

MANET에서 트래픽 부하와 노드 수명 편차에 기반한 power-aware 라우팅 프로토콜

(Traffic Load & Lifetime Deviation based Power-aware Routing Protocol for MANET)

김 동 현 [†] 하 란 ^{**}
(Dong-hyun Kim) (Rhan Ha)

요 약 Ad hoc 네트워크에서 노드의 한정된 배터리 잔량 에너지는 전체 네트워크의 수명에 큰 영향을 끼친다. 따라서 이러한 에너지 한계를 극복하기 위해 다양한 power-aware 라우팅 프로토콜들이 네트워크 계층에서 제안되어 왔으며, 이들 power-aware 라우팅 프로토콜들은 기본적으로 노드의 배터리 잔량 에너지와 전송 전력량을 경로 탐색 과정에서 반영한다. 본 논문에서 제안하는 power-aware 라우팅 프로토콜 TDPR(Traffic load & lifetime Deviation based Power-aware Routing protocol)은 노드의 배터리 잔량 에너지와 전송 전력량뿐만 아니라 각 노드의 트래픽 부하와 노드 간 예상 수명 편차를 경로 탐색 과정에 반영하여 전체 네트워크의 수명을 연장시키고 노드들 간 에너지 소모가 균등하게 이루어질 수 있도록 한다. ns-2[14] 시뮬레이터를 이용한 TDPR과 기존 라우팅 프로토콜들 간의 비교 실험은 전체 네트워크의 부하 균등, 노드들의 에너지 소모량, 그리고 개설 경로의 안정성 측면에서 TDPR의 개선된 성능을 확인한다. 실험 결과, 네트워크 탈퇴한 노드의 개수 비교에서는 TDPR이 AODV[4]보다 최대 72%, PSR[9]보다 최대 58% 적게 나타났다. 평균 잔량 에너지의 비교에서는 TDPR이 AODV보다 최대 29%, PSR보다 최대 15% 적은 양의 에너지를 소모하는 것을 확인하였으며, 에러 메시지의 발송 횟수 비교에서는 TDPR이 AODV보다 최대 41%, PSR보다는 최대 38% 적은 수의 에러 메시지를 발송하는 것을 확인할 수 있었다.

키워드 : 애드 혹 네트워크, 트래픽 부하, 에너지 효율적인 라우팅

Abstract In ad hoc networks, the limited battery capacity of nodes affects a lifetime of network. Recently, a large variety of power-aware routing protocols have been proposed to improve an energy efficiency of ad hoc networks. Existing power-aware routing protocols basically consider the residual battery capacity and transmission power of nodes in route discovery process. This paper proposes a new power-aware routing protocol, TDPR(Traffic load & lifetime Deviation based Power-aware Routing protocol), that does not only consider residual battery capacity and transmission power, but also the traffic load of nodes and deviation among the lifetimes of nodes. It helps to extend the entire lifetime of network and to achieve load balancing. Simulations using ns-2[14] show the performance of the proposed routing protocol in terms of the load balancing of the entire network, the consumed energy capacity of nodes, and an path's reliability. TDPR has maximum 72% dead nodes less than AODV[4], and maximum 58% dead nodes less than PSR[9]. And TDPR consumes residual energy capacity maximum 29% less than AODV, maximum 15% less than PSR. Error messages are sent maximum 38% less than PSR, and maximum 41% less than AODV.

Key words : Ad hoc network, traffic load, power-aware routing

· 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음
(KRF-2004-041-D00543)

[†] 학생회원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과
dhkim@cs.hongik.ac.kr

^{**} 종신회원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과 교수
rhanha@cs.hongik.ac.kr

논문접수 : 2005년 11월 7일

심사완료 : 2006년 5월 25일

1. 서 론

Ad hoc 네트워크는 별도의 AP(access point)나 인프라 시설이 없는 상황에서 노드들이 독자적으로 네트워크를 구성하여 통신을 수행한다. 그리고 각각의 노드는 제한된 크기의 전송 범위를 가지고 있기 때문에 직접

통신할 수 없는 거리에 위치한 노드들은 '멀티 홉 라우팅' 방식으로 통신을 수행한다. 그리고 통신을 수행하는 동안 두 노드 사이에 위치한 중간 노드들은 각각의 라우팅 테이블에 저장된 라우팅 정보에 따라 패킷을 다음 노드로 전달하는 라우터의 역할을 수행한다. Ad hoc 네트워크를 구성하는 각각의 노드들은 이동성을 지니며 배터리로부터 한정된 용량의 에너지를 공급받는다. 따라서 자신이 보유하고 있는 배터리 잔량 에너지를 모두 소모한 노드는 더 이상 정상적인 라우팅 동작을 수행할 수 없게 되어 네트워크를 탈퇴한다. 결국 이와 같은 네트워크 환경에서 노드들이 라우팅 동작을 원활히 수행하면서, 동시에 무선기 사용자들에게 높은 QoS를 제공하기 위해서는 노드, 즉 무선기기의 충분한 가용 시간이 보장되어야 하며, 라우팅 프로토콜의 개발 과정에서도 이 점은 반드시 고려되어야 한다.

MANET(Mobile Ad hoc NETWORK)[1-3]이 처음 소개된 시기에 제안된 라우팅 프로토콜들은 대부분 데이터 전송에 있어서, 전송 지연의 감소나 컨트롤 패킷의 오버헤드를 줄이는 것을 주목적으로 하였다. 하지만, 최근에는 한정된 배터리 용량에 따른 노드의 전력 소모 및 그로 인한 노드의 네트워크 탈퇴가 큰 이슈로 대두되면서 에너지 효율적인 라우팅을 통해 무선기기의 가용시간을 연장하고 사용자 QoS를 만족시키기 위한 기법들이 제안되고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위한 라우팅 프로토콜들은 대부분 무선기기의 한정된 에너지 용량을 효율적으로 사용하는 기법을 제안하기 때문에, 'power-aware 라우팅 프로토콜' 혹은 'energy-aware 라우팅 프로토콜'이라고 칭한다. 기존의 power-aware 라우팅 프로토콜들은 경로의 비용 계산에 있어서 경로를 구성하는 노드들의 배터리 잔량 에너지 및 전송 전력량에 대해서는 고려하였으나, 경로를 구성하는 노드들에 가해지는 트래픽 부하와 노드들 간의 수명 편차에 대해서는 고려하지 않은 문제점이 있었다. Power-aware 라우팅에 있어서 노드의 정확한 수명을 예측하기 위해서는 노드가 보유하고 있는 배터리 잔량 에너지 및 전송 전력량에 대한 정보와 함께 노드에서 발생하고 있는 트래픽 부하에 대한 정보도 반영되어야 한다. 또한 경로 선택 과정에서 노드들의 예상 수명 간의 상대적인 편차를 고려하지 않는다면, 개설 경로의 안정성은 보장하기 어렵다. 결국, 앞서 언급한 문제점들을 극복하기 위해서는 경로를 구성하는 노드들의 에너지 관련 정보들이 다양한 측면에서 반영되어야 하며 이를 통해 최적의 경로 선택이 이루어져야 한다.

본 논문에서 제안하는 power-aware 라우팅 프로토콜은 기존에 고려되지 않았던 노드의 트래픽 부하와 노드 간 예상 수명 편차를 경로 탐색 과정에서 반영하며,

TDPR(Traffic load & lifetime Deviation based Power-aware Routing protocol)로 명명한다. TDPR은 경로를 구성하는 각 중간 노드의 예상 수명의 산출과정에서 노드의 트래픽 부하를 고려하며, 경로의 선택 과정에서는 중간 노드들의 예상 수명과 함께 이들의 예상 수명 간 편차를 함께 고려한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 ad hoc 네트워크에서의 power-aware 라우팅 프로토콜에 관한 기존의 연구를 살펴보고, 3절에서는 본 논문에서 제안하는 노드의 수명 예측 함수와 TDPR의 동작을 상세히 기술한다. 4절에서는 기존 라우팅 프로토콜과 TDPR의 비교를 통한 성능평가에 대하여 기술한다. 마지막으로 5절에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 기술한다.

