

무선 애드혹 망에서의 전력 인식 동적 소스 라우팅

(Power-Aware Dynamic Source Routing in Wireless Ad-hoc Networks)

정혜영[†] 신광욱^{**} 임근휘[†] 이승학^{**} 윤현수^{***}
 (Hye Young Jung) (Kwangwook Shin) (Geunhwi Lim) (Seunghak Lee) (Hyunsoo Yoon)

요약 무선 애드혹 통신망은 고정된 기간망 없이 이동 기기들이 모여서 형성하는 임시 무선 시스템이다. 무선 애드혹 통신망에서는 이동 기기들이 모여서 통신망을 형성하므로 개개의 이동 기기의 수명이 통신망 자체의 수명을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 망의 구조에 따라서 어떠한 경우는 단지 하나의 이동 기기가 자신의 배터리를 모두 소모하고 동작을 멈추었을 뿐인데, 이것이 통신망의 분할(partition)을 가져올 수도 있다. 이처럼 이동 기기의 수명은 각 이동 기기가 가지고 있는 배터리에 의존하므로 될 수 있는 한 소모하는 에너지를 줄여 모든 이동 기기들이 끝고루 오래 살수 있도록 하는 것이 전체 통신망의 수명을 늘릴 수 있는 방안이 된다.

본 연구에서는 모든 이동 기기들이 오랫동안 함께 살 수 있도록 최적의 경로를 선택하여 통신을 하도록 하는 전력 인식 동적 소스 라우팅(Power-Aware Dynamic Source Routing: PADSR) 프로토콜을 제안한다. PADSR에서는 송신 기기가 패킷(packet) 전송을 위한 경로를 선택할 때 어떤 특정 이동 기기의 에너지가 많이 소모하지 않도록 하기 위하여 경로 선택 시에 경로에 포함되어 있는 이동 기기들의 남아있는 배터리량과 패킷을 전달하는데 소모하게 되는 송신 에너지를 고려한다. 따라서 PADSR을 사용하면 통신망의 수명이 연장된다.

키워드 : 무선 애드혹 통신망, 전력 인식, 라우팅 프로토콜, 동적 소스 라우팅

Abstract Ad-hoc networks are temporary wireless systems composed of mobile nodes without any fixed infrastructure. The life time of each node in the ad-hoc network significantly affects the life time of whole ad-hoc network. A node which drained out its battery may incur the partition of whole network in some network topology. The life time of each node depends on the battery capacity of each node. Therefore if all mobile nodes in the network live evenly long, the life time of the network will be longer.

In this paper, we propose Power-Aware Dynamic Source Routing (PADSR) which selects the best path to make the life time of the network be longer. In PADSR, when a source node finds a path to the destination node, it selects the best path that makes nodes in the network live evenly long. To find the best path, PADSR considers the consumption of transmission energy and residual battery capacity of nodes upon the path. Consequently the network lives longer if we use PADSR.

Key words : wireless ad hoc networks, power-aware, routing protocol, dynamic source routing

· 본 연구는 첨단정보기술 연구센터를 통하여 과학재단의 지원을 받았고 대학 IT연구센터 육성·지원사업의 연구결과로 수행되었음

† 비회원 : 삼성전자 연구원
 hjung@camars.kaist.ac.kr
 ghlim@camars.kaist.ac.kr

** 비회원 : 한국과학기술원 전자전신학과
 kwshin@camars.kaist.ac.kr
 shlee@camars.kaist.ac.kr

*** 중신회원 : 한국과학기술원 전자전신학과 교수
 hyoon@camars.kaist.ac.kr

논문접수 : 2003년 9월 26일

심사완료 : 2004년 6월 28일

1. 서론

무선 이동 통신 기술의 빠른 성장과 무선 통신 장비의 가격 저하는 많은 사람들로 하여금 무선 통신 장비를 부담 없이 편리하게 사용할 수 있도록 하였다. 현재 무선 이동 통신망은 크게 기간망(Infrastructure Network)과 비기간 이동 통신망(Infrastructureless Mobile Network)으로 나눌 수 있다[1]. 기간망은 기지국(base station)과 같은 중계 장비를 반드시 필요로 하는 망으

로서 통신을 하고자 하는 무선 이동 기기(mobile unit) 들은 해당 셀(cell)의 기지국을 통하여 다른 셀에 있는 무선 이동 기기와 통신을 하게 된다. 이러한 기간망은 중계기가 없거나 고장나면 통신이 불가능하게 된다. 기간망과 달리 비기간 이동 통신망의 대표적인 형태인 무선 애드혹 통신망(Wireless Ad-hoc Network)은 서버 server), 라우터(router), 기지국과 같은 고정된 중계 장비 없이 이동 기기들 간에 서로 통신을 할 수 있다. 또한 대부분의 이동 기기들이 지리적으로 널리 흩어져 있기 때문에 각 이동 기기들은 때때로 라우터로서 다른 이동 기기들을 위하여 패킷을 전송 해주는 역할을 하기도 한다.

