의 경우에 각 노드의 전력의 총 합을 최소화하는 방식으로 경로를 선택하기 때문에 가장 좋은 성능을 보여주며, SHR과 MSR의 경우에 앞서와 같이 비슷한 성능을 갖는다. 하지만 배터리 잔량과 생존시간을 각각 고려한 MBCR과 PASR은 전송경로의 홉 수가 증가하므로 전체 소비되는 에너지량이 증가하게 된다. 반면 제안 방식은 MPR 보다는 약간 증가된 성능을 보여준다.



〈그림 5〉 평균 경로 에너지 소비량
(Fig. 5) Average path energy consumption

〈그림 6〉은 각 라우팅 방식별 설정된 경로의 생존시간을 보여준다. 생존 시간 측면에서는 기존 라우팅 방식들은 서로 비슷한 성능을 갖지만, 제안 방식의 경우 가장 긴 생존시간을 보여준다. 이는 제안 방식이 경로상의 모든 노드의 배터리 잔량과 송수신에 필요한 전력량을 실제 각 노드의 생존시간에 맞게 고려하였기 때문이다. 기존의 생존시간을 고려한 PASR 방식은 경로의 종단간 모든 노드의 생존시간을 정확히 고려하지 않기 때문에 제안 방식보다 성능이 떨어진다.

V. 결 론

제안 라우팅 프로토콜은 DSR 프로토콜을 기반으로 노드의 송수신 전력 소모량과 배터리 잔량을 고려하여 실제 패킷을 전송할 때 결정되는 경로의 생존시간을 최대화하는 경로를 선택한다. 본 논문에서는 이를 위한 새로운 라우팅 비용을 제안하였으며, 경로 탐색시 발생하는 제어 패킷 오버헤드를 최소화하는 라우팅 프로토콜을 설계하였다. 시뮬레이

선 결과 제안방식은 전송 홉 수, 전송률, 에너지 소비량 측면에서 기존 방식과 비슷한 성능을 보이면서, 생존 시간 측면에서는 기존 방식 대비 약 20%의 이득을 보여준다. 제안 라우팅 프로토콜은 기존 DSR 프로토콜의 동작 방식과 호환성이 유지되며 제어 패킷 필드의 간단한 변경으로 구현 가능하므로, 향후 에너지 절감이 요구되는 애드혹 네트워크에 효과적으로 적용 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Perkins, "Ad hoc Networking," Addison Wesley, 2001.
- [2] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra "Power-Aware Routing in Mobile ad-Hoc Networks," *ACM/IEEE Int'l. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp.181 - 190, Oct. 1998.
- [3] C. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Commun. Magazine*, June 2001.
- [4] M. Maleki, K. Dantu, and M. Pedram, "Power-aware Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," *ISLPED*, Aug. 2002.
- [5] R. Shah and J. M. Rabaey, "Energy Aware Routing for Low Energy Ad-Hoc Sensor Networks," *IEEE WCNC*, March 2002.
- [6] J. Chang and L. Tassiulas, "Energy Conserving Routing in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Infocom*, pp.22-31, June 2000.
- [7] H. Xu, L. Huang, C. Qiao, Y. Zhang, and Q. Sun "Bandwidth-Power Aware Cooperative Multipath Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 11, no. 4, pp.1532-1543, April 2012.
- [8] D. Johnson, Y. Hu and D. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," *IETF RFC 4728*, Feb. 2007.
- [9] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. Das, "AdHoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing," *IETF RFC 3561*, July 2003.
- [10] V. Park and S. Corson. "Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1", *IETF Internet Draft*, July 2001.
- [11] E.-S. Jung and N. H. Vaidya, "An energy efficient MAC protocol for wireless LANs," *IEEE INFOCOM*, vol. 3, pp. 1756-1764, June 2002.
- [12] "Technical Specification Group Radio Access Network; Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9)," *3GPP, TR 36.814 v1.1.1*, June 2009.

저자소개



최 현 호 (Choi, Hyun-Ho)

2011년 3월 ~ 현재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 전임강사

2007년 3월 ~ 2011년 2월 : 삼성종합기술원 전문연구원

2007년 2월 : KAIST 이동통신네트워크 전공 박사 졸업

2003년 2월 : KAIST 이동통신네트워크 전공 석사 졸업

2001년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 학사 졸업