2. 관련 연구

Ad hoc 네트워크가 처음 소개된 시기의 대표적인 라우팅 프로토콜로는 AODV[4]와 DSR[5]이 있다. 이들 라우팅 프로토콜들은 모두 on-demand 형태의 라우팅 프로토콜로서 노드들 간의 통신이 요청된 경우에만 경로 탐색을 수행하며 여러 후보 경로 중 최소 홉 수를 가지는 경로를 선택한다. 하지만, 이와 같이 최소 홉 수를 가지는 경로를 선택할 경우, 특정 지역에 위치한 노드들에 많은 경로가 집중되어 이 노드들은 빠른 시간 내에 네트워크를 탈퇴할 것이다. 그리고 이와 같은 노드들 간의 불균등한 에너지 소모는 개설 경로의 붕괴나 네트워크의 분할을 일으킬 가능성을 높인다. 따라서 최근에는 노드들의 효율적이고 균등한 에너지 사용을 위한 다양한 종류의 power-aware 라우팅 프로토콜들이 제안되고 있다. 초기에 제안된 power-aware 라우팅 프로토콜은 출발지 노드와 목적지 노드 사이의 에너지 소모량을 최소화시키는 기법으로, 각 중간 노드에서 발생하는 에너지 소모량을 모두 더해 이 값이 가장 작은 경로를 선택하였다[6]. 이 때 각 중간 노드에서 발생하는 에너지 소모량이 모두 동일할 경우, 경로의 비용은 단순히 경로의 홉 수에 비례한다. 그리고 각 노드의 에너지 소모량이 노드 간 거리와 네트워크의 물리적 환경에 따라 달라질 경우, 이러한 사항을 고려하여 각 노드의 에너지 소모량을 산출할 수 있는 적절한 함수가 적용되어 에너지 소모량을 산출한다. 비록 이 라우팅 기법은 출발지 노드에서 목적지 노드까지 데이터를 전송하면서 발생하는 에너지 소모량은 최소화할 수 있으나 앞서 언급한 전체 네트워크의 부하균등은 이를 수 없으며 특정 노드에서 불균등하게 많은 에너지가 소모되어 네트워크 분할을 야기할 수 있는 문제점이 있다. S. Singh et al.은 이러한 노드의 전력 소모와 전체 네트워크의 부하균등 사이의 trade-off에 주목하여 power-aware 라우팅

프로토콜의 개발 과정에서 적용할 수 있는 다양한 라우팅 기준들을 제시하였고, 노드의 배터리 잔량 에너지를 고려한 power-aware 라우팅 프로토콜을 제안하였다[7]. [7]에서 제시된 라우팅 기준으로는 단위 패킷 전송 당 소모되는 에너지양, 네트워크 분할이 일어나기까지 걸리는 시간, 노드들의 전력 레벨의 변동 등이 있으며 이들 각각의 라우팅 기준들은 데이터 전송에 따른 에너지 소모 및 비용, 전체 네트워크의 부하균등과 같은 power-aware 라우팅 프로토콜의 개발 단계에서 고려해야 할 다양한 관점을 보여준다. 그 밖에 S. Singh et al.이 제안한 배터리 잔량에너지를 고려한 라우팅 기법은 중간 노드들이 보유한 배터리 잔량 에너지의 최소값을 경로의 수명으로 하여, 이 값이 가장 큰 경로를 선택한다. 이 방법은 라우팅 과정에서 배터리 잔량 에너지를 고려하는 가장 직관적인 방법으로 배터리 잔량 에너지를 바탕으로 가장 수명이 긴 경로가 개설되도록 한다. C.K. Toh는 이보다 좀 더 발전된 형태의 power-aware 라우팅 프로토콜을 제안하였는데, 이 라우팅 프로토콜에서는 일정 임계치를 정하여 모든 중간 노드들의 배터리 잔량 에너지가 이 임계치보다 높은 경로가 존재할 경우, 최소 전송 전력 라우팅(Minimum transmission power routing)을 수행하며, 그렇지 않은 경우에는 최소 배터리 잔량 에너지가 가장 큰 경로를 선택한다[8]. C.K. Toh가 제안한 방법은 노드의 전송 전력과 배터리 잔량 에너지를 모두 고려한 power-aware 라우팅 프로토콜이며 이후에 제안된 power-aware 라우팅 프로토콜들도 이와 같이 둘 이상의 에너지 관련 정보를 경로 탐색과정에서 고려하였다. 노드의 전송 전력량과 배터리 잔량 에너지를 모두 고려한 또 다른 power-aware 라우팅 프로토콜로는 Maleki et al.이 제안한 power-aware source routing(PSR) 프로토콜이 있다[9]. PSR에서는 각 중간 노드의 전송 전력량과 배터리 잔량 에너지 비율을 곱하여 해당 노드의 라우팅 비용을 산출한다. 그리고 산출된 라우팅 비용의 합으로 전체 경로의 라우팅 비용을 계산하여 이 값이 가장 작은 경로를 선택하였다. 그 밖에 많은 power-aware 라우팅 프로토콜에서 노드의 배터리 잔량 에너지와 전송 전력량은 고려되었는데, [10]에서 제안된 라우팅 함수는 각 중간 노드에서 배터리 잔량 에너지를 전송 전력량으로 나누어 경로의 수명을 구하였으며, [11]에서는 전송 전력량과 배터리 잔량 에너지에 각기 별도의 가중치를 부여하여 이 가중치에 따라 전송 전력량과 배터리 잔량 에너지 중 어느 부분에 더 중점을 두어서 경로를 선택할지 정하였다. [12]에서 제안된 라우팅 프로토콜에서는 노드의 전송 전력량을 줄이기 위해 각 중간 노드별로 경로 탐색 메시지를 브로드캐스트하는 시간을 조정하는 기법을 제안하였다. 최근

에 제안되는 power-aware 라우팅 프로토콜에서는 노드의 전송 전력량, 배터리 잔량 에너지와 함께 노드의 전력 소모 비율에 대한 고려도 함께 이루어지고 있다. Maleki et al.은 노드의 과거 일정 시간 동안의 노드의 전력 소모 비율을 측정하여 노드들의 예상 수명을 계산하고 이 예상 수명의 최소값을 경로의 수명으로 하였다. 그리고 이 값이 가장 큰 경로가 최종적으로 선택한다[13].

지금까지 제안된 power-aware 라우팅 프로토콜들은 경로 탐색에 있어서 각 노드별로 전송 전력량과 배터리 잔량 에너지에 대해서는 많은 고려가 있었으나 실제 에너지 소모를 발생시키는 트래픽 부하의 분산에 대한 고려가 없는 전체 네트워크의 부하균등 뿐만 아니라 개설 경로의 신뢰성도 보장할 수 없다. 또한 기존 연구에서는 노드의 최소 예상 수명 혹은 최소 비용만으로 경로를 선택하였을 뿐, 중간 노드들의 예상 수명 혹은 비용 간의 편차는 고려하지 않았다. 다음 절에서는 노드의 정확한 예상 수명을 산출하기 위해 배터리 잔량 에너지, 전송 전력량 및 노드의 트래픽 부하를 고려한 새로운 노드 수명 예측 함수를 제안하고 이 함수와 노드들 간의 예상 수명 편차를 이용한 power-aware 라우팅 프로토콜, TDPR을 기술한다.

3. Traffic Load & Lifetime Deviation based Power-aware Routing Protocol(TDPR)

TDPR은 노드 수명 예측 함수와 산출된 노드의 예상 수명을 이용한 경로 탐색 알고리즘으로 구성된다. 이 절에서는 먼저 각 중간 노드의 예상 수명을 산출하는 노드 수명 예측 함수를 제안하고 이어 이 노드 수명 예측 함수를 사용하여 동작하는 경로 탐색 알고리즘과 경로 유지 알고리즘을 소개한다. 경로 탐색 알고리즘은 노드 간 예상 수명 편차를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나뉘어 기술한다.

3.1 노드 수명 예측 함수

본 논문에서 제안하는 노드 수명 예측 함수는 기존 연구에서 이미 고려되었던 배터리 잔량 에너지와 패킷을 전송할 때 사용되는 전송 전력량 이외에 현재 노드에 가해지고 있는 트래픽 부하를 추가적으로 반영한다. 그리고 이들 라우팅 정보를 바탕으로 산출된 노드의 예상 수명은 경로 탐색 메시지에 첨가되어 경로 탐색 메시지가 최종 목적지 노드에 도착하였을 때 전체 경로의 수명을 산출하는 데에 반영된다.