본 연구에서는 무선 애드혹 통신망에서 송신 기기가 패킷(packet) 전송을 위한 경로를 선택할 때 어떤 특정 이동 기기가 에너지를 많이 소모하지 않도록 하기 위하여 경로 선택 시에 경로에 포함되어 있는 이동 기기들의 남아있는 배터리량과 패킷을 전달하는데 소모하게 되는 송신 에너지량을 고려한다. 우리는 모든 이동 기기들이 오랫동안 함께 살 수 있도록 최적의 경로를 선택하여 통신을 하도록 하는 전력 인식 동적 소스 라우팅(Power-Aware Dynamic Source Routing: PADSR) 프로토콜을 제안한다. 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하면 통신망의 분할을 막고 각 노드의 수명을 비슷하게 유지하게 된다. 즉, 어떤 특정 노드가 배터리를 많이 소모하는 일을 주변의 이동 기기들에게 분산시킴으로써 전체 통신망의 수명을 연장시킬 수 있다.

본 논문에서 제안하는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜은 무선 애드혹 통신망의 수명을 최대한 연장하기 위한 프로토콜이다. 이 프로토콜은 동적 소스 라우팅(Dynamic Source Routing: DSR) 프로토콜에 기반한 프로토콜로서 경로 찾기 과정에서 경로에 있는 노드들의 배터리량이 많고, 패킷이 경로를 지나갈 때 소모하게 되는 전송 에너지의 양이 작은 경로를 선택한다. 기존의 동적 소스 라우팅 프로토콜의 경로 찾기 과정에서 찾을 수 있는 경로들은 그림 1과 같다. 소스 노드(source node) n_s 로부터 목적지 노드(destination node) n_d 까지의 최단 경로를 $n_s, n_1, n_2, \dots, n_k, n_d$ 라고 한다면, 소스 노드로부터 최단 경로 상의 노드 이외의 다른 노드들로 돌아서 가는 경로를 0-node-disjoint 경로, n_1 노드로부터 돌아서 가는 경로를 1-node-disjoint 경로, 그리고 마지막 n_k 노드로부터 돌아서 가는 경로를 k-node-disjoint 경로라 나타낸다. 즉, i 번째 노드로부터 돌아서 가는 경로를 i -node-disjoint 경로라고 한다. 그림 1에서 보듯이 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 찾을 수 있는 경로들은 최단 경로와 멀리 돌아서 목적지

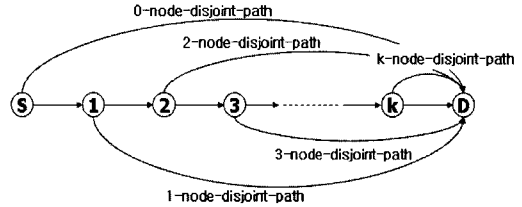


그림 1 동적 소스 라우팅 프로토콜의 경로 찾기 과정에서 찾을 수 있는 경로

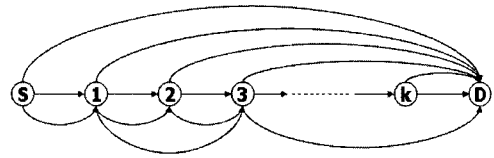


그림 2 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜의 경로 찾기 과정에서 찾을 수 있는 경로(가능한 모든 경로를 표현하기에는 어려움이 있어 찾게 되는 경로의 개념만 표현)

에 도착하는 i -node-disjoint 경로들이다.

기존의 라우팅 프로토콜에서 찾은 경로만을 가지고 본 논문에서 제안하는 라우팅 프로토콜의 목적에 적합한 경로를 찾기는 힘들다. 망의 수명을 연장할 수 있는 경로를 선택하기 위해서는 최단 경로와 i -node-disjoint 경로 외에 동적 소스 라우팅에서 고려하지 않는 그림 2와 같은 나머지 가능한 모든 경로를 찾는 것이 필요하다. 그 이유는 짧게 여러 노드를 거쳐서 통신을 하는 것이 전송 에너지의 소모를 줄일 수 있기 때문이다.