기존 연구에서 고려되었던 라우팅 정보와 함께 추가적으로 반영되는 노드의 트래픽 부하는 해당 노드를 지나는 경로로 인해 이 노드에서 발생하는 전체 에너지 소모량으로 정의한다. 본 논문에서는 노드의 트래픽 부하를 산출하기 위해 노드가 유지하고 있는 라우팅 데이

블을 참조한다. 라우팅 테이블에는 현재 개설된 경로의 개수와 각각의 경로를 통해 다음 노드로 데이터 패킷을 전송할 때 사용되는 전송 전력량이 기입되어 있다. 이 정보들은 노드 수명 예측 함수에 적용되어, 특정 시간에 노드의 배터리 잔량 에너지, 이 노드를 지나는 경로의 개수, 그리고 각 경로에서 데이터 전송 시 소모하는 전송 전력량을 고려하여 노드의 정확한 수명을 예측한다. 본 논문에서 제안하는 노드의 수명 예측함수(life-time prediction function)는 다음과 같다.

$$l_i(t) = \frac{E_i(t)}{T_i(t)} \quad (1)$$

$$T_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{if no transmission} \\ \sum_{k=1}^{N_i(t)} (r_{i,k}(t) \times \rho_{i,k}(t)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

- $l_i(t)$: 시간 t 에 노드 i 의 예상 수명 (sec)
- $E_i(t)$: 시간 t 에 노드 i 의 배터리 잔량 에너지 (Joule)
- $T_i(t)$: 시간 t 에 노드 i 의 현재 트래픽 부하 (Joule/sec)
- $N_i(t)$: 시간 t 에 노드 i 를 거쳐 개설되어 있는 경로의 개수
- $r_{i,k}(t)$: 시간 t 에 노드 i 를 지나는 경로 k 의 초당 전송되는 데이터 량 (bit/sec)
- $\rho_{i,k}(t)$: 시간 t 에 경로 k 를 통해 노드 i 에서 다음 노드로 데이터를 전송할 때 사용되는 전송 전력량 (Joule/bit)

위의 노드 수명 예측 함수는 배터리 잔량 에너지와 트래픽 부하를 토대로 노드의 예상 수명을 산출한다. 식 (1)은 현재 남아있는 노드의 배터리 잔량 에너지를 해당 노드에서 발생하는 트래픽 부하로 나눔으로써 해당 노드가 앞으로 라우팅을 수행 할 수 있는 시간, 즉 예상 수명을 산출하기 위한 함수이다. 위의 식 (1), (2)를 통한 노드의 예상 수명 산출은 경로 탐색 과정에서 출발지 노드와 목적지 노드를 제외한 RREQ가 지나가는 모든 중간 노드에서 수행되며, 산출된 중간 노드들의 수명은 RREQ의 헤더부에 저장한다. 또한 RREQ 헤더부의 별도의 필드에는 모든 중간 노드들의 예상 수명 중 가장 작은 값이 저장된다. 시간 t 에 노드 i 의 트래픽 부하는 $T_i(t)$ 로 표현되는데, $T_i(t)$ 는 새로운 경로가 개설되기 전, 시간 t 에 노드 i 에서 발생하는 초당 에너지 소모량을 나타내며 식 (2)과 같이 계산된다. $r_{i,k}(t)$ 은 시간 t 에 경로 k 에 의해 노드 i 를 거쳐 단위 시간 당 전송되는 데이터의 량으로, 만일 전체 네트워크 내의 모든 노드들이 동일한 데이터 전송 비율을 가질 경우 이 값은 하나의 상수가 된다. RREQ가 노드 i 에 도착하였을 때, 노드 i 를 통한 어떠한 데이터 전송도 없을 경우에는, $T_i(t)$ 는 전체 수명 예측 함수 내에서 어떠한 의미도 갖지 못하

는 1로 설정된다. 식 (1)에서 보듯이 트래픽 부하 $T_i(t)$ 를 1로 설정할 경우, 이 값은 전체 함수 내에서 어떠한 영향도 미치지 못한다.

3.2 노드 수명 예측 함수를 이용한 경로 탐색 알고리즘

이 절에서는 앞서 제안한 노드 수명 예측 함수를 적용한 실제 경로 탐색 과정과 출발지에서 목적지까지 경로 탐색의 진행 과정을 알아본다. On-demand 방식의 라우팅 프로토콜의 동작은 크게 경로 탐색과 경로 유지 과정으로 나눌 수 있다. 경로 탐색은 출발지 노드와 목적지 노드 사이에 경로가 개설되어 있지 않은 상태에서 출발지 노드가 전송해야 할 데이터를 가지고 있을 때에 시작된다. 출발지 노드는 먼저 자신의 라우팅 테이블을 검색하여 사용 가능한 경로가 있는지 알아본다. 만일 사용 가능한 경로가 존재하지 않으면, 출발지 노드는 자신의 주변 노드들에게 경로 탐색 메시지를 브로드캐스트하고 이 메시지를 받은 주변 노드들은 자신의 주변 노드들로 이 메시지를 다시 브로드캐스트함으로써 경로 탐색 메시지가 목적지 노드까지 향하게 한다. 경로 탐색 메시지에는 출발지 노드와 목적지 노드의 주소 및 시퀀스 넘버가 기입되어 있으며, 이 정보를 통해 이미 동일한 경로 탐색 메시지를 받은 적이 있는 노드는 메시지를 다시 브로드캐스트하지 않는다. 각각의 중간 노드들은 경로 탐색 메시지를 브로드캐스트하기 전에 이전 노드에 대한 역경로를 개설하는데, 이 경로는 차후 응답 메시지의 전송을 위해 사용된다. 경로 탐색 메시지를 받은 목적지 노드는 이에 대한 응답 메시지를 경로 탐색 메시지가 왔던 역경로로 전송하며 응답 메시지가 출발지 노드까지 도착하면 경로 탐색 과정은 종료된다. 그림 1은 RREQ가 출발지 노드에서 목적지 노드로 전송되고 이에 대한 응답으로 RREP가 목적지 노드에서 출발지 노드로 전송되는 과정을 보인 것이다.

RREQ 패킷의 헤더 부를 구성하는 필드는 표 1과 같다. 제안하는 라우팅 프로토콜의 RREQ 헤더 부는 출발

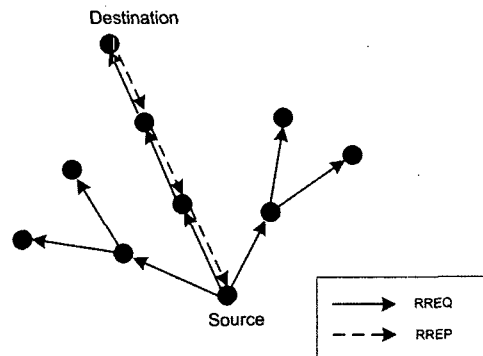


그림 1 RREQ의 브로드캐스트와 RREP의 유니캐스트

지 노드와 목적지 노드의 주소와 함께 이들의 시퀀스 넘버를 저장할 필드를 포함한다. 그리고 RREQ가 거쳐 가는 중간 노드들의 예상 수명 시간을 저장할 필드도 포함된다. RREQ 메시지를 받은 중간 노드들은 먼저 현재 노드에서 이전 노드로 향하는 역경로를 개설한다. 역 경로 개설이 끝난 후, 노드는 노드 수명 예측 함수를 이용하여 자신의 예상 수명을 산출하고, 이를 RREQ의 헤더부의 지정된 필드에 추가한다. 그 후, RREQ 메시지는 다시 주변의 이웃 노드들로 브로드캐스트된다.

이러한 과정을 반복하여, RREQ 메시지가 목적지 노드에 도달하면 목적지 노드는 RREQ에 저장된 중간 노드들의 예상 수명 중 최소값을 임시 저장하고 RREP 타이머를 동작시킨다. 만일, 이 RREQ가 목적지 노드에 도착한 첫 번째 메시지가 아닐 경우에는 이전에 도착한 RREQ의 최소 예상 수명 값과 비교하여 더 큰 값을 가지는 경로로 갱신한다. RREP 타이머가 만기가 되면 목적지 노드는 선택된 경로의 역경로로 RREP 메시지를 전송하며, 이 때 RREP는 RREQ와는 달리 유니캐스트 방식으로 전송된다. RREP는 출발지 노드까지 이동하면서 중간 노드들의 라우팅 테이블에 새로운 라우팅 엔트리를 추가한다. 그리고 RREP가 최종적으로 출발지에 도착하면 경로 탐색 과정은 종료된다.

그림 2는 앞서 소개한 경로 탐색 알고리즘을 통해 특정한 시간 t 에 출발지 노드에서 목적지 노드까지 경로를 개설하는 하나의 예이다. 주어진 네트워크는 정점과

간선으로 이루어진 그래프의 형태로 표현되며, 정점은 노드를 나타내며 간선은 두 노드 사이의 연결성 혹은 링크를 의미한다. 즉, 링크로 연결된 두 노드는 서로 직접 통신할 수 있는 이웃이라고 볼 수 있다. 두 노드 사이의 링크는 굵은 실선 혹은 가는 실선으로 표현하였는데, 굵은 실선은 현재 이 링크를 통해 데이터 전송이 일어나고 있다는 것을 의미하며, 가는 실선으로 표현된 링크는 현재 어떠한 통신도 일어나고 있지 않다는 것을 의미한다. 주어진 예에서는 노드 K에서 노드 L까지 데이터 전송이 이루어지고 있으며 중간 노드로 노드 A, B, C를 거쳐서 패킷이 전송되고 있는 상태이다. 예제 설명의 용이를 위해 모든 노드에서의 전송 전력은 ρ , 데이터 전송 비율은 r 로 모두 동일하다고 가정하며, 노드 옆에 표시된 $E_i(t)$ 는 경로 탐색이 이루어지고 있는 시간 t 에 노드 i 의 배터리 잔량 에너지를 의미한다. 그림 2를 보면 출발지 노드 D에서 목적지 노드 H까지는 세 가지 경로가 개설 가능하다. 목적지 노드 H는 각 경로에 속한 중간 노드들의 예상 수명 값들의 최소값을 비교하며 이 값이 가장 큰 경로를 선택한다. 세 개의 경로를 거쳐 온 각각의 RREQ 패킷에는 출발지 노드에서 목적지 노드에 도달하기까지 거쳐 간 모든 중간 노드의 예상 수명이 기입되어있다. 표 2는 그림 2에서 제시된 네트워크 내 각 노드들의 예상 수명을 나타내고 있다. 제안된 노드 수명 예측 함수에 따라 노드의 예상 수명은 시간 t 에 배터리 잔량 에너지를 개설된 경로의 전송 전력량과 데이터 전송 비율의 곱으로 나눈다. 그리고 시간 t 에서 노드에 어떠한 데이터 전송도 없을 때에는 데이터 전송 전력량과 데이터 전송 비율의 곱으로 표현되는 트래픽 부하는 1로 한다.

단순히 시간 t 에 노드의 배터리 잔량 에너지만을 가지고 경로를 선택할 경우, 경로 D-A-B-C-H가 가장 좋은 선택이 될 것이다. 하지만 노드 A, B, C의 경우, 현재 노드 K와 노드 L 간의 통신을 위한 중간 노드 역할을 하고 있다. 따라서 이들 노드들의 경우 배터리 잔량 에너지가 کم에도 불구하고 데이터 전송 비율 r 와 전송 전력량 ρ 의 값에 따라 다른 노드들보다 배터리 잔량 에너지를 빠르게 소모하여 일찍 네트워크를 탈퇴할 수 있다. 이는 전체 네트워크의 부하균등을 이루기 어려울 뿐만 아니라 이미 개설되어 있는 경로 K-A-B-C-L의

표 1 TDPR의 RREQ 패킷 헤더부의 구성

Field	Description
source IP address	출발지 노드의 IP 주소
src. sequence Num	출발지 노드의 시퀀스 넘버
destination IP address	목적지 노드의 IP 주소
dst. sequence Num	목적지 노드의 시퀀스 넘버
RREQ ID	브로드캐스트 ID
Hop Count	개설 경로의 홉 수
Lifetimes[]	경로 구성 노드들의 수명
MinLife	경로 구성 노드의 최소 수명

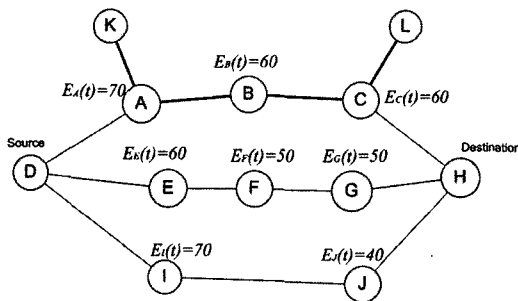


그림 2 경로 탐색 과정의 예

표 2 각 노드들의 예상 수명

노드	예상 수명	노드	예상 수명
A	$70/(r \times \rho)$	F	$50/1$
B	$60/(r \times \rho)$	G	$50/1$
C	$60/(r \times \rho)$	I	$70/1$
E	$60/1$	J	$40/1$

붕괴도 야기한다. 경로 D-A-B-C-H의 중간 노드 최소 예상 수명은 $60/(r \times \rho)$, 경로 D-E-F-G-H는 중간 노드의 최소 예상 수명은 50이며, 경로 D-I-J-H는 중간 노드의 최소 예상 수명이 40이다. 만일, $r \times \rho$ 의 크기가 6/5보다 클 경우 $60/(r \times \rho)$ 는 50보다 작은 값이 되므로 더욱 긴 경로의 가용 시간을 위해서는 경로 D-A-B-C-H 대신 경로 D-E-F-G-H가 선택되어야 한다. 즉, 이 예에서 볼 수 있듯이 새로운 경로의 선택 과정에서는 중간 노드의 배터리 잔량 에너지뿐만 아니라 전송 전력량과 데이터 전송 비율이 반영된 트래픽 부하도 함께 고려되어야 한다. 그림 3은 제안하는 경로 탐색 알고리즘의 의사 코드를 이용하여 표현한 것이다.

```

for each intermediate node
    compute node lifetime
    append computed lifetime into the RREQ header
    broadcast RREQ message to its neighbors
end for

for destination node
    if received RREQ is first message
        compute & store path's lifetime
        initiate a RREP timer
    else
        compare path's lifetime
        if new path's path is better than old one
            change the path with new one
        end if
    end if
    if RREP timer is expired
        unicast RREP to source
    end if
end for
    
```

그림 3 RREQ를 이용한 경로 탐색 과정

3.3 노드 수명 예측 함수와 예상 수명 편차를 고려한 경로 탐색 알고리즘

앞 절에서는 각 경로에서 중간 노드들의 최소 예상 수명으로 경로를 선택하였다. 하지만, 둘 이상의 경로가 동일한 크기의 최소 예상 수명을 가지는 경우에는 어느 경로가 더 전체 네트워크의 부하 균등에 좋은 영향을 끼치는지 판단할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 노드의 트래픽 부하에 대한 고려와 함께 경로 내 중간 노드들의 예상 수명 간 편차를 고려한 경로 탐색 알고리즘도 함께 제안한다. 이 절에서 제안하는 경로 탐색 알고리즘은 RREQ가 목적지 노드까지 전송되는 과정까지는 3.2절과 동일하다. 하지만, 목적지 노드에서 둘 이상의 RREQ가 탐색한 경로들을 비교하는 부분에서 차

이를 보인다. RREQ를 받으면 목적지 노드는 이 RREQ 내에 저장된 최소 예상 수명과 함께 중간 노드들의 평균 예상 수명 값과 표준 편차 값도 계산하여 임시 저장한다. 그리고 이미 다른 RREQ가 도착한 경우에는 두 경로의 비교를 세 단계에 걸쳐 수행하면서 중간 노드들의 예상 수명 편차를 고려한다. 두 경로는 먼저 최소 예상 수명을 기준으로 비교하여 더 큰 값을 가진 경로를 선택한다. 만일, 두 경로의 최소 예상 수명이 같으면 그 다음에는 중간 노드들의 평균 예상 수명을 먼저 비교하고 이 값까지 같은 경우, 중간 노드들 간의 수명 편차를 고려한다. 이러한 과정을 거치는 이유는 그림 4를 통해 설명할 수 있다. 그림 4에서 두 경로는 모두 최소 예상 수명이 20이다. 그리고 편차는 경로 B가 경로 A보다 더 작다. 하지만 전체 네트워크 내 노드들의 균등한 에너지 소모를 위해서는 경로 A를 선택하는 것이 더 적절하다. 경로의 비교가 끝난 후, 이전에 도착한 RREQ의 경로보다 더 나은 경로가 발견되면, RREP가 전송될 경로는 갱신된다.

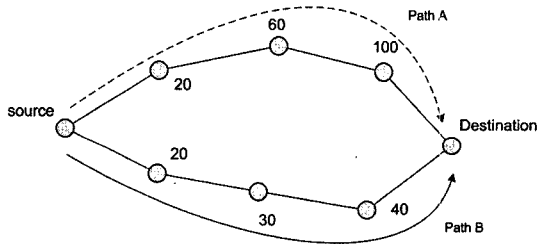


그림 4 목적지 노드에서의 두 경로의 비교

4. 성능 평가

4.1 실험 환경 및 실험 기준

제안하는 라우팅 프로토콜의 효과를 확인하기 위해 본 논문에서는 ns-2[14] 시뮬레이터를 사용하여 실험을 수행하였다. 성능 평가는 전체 네트워크 내의 노드들의 에너지 소모량과 노드들 간의 에너지 소모 상의 부하균 등 그리고 경로 개설 후 경로의 붕괴 및 재개설 횟수를 기준으로 수행되었다. 다음은 성능 평가에 사용된 기준이다.