동적 소스 라우팅 프로토콜은 경로 찾기(route discovery) 동작 시 경로 요청(Route REQuest) 패킷을 수신한 중간 노드는 만약 같은 패킷이 두 번 이상 수신 되었을 경우 이 패킷을 재 브로드캐스트(broadcast)하지 않고 무시한다. 때문에 목적지 노드에서 수신하는 경로 요청 패킷들로는 최단 경로와 i -node-disjoint 경로만을 얻게 된다. 우리는 이러한 동적 소스 라우팅에서 고려하지 않는 나머지 가능한 모든 경로에 대한 정보를 얻기 위하여 중간의 노드들이 두 번 이상 같은 경로 요청 패킷을 수신하더라도 자신의 노드 정보가 이 패킷의 라우트 레코드(route record)에 들어 있지 않다면¹⁾ 다시 브로드캐스트하도록 하였다. 이렇게 동작하면 가능한 모든 경로에 대한 정보를 얻을 수 있고 더 많은 경로들 중에서 통신망의 수명을 최대로 만들 수 있는 최적의 경로를 선택 할 수 있다. 그러나 이처럼 가능한 모든 경로에 대한 정보를 모두 목적지 노드로 보내어 목적지 노드에

1) 자신의 노드 정보가 라우트 레코드에 있다는 것은 경로에 사이클이 형성된다는 의미이므로 버린다.

서 최적의 경로를 판단하도록 할 경우 다수의 경로 요청 패킷을 브로드캐스트 하게 되므로 각 노드가 소모하게 되는 에너지량이 급증한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 동적 소스 라우팅에서 고려하지 않는 나머지 가능한 모든 경로 정보를 지원하는 것과 같은 효과를 보이면서 다수의 경로 요청 패킷의 브로드캐스트로 인해 소모하게 되는 에너지량은 줄일 수 있는 경로 요청 필터링(Route Request Filtering) 알고리즘을 제안하였다. 경로 요청 필터링 알고리즘은 각 노드에서 분산적으로 동작하는 알고리즘으로 다음과 같이 동작한다. 소스 노드와 목적지 노드를 제외한 나머지 노드가 처음 경로 요청 패킷을 받으면 잠시의 지연 시간을 두고 그 지연 시간 동안 들어오는 같은 경로 요청 패킷 중에서 가장 좋은 경로를 골라 그 경로 요청 패킷만을 브로드캐스트 한다. 따라서 좋지 않은 경로를 가진 경로 요청 패킷은 목적지 노드까지 가지 않고 중간 노드에서 제거되는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문의 기반이 되는 동적 소스 라우팅(Dynamic Source Routing) 프로토콜과 IEEE 802.11 MAC(Medium Access Control) 계층에서의 전력 제어 방법에 대하여 소개하고 연구 동기에 대하여 설명한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 기법인 전력 인식 동적 소스 라우팅에 대하여 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 환경과 본 논문에서 제안한 기법에 대한 성능 평가 결과를 기술한다. 5장에서는 전력 인식 라우팅과 관련한 기존 연구를 살펴보고 마지막으로 6장에서 결론을 내린다.

2. 연구배경

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 전력 인식 동적 소스 라우팅(Power-Aware Dynamic Source Routing: PADS) 프로토콜을 이해하기 위해 필요한 배경 지식인 동적 소스 라우팅 프로토콜과 IEEE 802.11 MAC 프로토콜에 대하여 소개하고, 전력 인식 동적 소스 라우팅을 제안하게 된 동기에 대하여 설명한다.

2.1 동적 소스 라우팅(Dynamic Source Routing: DSR)

동적 소스 라우팅 프로토콜은 무선 애드혹 통신망에서 사용되는 on-demand, 소스 라우팅(source routing) 프로토콜이다[2]. 소스 라우팅이란 패킷(packet)을 생성하여 보내는 소스 노드(node)가 그 패킷을 목적지까지 전송하기 위하여 지나게 되는 라우터 역할을 하는 모든 중간 노드의 순차적인 경로를 전송 전에 결정하여 라우팅 하는 방식을 말한다. 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 소스 노드는 목적지 노드까지의 경로를 패킷을 전송하기 전에 자신의 라우트 캐시(route cache)에서 찾아보고