1. 시간의 흐름에 따른 네트워크 탈퇴 노드 개수의 변화
 2. 시간의 흐름에 따른 노드들의 평균 배터리 잔량 에너지의 변화
 3. 시간의 흐름에 따른 노드들의 최소 배터리 잔량 에너지의 변화
 4. 라우팅 과정에서 경로의 붕괴로 발생하는 여러 메시지의 발송 횟수
- 네트워크 탈퇴 노드의 개수로 전체 네트워크 내에서

노드들 간의 부하 균등의 정도를 파악할 수 있다. 본 논문에서는 경로 탐색 과정에서 노드들에 가해지는 트래픽 부하와 함께 노드들 간의 수명 편차를 토대로 경로를 선택함으로써 상대적으로 배터리 잔량 에너지량이 너무 적거나 트래픽 부하가 심한 노드는 새로 개설되는 경로에 포함되지 않도록 하였다. 이는 전체 네트워크의 수명과도 밀접한 관계가 있으며, 여기서 전체 네트워크의 수명이란 네트워크 내에서 한 개 혹은 정해진 개수 이상의 노드가 배터리 잔량 에너지를 모두 소모하여 네트워크에서 탈퇴하는 시점을 의미한다. 두 번째 평가 기준은 네트워크 내 노드들의 전체적인 에너지 소모량을 보여준다. 데이터 전송 시 네트워크 내 노드들의 에너지 소모량은 개설 경로의 길이와 안정성에 영향을 받는데, 두 번째 평가 기준을 통해 라우팅 과정에서 TDPR이 얼마나 안정적인 경로를 선택하는지 확인할 수 있다. 시간의 흐름에 따른 최소 잔량 에너지의 변화는 전체 네트워크의 부하균등 정도를 보여주면서 동시에, 첫 번째 노드가 네트워크에서 탈퇴하는 시점을 보여준다. 즉, 이 수치가 0이 되는 순간이 첫 번째 노드가 네트워크를 탈퇴하는 시점이라고 할 수 있다. 마지막 평가 기준은 라우팅 과정에서 발생하는 여러 메시지의 개수이다. 여러 메시지는 개설된 경로를 통한 데이터 전송 중 노드의 이동이나 배터리 잔량 에너지의 고갈로 인해 더 이상 경로를 유지할 수 없을 때, 대체 경로의 탐색을 위해 전송된다. 즉, 동일한 네트워크 환경에서 서로 다른 라우팅 프로토콜들 간의 여러 메시지의 발송 횟수를 비교함으로써, 어떤 라우팅 프로토콜이 더욱 신뢰성 있고 긴 수명을 지닌 경로를 개설하는지 알 수 있다. 실험은 on-demand 라우팅 프로토콜인 AODV[4]와 함께 경로 개설 과정에서 배터리 잔량 에너지와 전송 전력량을 고려하는 power-aware 라우팅 프로토콜인 PSR[9]과도 비교 연구를 수행하였다. 제안하는 라우팅 프로토콜은 두 가지 경우로 나누어 실험하였는데, TDPR-1은 노드 수명 예측 함수만 적용하였으며, TDPR-2는 노드 수명 예측 함수와 함께 경로 선택과정에서 경로를 구성하는 노드들의 수명 간 편차도 적용하였다.

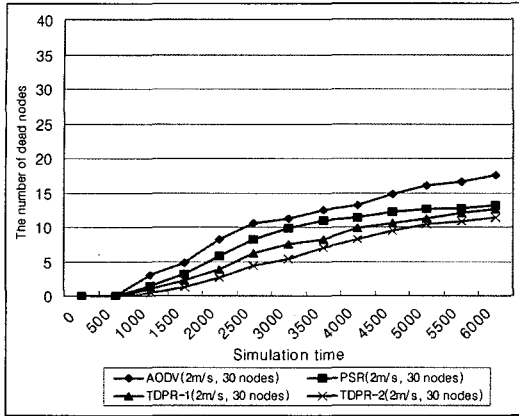
실험은 $500 \times 500(m^2)$ 의 평면 공간에 30개, 50개의 노드가 있는 경우로 각각 나누어 수행하였으며 노드의 개수가 30개일 때는 15개의 연결, 50개일 때는 25개의 연결이 개설되도록 하였다. 노드들의 전송 범위는 40m로 모두 동일하다고 가정하였다. 노드들의 이동은 random waypoint model[5]을 사용하여 표현하였다. 본 논문에서는 노드의 개수와 함께 노드의 이동성에도 변화를 주면서 실험을 수행하였다. 즉, 실험에서 노드의 이동속도는 사람의 이동속도($2m/s=7.2km/h$)만을 고려한 경우와 차량의 이동속도($16.6m/s=60km/h$)까지 고려한 경우로

나누어 수행하였다. 모든 실험은 각각 다섯 번씩 수행하여 그 평균을 취하였다.

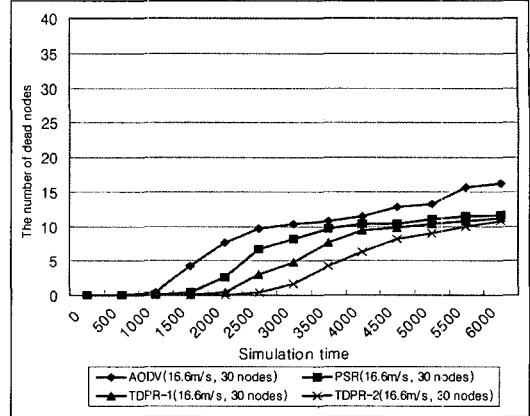
4.2 실험 결과

4.2.1 네트워크 탈퇴 노드의 개수

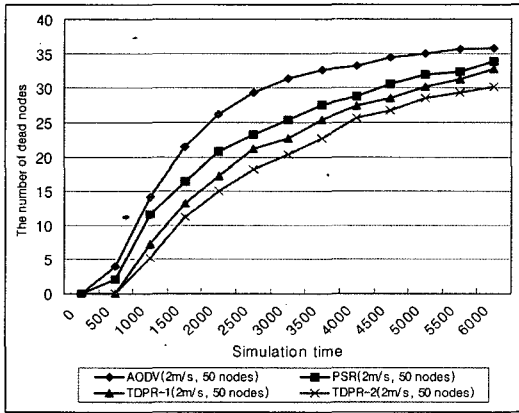
노드가 네트워크를 탈퇴하는 경우는 자신이 보유하고 있는 잔량 에너지를 모두 소모했을 때이다. 실험은 노드의 개수가 적은 경우부터 많은 경우로 확대하였으며 각각의 경우 두 가지 속도로 나누어 수행하였다. 먼저 그림 5(a), (b)에서 볼 수 있듯이 노드의 개수가 30개인 경우에는 전반적으로 네트워크 탈퇴 노드의 수가 적었으나, AODV[4]와 PSR[5]은 TDPR보다 상대적으로 높은 네트워크 탈퇴 노드 수를 보였다. TDPR과 다른 라우팅 프로토콜들과의 네트워크 탈퇴 노드 개수의 차이는 전체 네트워크 내 노드의 개수가 늘어나면서 더욱 벌어지는데, 이는 노드들 간의 통신이 빈번해지고 더 많은 수의 컨트롤 패킷과 데이터 패킷이 전송될수록, TDPR에서 사용된 노드 수명 예측 함수는 트래픽 부하의 변동에 따라 보다 정확한 예상 수명을 산출하여 효율적인 라우팅을 수행하였기 때문이다. 하지만, 노드들의 배터리 잔량 에너지가 감소하고 여러 개의 경로가 동시에 개설되면서 배터리 잔량 에너지 및 트래픽 부하의 차이로 인해 노드들 간의 수명 편차는 커지게 된다. TDPR은 이러한 노드들 간의 트래픽 차이를 고려하여, 전체 네트워크의 부하 균등을 위한 방향으로 경로 탐색을 수행하였고, 그 결과 상대적으로 적은 네트워크 탈퇴 노드의 개수는 보였다. 또, TDPR-2가 TDPR-1보다 더 좋은 성능 향상을 보이는 이유는 트래픽 부하와 함께 노드 예상 수명 편차도 함께 고려하기 때문이다. 노드의 이동 속도는 그림 5(a), (b)에서 보듯이 전체 네트워크 내의 노드 개수가 적을 때는 큰 영향을 미치지 않았으나 그림 5(c), (d)에서와 같이 노드의 개수가 많을 때 즉 노드들 간의 통신이 빈번하고 많은 량의 데이터가 전송될 때에는, 네트워크 탈퇴 노드의 개수에 영향을 주었다. 노드의 개수가 많을 때, 노드의 이동 속도가 빠를수록 더 적은 네트워크 탈퇴 노드 수를 보인 이유는 노드들의 이동에 따른 경로 붕괴 때문이다. 노드가 빠르게 이동할수록 노드들은 더욱 자주 이웃 노드의 전송 범위를 벗어나는데, 이는 새로운 경로의 개설로 이어진다. 에너지 소모 상의 부하균등 측면에서 네트워크 내의 모든 노드들은 고르게 에너지를 소모해야 하는데, 중간 노드들의 이동에 따른 경로의 재개설은 이러한 측면에서 경로에 포함되었던 노드들로 하여금 새로운 경로 탐색에서 제외되고 더 많은 배터리 잔량 에너지를 갖는 노드로 하여금 새로운 경로에 포함될 기회를 제공한다. 수치상으로 네트워크 탈퇴 노드의 수에서 TDPR은 AODV보다 최대 72%, PSR보다 최대 58% 적게 나타났다.