만약 목적지 노드까지의 경로를 가지고 있다면 이 경로를 이용하여 통신을 한다. 하지만 라우트 캐시에 목적지까지의 경로가 없다면 경로 찾기(route discovery) 과정을 통하여 경로를 찾는다. 경기는 소스 노드가 경로 요청(RREQ: Route REQuest) 패킷을 브로드캐스트 함으로써 시작된다. 경로 요청 패킷을 받은 목적지 노드가 아닌 노드들은 이 패킷의 헤더내에 자신의 노드 정보를 라우트 레코드(route record)의 끝에 추가한 후 자신의 이웃 노드들에게 다시 브로드캐스트 한다. 만약 경로 요청 패킷을 받은 노드가 목적지 노드이거나 자신의 라우트 캐시에 목적지 노드까지의 경로 정보를 가지고 있다면 이 노드는 더 이상 경로 요청 패킷을 브로드캐스트 하지 않고, 경로 응답(RREP: Route REPLY) 패킷을 소스 노드에게 전송한다. 경로 응답 패킷을 생성한 목적지 노드는 라우트 레코드에 있던 경로를 거꾸로 하여 경로 응답 패킷을 소스 노드에게 전송한다. 경로 응답 패킷을 수신한 중간 노드들은 나중에 사용될 것을 대비하여 경로 응답 패킷에 들어있는 경로를 자신의 라우트 캐시에 저장한다. 패킷을 전송하기 전에 소스 노드는 자신의 라우트 캐시로부터 혹은 경로 찾기 과정을 통하여 얻은 경로를 패킷의 헤더(header)에 넣는다. 소스 노드가 전송한 패킷은 패킷의 헤더에 있는 경로를 거쳐 목적지에 도착하게 된다.

2.2 IEEE 802.11 MAC(Medium Access Control) 계층에서의 전력 제어

본 연구에서 사용되는 MAC 프로토콜은 데이터 패킷 전송시 다음에 수신할 노드의 위치에 맞추어 전송 범위를 조절한 후 데이터 패킷을 전송하여 소모되는 전송 에너지량을 줄이도록 하는 MAC 계층 전력 제어 방식을 사용하였다[3,4]. 기존의 IEEE 802.11 MAC 프로토콜을 그대로 사용하면 각 노드는 패킷 전송시에 최대 전송 에너지로 패킷을 전송하므로 그림 3에서 점선으로 나타낸 범위까지 데이터가 도달한다. 만약 MAC 계층에서 최대 전송 에너지로 패킷을 전송하는 상태에서 라우팅 계층에서만 에너지를 줄이고자 최단 홉 라우팅(Shortest hop routing)이 아닌 다른 방법의 라우팅을 사용할 경우 한 홉(hop)에 패킷을 전달할 수 있는 거리를 짧은 거리로 여러 홉을 거쳐서 보내므로 전송 에너지의 소모를 오히려 늘릴 수 있다. 따라서 본 논문에서는 MAC 계층에서의 전력 제어 방법을 사용하여 각 노드가 패킷을 전송할 때 수신 노드의 위치에 따라 수신 노드가 패킷을 받을 수 있을 정도로 전송 범위를 줄여서 패킷을 전송한다. 이렇게 하면 가까이 있는 노드에게 불필요하게 최대 전송 에너지로 패킷을 전송함으로써 소모하던 전송 에너지의 낭비를 줄일 수 있다.

그림 3에서 노드 A가 노드 B에게 패킷을 전송할 때

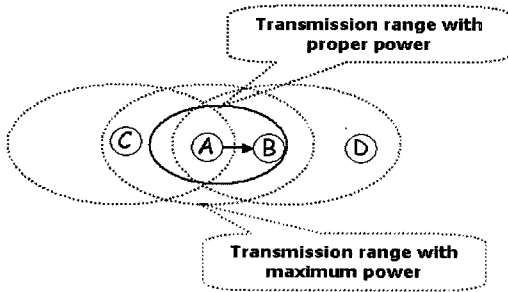


그림 3 MAC 계층 전력 제어

노드 B가 받을 수 있는 정도로 실선과 같이 전송 범위를 조절하여 보내면 패킷 전송 시에 소모되는 에너지를 줄일 수 있다.