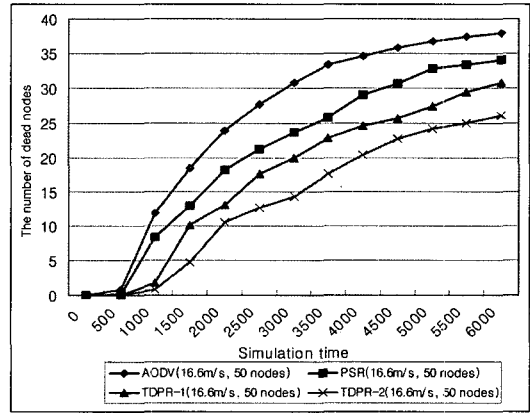
(a) 노드 개수 30개, 이동속도 2m/s



(b) 노드 개수 30개, 이동속도 16.6m/s



(c) 노드 개수 50개, 이동속도 2m/s



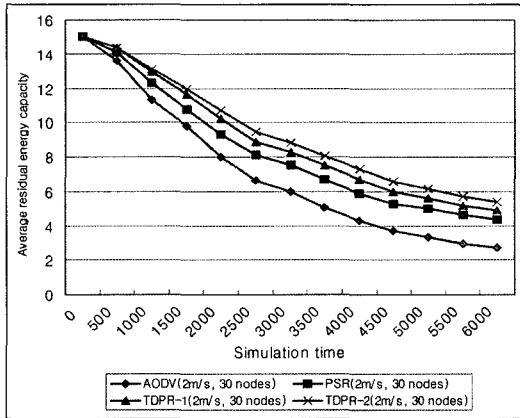
(d) 노드 개수 50개, 이동속도 16.6m/s

그림 5 시간의 흐름에 따른 네트워크 탈퇴 노드 개수의 변화

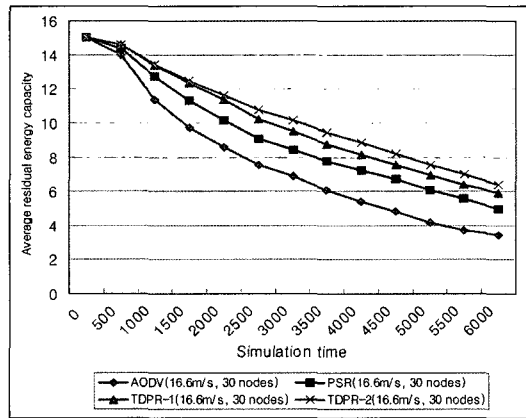
4.2.2 시간의 흐름에 따른 노드들의 평균 잔량 에너지의 변화

노드들의 평균 배터리 잔량 에너지에 대한 실험에서는 그림 6에서 볼 수 있듯이 대체적으로 노드의 개수가 늘어날수록 더 많은 배터리 잔량 에너지가 소모되는 것을 관찰할 수 있었다. 이 이유는 실험 환경에서 언급하였듯이 노드의 개수가 많아질수록 노드들 간 개설되는 경로의 개수가 늘어나기 때문이다. 노드의 개수는 각 라우팅 프로토콜 간의 에너지 소모량의 차이에도 영향을 주었는데, 그림 6(c), (d)에서 보듯이 노드들 간의 데이터 전송이 매우 심한 경우에는 모든 라우팅 프로토콜에서 극심한 에너지 소모가 일어나서 시뮬레이션이 끝나는 6000초에서는 모든 라우팅 프로토콜에서 대부분의 노드가 배터리 잔량 에너지를 거의 다 소모한 것을 관찰할 수 있다. 각 라우팅 프로토콜별로 에너지 소모량을 살펴보면, TDPR에 비해 PSR에서 에너지 소모가 심하게 나타났으며, AODV가 가장 많은 량의 에너지가 소

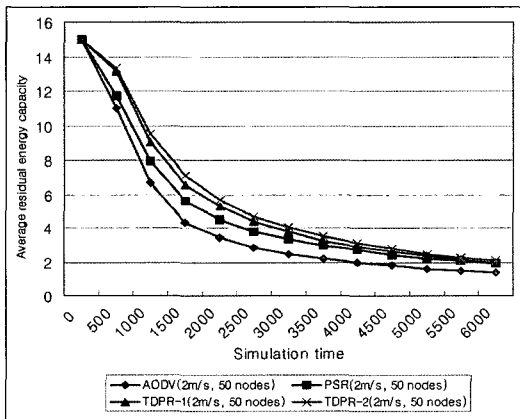
모된 것을 볼 수 있다. AODV가 가장 심한 에너지 소모량을 보인 이유는 경로 탐색 과정에서 노드들의 에너지 소모와 관련된 어떠한 정보도 고려하지 않고 단지 최소 홉 수를 가지는 경로를 선택하였기 때문이다. 따라서 AODV에서는 중간 노드들의 빠른 에너지 고갈로 인한 경로의 붕괴가 자주 발생하였으며 이는 빈번한 경로의 재개설을 야기하였다. 붕괴된 경로가 재개설되는 과정에는 많은 컨트롤 패킷이 전송되는데, 이로 인한 불필요한 에너지 소모가 발생하면서 AODV는 가장 많은 량의 에너지를 소모하였다. PSR은 AODV와는 달리 각 중간 노드의 배터리 잔량 에너지와 전송 전력량을 경로 탐색 과정에서 반영하였으나 각 노드에서 현재 발생되는 트래픽 부하에 대해서는 고려하지 않아, TDPR보다 더 자주 경로가 붕괴되고 이로 인한 경로 재개설 과정에서 에너지 소모가 발생하였다. TDPR-2의 경우, 중간 노드들 간의 수명 편차를 고려하여 최소 예상 수명에 가까운 수명을 지닌 노드들이 많이 포함된 경로를 배제



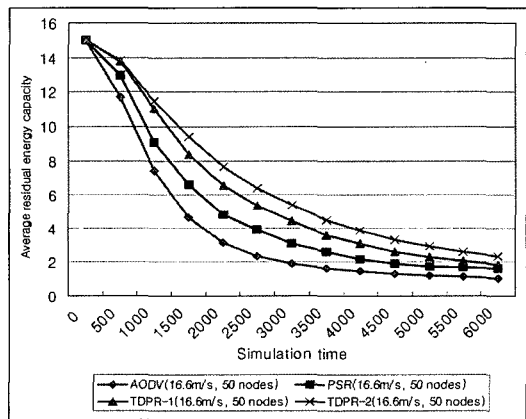
(a) 노드 개수 30개, 이동속도 2m/s



(b) 노드 개수 30개, 이동속도 16.6m/s



(c) 노드 개수 50개, 이동속도 2m/s



(d) 노드 개수 50개, 이동속도 16.6m/s

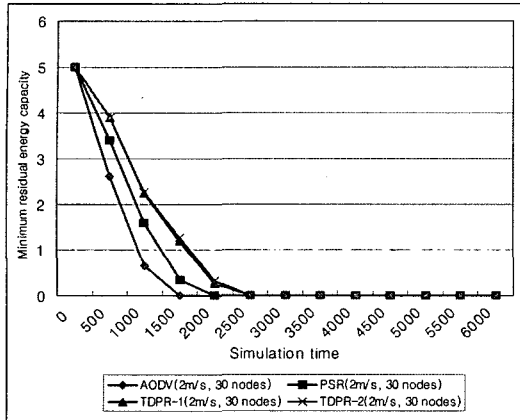
그림 6 시간에 흐름에 따른 노드들의 평균 잔량 에너지의 변화

함으로써 더욱 안정된 경로의 선택을 가능케 한다. 그러므로 중간 노드들의 최소 예상 수명만으로 경로를 선택하는 T DPR-1보다 경로 붕괴의 가능성을 낮추어 전체적인 에너지 소모량도 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 대부분의 에너지 소모는 경로가 개설된 후, 데이터가 전송되는 과정에서 가장 많이 일어나며 일부 경로의 데이터 전송이 종료되는 2500초 이후에 배터리 잔량 에너지 변화량이 감소되는 것을 볼 수 있었다. T DPR이 AODV보다 최대 29%, PSR보다는 최대 15% 적은 양의 에너지가 소모되는 것을 확인할 수 있었다.

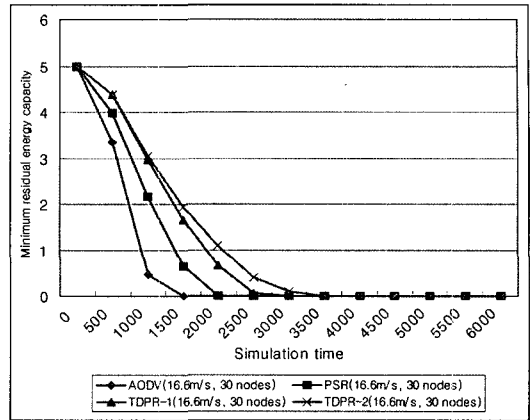
4.2.3 시간의 흐름에 따른 노드들의 최소 잔량 에너지의 변화

이 실험은 전체 네트워크 내에서 노드들의 최소 잔량 에너지의 변화 추이를 나타낸다. 최소 잔량 에너지는 전체 네트워크에서 에너지 소모 상의 부하균등의 정도를 나타내며 이 값이 0이 되는 시점이 모든 측정에서 네트워크를 탈퇴하는 노드가 발생한 시점이다. 앞선 실험에

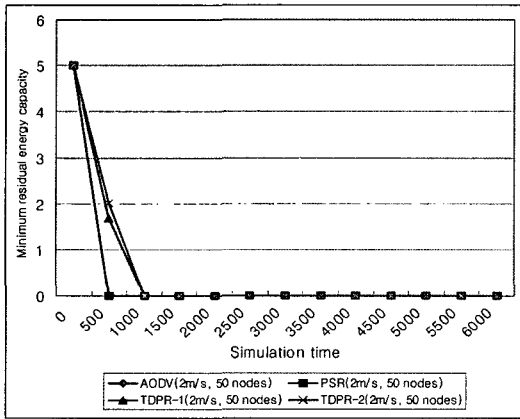
서와 마찬가지로 최소 잔량 에너지는 노드의 개수가 많을수록 급격하게 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다. 지면 부족으로 노드의 개수가 20개인 경우의 그래프는 생략하였으나, 이 경우 AODV는 평균적으로 4000초가 되기 전에 네트워크를 탈퇴하는 노드가 발생하였는데 T DPR은 시뮬레이션이 종료되는 6000초에서도 평균적으로 한 개의 노드도 탈퇴하지 않았다. PSR의 경우, 배터리 잔량 에너지와 전송 전력량에 기반한 라우팅 함수의 반영을 통해 AODV보다는 높은 최소 잔량 에너지를 보였으나 다수의 경로를 유지하는 노드의 에너지 소모 즉 트래픽 부하를 고려하지 않아 T DPR보다 더 나은 부하 균등을 이루는 데에는 실패하였다. T DPR은 배터리 잔량 에너지가 너무 적거나 높은 트래픽 부하로 인해 에너지 소모량이 큰 노드는 경로 개설 과정에서 배제함으로써 노드들의 수명을 연장시켜 네트워크 탈퇴를 지연시킨다. 특히 노드 간 수명 편차까지 고려한 T DPR-2의 경우에는 더욱 향상된 성능을 보인다. 노드들 간 전



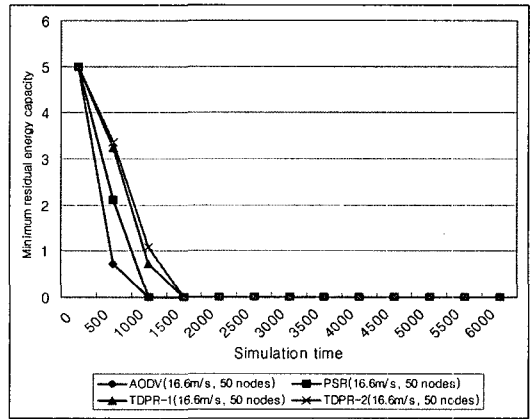
(a) 노드 개수 30개, 이동속도 2m/s



(b) 노드 개수 30개, 이동속도 16.6m/s



(c) 노드 개수 50개, 이동속도 2m/s



(d) 노드 개수 50개, 이동속도 16.6m/s

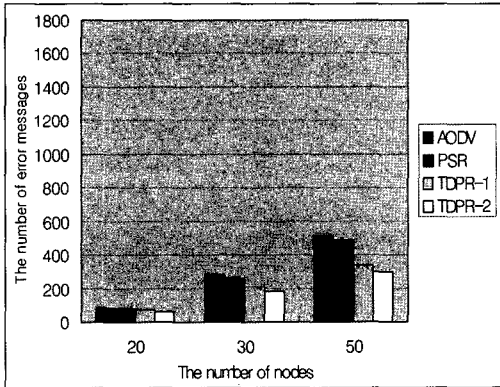
그림 7 시간의 흐름에 따른 노드들의 최소 잔량 에너지의 변화

송되는 데이터 량이 많은 경우, 그림 7(c), (d)에서 보는 바와 같이 모든 라우팅 프로토콜에서 이른 시간대에 네트워크 탈퇴 노드가 나타나는데, 이는 경로 선택 과정에서 모든 후보 경로에 속한 중간 노드들의 에너지 소모량이 높으면서 배터리 잔량 에너지가 적었기 때문이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 노드의 이동속도가 빠른 경우에 모든 라우팅 프로토콜에서 더 높은 최소 잔량 에너지를 보이는데, 이는 노드의 이동 속도가 빠른 경우, 높은 트래픽 부하가 가해지는 네트워크 중앙에 위치한 노드들이 계속 바뀌었기 때문이다.

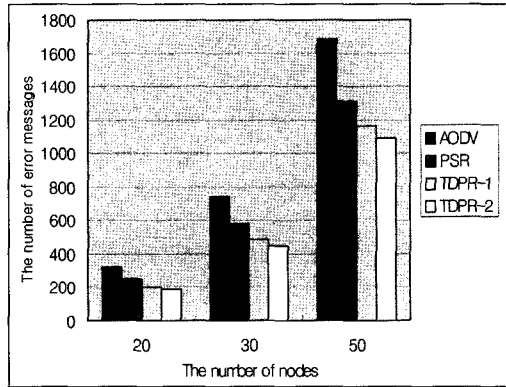
4.2.4 이동성 차이에 따른 에러 메시지의 발생 횟수

이 실험은 노드의 개수와 이동 속도를 변화시키면서 동일한 시나리오에 대해 각각의 라우팅 프로토콜이 동작하는 과정에서 발송하는 에러 메시지의 개수를 측정한다. 에러 메시지의 발송 횟수는 라우팅 프로토콜의 성능을 두 가지 측면에서 보여준다. 먼저 개설 경로의 신뢰성 측면에서 에러 메시지의 발송 횟수가 많다는 것은

그 만큼 개설된 경로가 불안정하다는 것을 의미한다. 경로를 구성하는 중간 노드들의 수명이 짧아 경로가 불안정할 경우, 빈번한 경로의 붕괴와 재개설로 인해 데이터의 유실이 많을 것이고, 이는 사용자 측면에서 충분한 서비스를 보장할 수 없음을 의미한다. 그 밖에 경로 재개설로 인한 에너지 상의 오버헤드 측면을 살펴보면 에러 메시지의 발송이 많으면 많을수록, 경로의 재개설 과정에서 더욱 많은 경로 탐색 메시지가 브로드캐스트되며 이로 인한 에너지 소모량도 많아질 것이다. 실험 결과, 그림 8에서 볼 수 있듯이 모든 경우에서 AODV는 가장 많은 수의 에러 메시지를 발송하며, 이는 AODV가 경로 탐색 과정에서 경로의 수명에 대한 어떠한 고려도 하고 단지 홉 수로만 경로를 선택하였기 때문이다. TDPR-2은 AODV보다 최고 41%까지 적은 수의 에러 메시지를 발송하는 것을 확인할 수 있다. 이는 TDPR-2가 중간 노드들의 배터리 잔량 에너지와 에너지 소모량을 고려하여, 가장 긴 수명을 갖는 경로를 선택하며, 동



(a) 노드 이동 속도가 2m/s인 경우



(b) 노드 이동 속도가 16.6m/s인 경우

그림 8 노드의 이동과 에너지 소모로 인한 에러 메시지의 발송횟수

일한 수명과 평균 잔량 에너지를 갖는 경로에 대해서 노드 간 수명 편차가 적은 경로를 선택함으로써 경로 붕괴의 가능성을 최소화시켰기 때문이다.