2.3 연구 동기

무선 애드혹 통신망에서는 각각의 이동 기기의 수명이 통신망 자체의 수명을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 망의 구조에 따라 어떠한 경우는 단지 하나의 이동 기기가 수명을 다하고 동작을 멈추었을 뿐인데 통신망의 분할(partition)을 가져올 수도 있다. 예를 들어, 무선 애드혹 통신망의 초기 위상(topology)이 그림 4(a)와 같이 이루어져 있고 통신망의 라우팅 프로토콜로는 가장 짧은 홉으로 패킷을 전송하는 DSR이나 AODV(Ad-hoc On-demand Distance-vector)[5] 중 하나를 사용한다고 가정하자. 이런 환경에서 노드 A와 노드 D가 통신을 할 때, 그리고 노드 C와 노드 F가 통신을 할 때 모두 노드 G를 통하여 통신을 하는 것이 가장 짧은 경로가 된다. 이 경우 노드 G는 다른 노드들의 통신을 위해서 자신의 에너지를 많이 소모하게 된다. 무선 애드혹 통신망은 이동성을 가지고 있으므로 망의 위상은 시간이 지남에 따라 변한다. 만약 그림 4(a)의 위상이 그림 4(b)와 같이 변한다면 초기 통신망에서 에너지를 많이 소모했던 노드 G가 가장 먼저 에너지를 모두 사용하여 동작을 멈추게 된다. 이렇게 되면 전체 망은 2개로 분할되어 노드 A, B, C와 노드 D, E, F는 더 이상 서로 통신을 할 수 없다.

또한 무선 애드혹 통신망 내의 많은 노드들이 자신의

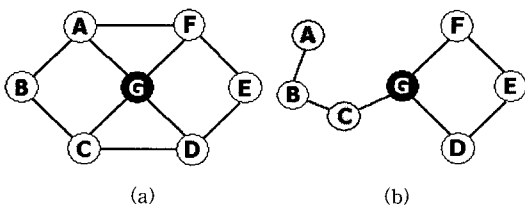


그림 4(a) 망의 초기 위상, (b) 노드 A와 노드 C가 이동한 후 망의 위상

에너지를 모두 사용하고 동작을 멈추면 각 노드를 연결시켜 줄 라우터 역할을 하는 노드들이 없기 때문에 통신망의 존재 자체가 힘들게 된다. 따라서 무선 애드혹 통신망에서 각 노드의 수명은 통신망 전체의 수명과 관련이 있는 중요한 요소이다.

본 연구에서는 무선 애드혹 통신망에서 데이터의 송수신을 위한 경로 선택 시에 전체 통신망이 오랫동안 유지될 수 있는 경로를 찾고자 한다. 소스 노드와 목적지 노드간에 통신을 하고자 할 때, 통신이 가능한 경로가 여러 개 존재한다면 어떤 특정 노드가 에너지를 많이 소모하지 않도록 각 노드의 남아있는 배터리량과 경로를 지나는데 소모되는 송신 에너지량을 고려하여 경로를 선택한다. 이러한 과정을 거쳐 선택된 경로를 사용하면 그림 4(b)와 같이 특정 노드가 다른 노드들에 비해 일찍 자신의 에너지를 모두 소모하고 동작을 멈춤으로써 통신망에 분할을 초래하는 일을 막고 전체 통신망의 수명을 연장시킬 수 있다.

3. 전력 인식 동적 소스 라우팅

본 장에서는 전력 인식 동적 소스 라우팅(Power-Aware Dynamic Source Routing) 프로토콜에 대하여 설명한다. 3.1절에서는 본 논문에서 제안하는 프로토콜의 개요에 대해서 소개한다. 3.2절에서는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜의 동작에 대하여 설명하고 3.3절에서는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서의 경로 요청 패킷 필터링 문제와 그 해결 방안인 경로 요청 필터링(Route Request Filtering)에 대하여 기술한다.

3.1 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜의 개요

전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜(PADSR)은 무선 애드혹 통신망의 수명을 최대한 연장하기 위한 프로토콜이다. 이 프로토콜은 동적 소스 라우팅 프로토콜(DSR)에 기반한 프로토콜로서 경로 찾기 과정에서 경로에 있는 노드들의 배터리량이 많고, 패킷이 경로를 지나갈 때 소모하게 되는 전송 에너지의 양이 적은 경로를 선택한다. 따라서 이 프로토콜을 사용하면 어떤 특정 노드가 자신의 배터리를 모두 소모하고 동작을 멈춤으로써 발생 할 수 있는 통신망의 분할을 막거나 분할이 나타나는 시기를 늦출 수 있다.