4.3 실험 결과 분석

네트워크 탈퇴 노드 개수 비교에서 TDPR의 노드 수명 예측 함수는 트래픽 부하의 변동에 따라 보다 정확한 예상 수명을 산출함으로써 효율적인 라우팅을 수행하여 가장 적은 탈퇴 노드 수를 보였다. 수치상으로 네트워크 탈퇴 노드의 수에서 TDPR은 AODV보다 최대 72%, PSR보다 최대 58% 적게 나타났다. 평균 잔량 에너지의 비교에서는 TDPR의 경우, 다른 AODV와 PSR에 비해 전반적으로 높은 평균 잔량 에너지를 보유하는 것을 확인할 수 있었으며, AODV의 경우 에너지 소모가 가장 심하였다. 최소 잔량 에너지에서도 실험 결과는 평균 잔량 에너지의 비교에서와 같은 경향을 보였으며, 노드의 이동 속도가 빠른 경우 전체 노드의 에너지 소모는 더 가중되었지만, 네트워크 중앙에 위치한 노드가 계속 바뀌면서 부하균등은 더 잘 이루어지는 것을 관찰할 수 있었다. 마지막으로 에러 메시지의 발송 횟수 비교에서는 TDPR의 에러 메시지 발송이 가장 적었는데, 이는 노드 수명 예측 함수가 중간 노드의 단위 시간당 에너지 소모량과 배터리 잔량 에너지를 고려하여 경로의 붕괴 가능성을 최소화 시켰기 때문이다. 수치상으로 TDPR-2는 AODV보다 최고 41%까지 적은 수의 에러 메시지를 발송하는 것을 확인할 수 있었다.

네트워크 탈퇴 노드 개수의 비교와 최소 잔량 에너지의 비교를 통해 각각의 라우팅 프로토콜들이 전체 네트워크의 부하균등을 얼마나 잘 이루는지 판단할 수 있었다. TDPR의 경우, 각 출발지 노드에서 발생하는 트래픽을 전체 네트워크로 분산시킴으로써 노드들 간의 에너지 소모가 균등하게 일어나는 것을 확인하였으며, 평균 잔량 에너지의 비교에서도 TDPR은 다른 라우팅 프

로토콜보다 적은 량의 배터리 잔량 에너지를 소모하였다. 이는 경로의 선택 과정에서 다른 라우팅 프로토콜들보다 최적의 경로를 선택함으로써 불필요한 경로의 재개설을 방지하였기 때문으로 풀이된다. 각 노드의 에너지 소모는 데이터 패킷을 전송할 때뿐만 아니라 경로 탐색 메시지와 같은 컨트롤 패킷을 전송할 때에도 일어나며, TDPR은 경로 선택 과정에서 노드의 배터리 잔량 에너지뿐만 아니라 각 노드의 트래픽 부하까지 고려함으로써 경로의 붕괴 및 재개설의 빈도를 줄였다. 이러한 사실은 에러 메시지의 발송 횟수 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 마지막으로 실험을 통해 TDPR은 전반적으로 노드의 개수가 많아지고 노드의 이동 속도가 빨라질수록 더욱 향상된 성능을 보인다. 즉, TDPR은 네트워크의 크기와 이동 속도 증가에 대한 확장성을 가짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 power-aware 라우팅 기법[4-13]에서 고려하지 않았던 트래픽 부하와 노드들 간의 수명 편차를 고려함으로써 더욱 전체 네트워크의 부하균등을 이루면서 신뢰성 있는 경로 탐색을 가능하게 한다. TDPR은 라우팅 테이블의 참조를 통해 얻은 해당 노드의 트래픽 부하 정보를 노드 수명 예측 함수에 반영함으로써 노드의 예상 수명을 산출한다. 또한 경로의 선택에 있어서 중간 노드들 간의 예상 수명 편차를 고려함으로써 더욱 안정된 경로의 탐색을 가능케 한다. 경로 유지 알고리즘은 이미 개설된 경로에 대하여 노드의 이동성 등으로 인한 경로 붕괴에 대처하여 개설 경로의 신뢰성을 높여준다. ns-2를 통한 AODV, PSR과의 비교 실험에서 TDPR은 전체 네트워크의 부하균등과 에너지 소모량, 에러 메시지의 발송 횟수 측면에서 이전보다 향상된 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 라우팅 프로토콜은 모든 데이터 통신이 하나의 출발지 노드와 하나의 목적지 노드와 통신하는 일 대 일 통신을 가정한다. 하지만, 최근에는 멀티캐스트와 같이 하나의 출발지 노드와 여러 개의 목적지 노드 사이의 통신이나 센서 네트워크에서와 같이 여러 개의 출발지 노드에서 하나의 목적지 노드로 통신이 수행되는 네트워크 형태도 고려되어야 한다. 이러한 일 대 다 혹은 다 대 일 통신에서의 트래픽 부하를 고려한 power-aware 라우팅 프로토콜의 개발은 향후 연구 과제로 남긴다.

참 고 문 헌

- [1] C.E. Perkins, "Ad Hoc Networking," Addison Wesley, 2000.
- [2] C.K. Toh, "Ad Hoc Mobile Wireless Networking," Prentice Hall, 2002.
- [3] S. Corson, and J. Macker, "RFC 2501: Mobile Ad hoc Networking(MANET)," IETF working group, Jan. 1999.
- [4] C. Perkins and E. Royer, "Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proceedings of the 2nd IEEE workshop on mobile computing systems and applications, pp.90-100, Feb. 1999.
- [5] D.B. Johnson and D.A. Maltz, "Mobile Computing," Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [6] K. Scott, N. Bambos, "Routing and channel assignment for low power transmission in PCS," Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, pp.498-502, Vol.2, Oct. 1996.
- [7] S. Singh, M. Woo and C.S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking, pp.181-190, Oct. 1998.
- [8] C.K. Toh, "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks," Proceedings of IEEE Communication Magazine, Vol.39, pp.138-147, Jun. 2001.
- [9] M. Maleki, K. Dantu, and M. Pedram, "Power-aware source routing protocol for mobile ad hoc networks", Proceedings of the IEEE international symposium on low power electronics and design, pp.72-75, Aug. 2002.
- [10] M. Tarique, K.E. Tepe, and M. Naserian, "Energy saving dynamic source routing for ad hoc wireless networks," Proceedings of the 3rd IEEE international symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, pp.305-310, April 2005.
- [11] K.-S. Kwak, K.-J. Kim, and S.-J. Yoo, "Power Efficient Reliable Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks," Proceedings of The 47th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol.2, pp.481-484, Jul. 2004.
- [12] S.-H. Lee, E. Choi, and D.-H. Cho, "Timer-based broadcasting for power-aware routing in power-controlled wireless ad hoc networks," Proceedings of IEEE Communications Letters, Vol.9, Issue 3, pp.222-224, Mar. 2005.
- [13] M. Maleki, K. Dantu, and M. Pedram, "Lifetime prediction routing in mobile ad hoc networks," Proceedings of IEEE international conference on wireless communications and networking, Vol.2, pp.1185-1190, Mar. 2003.
- [14] ns-2 simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>



김 동 현

2004년 홍익대학교 컴퓨터공학과 졸업 (공학사). 2004년 3월~현재 홍익대학교 컴퓨터공학과 석사과정. 관심분야는 ad hoc 네트워크



하 란

1987년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업
1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
1989년 3월~1990년 7월 한국통신 전임 연구원. 1995년 University of Illinois at Uubana-Champaign 전산학 박사. 1995년 9월~현재 홍익대학교 컴퓨터공학과 부교수. 관심분야는 모바일/무선 컴퓨팅, 실시간 시스템, SDR, 네트워킹, 멀티미디어 시스템