전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하여 좋은 경로를 찾기 위해서는 경로 찾기를 수행할 때 여러 개의 경로 중에서 선택할 수 있어야 한다. 이러한 모든 가능한 경로들을 지원하기 위해서는 DSR이나 AODV와 달리 같은 경로 요청 패킷을 두 번 이상 받더라도 다시 그 패킷을 브로드캐스트하는 것이 필요하다. 하지만 모든 가능한 경로를 지원하기 위하여 이렇게 동작하

면 경로 요청 패킷을 너무 많이 브로드캐스트하여 이 패킷의 브로드캐스트에 드는 전력 소모가 많아진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 우리는 분산 알고리즘인 경로 요청 필터링(Route Request Filtering) 방법을 제안한다. 경로 요청 필터링 방법을 사용하면 각 노드에서는 하나의 경로 요청 패킷을 받고 잠시의 지연 시간을 두고 그 지연 시간 동안 들어오는 같은 경로 요청 패킷 중에서 가장 좋은 경로를 가지고 있는 경로 요청 패킷만을 브로드캐스트한다. 따라서 목적지 노드에는 우수한 경로를 가진 경로 요청 패킷들만 도달하게 된다. 이러한 경로 요청 필터링 방법을 사용하면 거의 모든 가능한 경로를 지원하면서 이것을 지원하기 위하여 각 노드가 소모하는 에너지의 양을 줄일 수 있다.

3.2 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜의 동작

전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜은 동적 소스 라우팅 프로토콜에 기반한다. 데이터 패킷을 전송하고자 하는 이동 기기는 먼저 자신의 캐시를 살핀다. 만약 자신의 캐시에 목적지로 가기 위한 경로를 가지고 있으면 그 경로를 통하여 패킷을 전송한다. 하지만 목적지로 가기 위한 경로가 없다면 경로 찾기 과정이 수행된다. 먼저 경로 찾기 과정에서 쓰이는 경로 요청 패킷의 구조를 살펴보자. 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 경로 요청 순서 번호와 소스 노드 주소, 목적지 노드 주소, 찾은 경로 레코드를 포함하고 있다. 반면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 위의 4가지 요소 외에 찾은 경로 레코드에 포함되어 있는 중계 노드들의 총 남아 있는 배터리 량과 경로를 거치는데 소모하게 되는 총 전송 에너지 량이 포함된다. 남아 있는 배터리 량은 평균값을 구하여 비교한다. 소스 노드 n_1 에서 목적지 노드 n_k 로의 경로를 찾고자 경로 요청 패킷을 전송했을 때 이 경로 요청 패킷의 헤더에 있는 경로 레코드 j 가 n_1, n_2, \dots, n_k 라면 평균 남아 있는 배터리 량은 B_j 로 나타낸다. 여기서 x_i 는 노드 i 의 남아 있는 배터리 량을 나타낸다.

$$B_j = \sum_{i=2}^{k-1} x_i / (k-2)$$

소스 노드 n_1 에서 목적지 노드 n_k 에게 패킷 j 를 전송할 때 지나게 되는 경로가 n_1, n_2, \dots, n_k 라면 총 전송 에너지는 T_j 로 나타낸다. 여기서 $E(n_1, n_2)$ 는 n_1 과 n_2 사이에서 소모되는 전송 에너지의 양을 나타낸다.

$$T_j = \sum_{i=1}^{k-1} E(n_i, n_{i+1})$$

경로 찾기 과정을 보면 먼저 데이터를 전송 하고자 하는 소스 노드는 경로 요청(RREQ) 패킷을 만들어 브로드캐스트한다. 이 경로 요청 패킷을 받은 목적지 노드

가 아닌 경로 상의 중간 노드들은 수신한 경로 요청 패킷이 처음 도착한 것이라면 경로 요청 필터링에 따라 정해진 대기 시간 동안 잠시 기다리게 된다. 대기 시간이 지난 후 이 시간 동안 받은 같은 경로 요청 패킷 중 남은 에너지 량이 많고 전송 에너지의 소모가 적은 경로를 가진 경로 요청 패킷 하나만을 브로드캐스트한다. 이때 경로 요청 패킷 헤더의 총 남아 있는 배터리 량에 현재 자신의 배터리 량을 합산하여 경로 요청 패킷 헤더에 다시 입력하고 이전 노드에서 자신의 노드에게 패킷을 전달하는데 들었던 에너지 량도 경로 요청 패킷 헤더의 총 전송 에너지 량에 합산하여 다시 입력한다.

목적지 노드가 경로 요청 패킷들을 받으면 그 중에서 남아 있는 평균 배터리 량이 가장 큰 경로 MB와 $(MB - \alpha)$ 범위에 속하는 경로들을 후보 경로 $R_{battery}$ 로 선정한다. α 는 MB와 유사한 에너지량을 가진 경로들이 있다면 이 경로들을 후보로 선택하여 다음 단계에서 그 중에 전송 에너지의 소모를 더 적게 할 수 있는 경로를 찾으려 하기 위한 후보 경로 선정 범위를 나타낸다. i 는 목적지 노드가 수신한 경로 요청 패킷의 경로를 나타내고, B_i 는 경로 i 의 평균 남아 있는 배터리 량을 나타내며, R_{all} 은 목적지 노드에 도착한 모든 i 의 집합을 나타낸다.

$$MB = \max\{ B_i \mid i \in R_{all} \}$$

$$R_{battery} = \{ i \mid (MB - \alpha) < B_i < MB \text{ for all } i \in R_{all} \}$$

1 단계에서 후보로 선택된 경로 $R_{battery}$ 중에서 총 전송 에너지량 T_i 가 가장 적은 경로 mT 를 선택한 후 mT 와 $(mT + \beta)$ 범위 안에 포함되는 모든 경로들을 2단계 후보 경로 R_{tx} 로 선정한다. β 도 α 와 마찬가지로 mT 와 유사한 전송 에너지량을 가진 경로들이 있다면 이 경로들을 후보로 선택하여 다음 단계에서 그 중에 홑 수가 적은 경로를 찾아 패킷 전송 지연 시간을 줄일 수 있는 경로를 찾으려 하기 위한 후보 경로 선정 범위를 나타낸다. R_{tx} 에 포함된 경로들은 경로에 속해 있는 각 노드의 남아 있는 에너지량이 많고 소모되는 전송 에너지 량이 적은 경로들이다.

$$mT = \min\{ T_i \mid i \in R_{battery} \}$$

$$R_{tx} = \{ i \mid mT < T_i < (mT + \beta) \text{ for all } i \in R_{battery} \}$$

마지막으로 2단계 후보 경로인 R_{tx} 중에서 홑 수가 가장 적은 하나의 경로를 선택한다. H_i 는 경로 i 의 홑 수를 나타낸다. H_m 은 R_{tx} 중에서 가장 홑 수가 적은 경로 m 의 홑 수를 나타내며 Best Path는 H_m 의 경로 m 을 나타낸다.

$$H_m = \min\{ H_i \mid i \in R_{tx} \}$$

$$Best Path = m$$

선택된 경로 Best Path를 경로 응답(RREP) 패킷에 넣어 소스 노드에게 전송한다. 이렇게 되면 하나의 경

로 응답 패킷만이 소스 노드에게 전달되므로 동적 소스 라우팅 프로토콜보다 응답 패킷의 수를 줄일 수 있다.

그림 5는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜 경로 찾기 과정의 한 예를 보여준다. 그림 5는 소스 노드 A가 목적지 노드 Z에게 데이터를 전송하고자 경로 찾기를 수행했을 때 목적지 노드 Z로 도달할 수 있는 경로와 각 노드의 남아 있는 배터리 량, 그리고 노드 간에 데이터 전송을 위하여 소모되는 전송 에너지의 양을 보여주고 있다. 그림 5에서 목적지 노드 Z에는 3개의 경로 요청 패킷이 도착하게 된다. 경로 1은 A→B→F→C→Z이고, 경로 2는 A→B→C→Z이고, 경로 3은 A→D→E→Z이다. 이들 3개의 경로 중 가장 좋은 경로를 선택하는 방법은 다음과 같다. 1 단계에서 경로 후보 선정을 위하여 고려 해야 할 것은 평균 남아 있는 배터리 량 B_i 이다. 경로 1의 평균 배터리량 B_1 는 48이고, 경로 2의 평균 배터리량 B_2 는 50이며 경로 3의 평균 배터리량 B_3 는 35이다. 여기서 가장 많은 배터리 량 MB는 50이며 후보로 선정하기 위한 범위 α 를 5라고 한다면, 남아 있는 평균 배터리 량이 45~50 사이에 들어가는 경로가 후보 경로 $R_{battery}$ 로서 선정된다. 여기서 경로 3은 후보 범위를 벗어나므로 탈락되고 경로 1과 경로 2가 후보가 된다. 2 단계에서 고려해야 할 것은 하나의 경로를 통하여 패킷을 전달할 때 소모되는 전송 에너지의 양 T_i 이다. 1 단계에서 후보로 선정된 $R_{battery}$ 에 속하는 경로들의 전송 에너지량을 보면, 경로 1의 총 전송 에너지량 T_1 는 24이고, 경로 2의 총 전송 에너지량 T_2 는 26이다. 이 중 가장 작은 전송 에너지를 소모하는 경로 mT 는 24가 된다. 2단계 후보 R_{tx} 선정을 위한 범위 β 를 5라고 할 때, $R_{battery}$ 중에서 전송 에너지의 양이 24~29에 속하는 경로가 후보 R_{tx} 로 선택된다. 따라서 경로 1과 경로 2가 2 단계에서 모두 후보로 선택된다. 마지막으로 고려해야 할 사항은 홑 수이다. 경로 1의 홑수 H_1 는

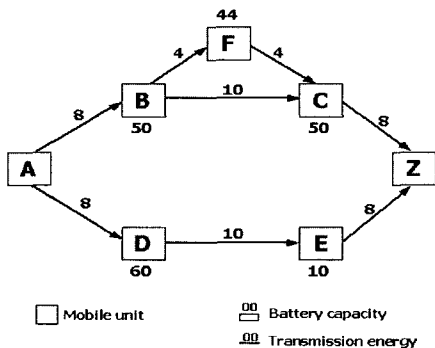


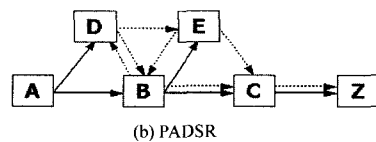
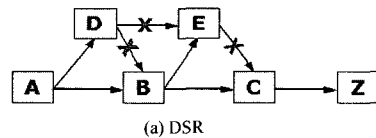
그림 5 노드 A가 노드 Z에게 패킷을 전송하고자 할 때 가능한 모든 경로

4이고 경로 2의 홑수 H_2 는 3이므로 여기서는 경로 2가 가장 좋은 경로로 선정된다. 목적지 노드 Z는 경로 응답 패킷에 가장 좋은 경로로 선정된 경로 2를 실어 소스 노드 A에게 보낸다. 노드 A가 경로 응답 패킷을 수신하면 경로 찾기 과정을 마치게 된다.

3.3 경로 요청 필터링

기존의 동적 소스 라우팅 프로토콜은 최대한 멀리 한번에 갈 수 있는 링크(link)로 구성된 가장 적은 홑수의 경로를 찾는 프로토콜이므로 i-node-disjoint 경로와 최단 경로 외에 한번에 갈 수 있는 거리를 여러 홑을 거쳐서 가는 우회 경로에 대한 정보는 지원하지 않는다. 하지만 어떤 패킷이 소스 노드에서 목적지 노드로 전송될 때 한 번에 갈 수 있는 거리라도 링크가 더 짧은 여러 개의 노드를 통하여 전송될 경우 전송 에너지의 소모를 줄일 수 있다. 이러한 경로를 찾기 위해서는 최단 경로와 i-node-disjoint 경로 이외에 모든 가능한 경로에 대한 지원이 필요하다. 모든 가능한 경로를 찾기 위해서는 하나의 노드가 두 개 이상의 같은 경로 요청 패킷을 받더라도 다시 브로드캐스트해 주어야 한다.

그림 6은 동적 소스 라우팅 프로토콜과 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 소스 노드 A가 소스 노드 Z로의 경로 찾기 동작을 수행하였을 때 경로 요청 패킷이 브로드캐스트되는 과정을 보여 주고 있다. 먼저 그림 6(a)의 동적 소스 라우팅 프로토콜을 보면 노드 D가 브로드캐스트한 경로 요청 패킷을 받은 노드 B와 노드 E는 각각 노드 A와 노드 B로부터 같은 경로 요청 패킷을 이미 받았으므로 노드 D에게서 받은 경로 요청 패킷은 무시한다. 따라서 목적지 노드 Z는 경로 A→B→C→Z를 기록한 경로 요청 패킷만을 수신하게 된다. 반면에 그림 6(b)의 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 보면 중계 노드인 노드 B, C, D, E는 두 번 이상의



□ Mobile unit → Flow of RREQ ... More than one of RREQ

그림 6 노드 A가 노드 Z로의 경로 찾기를 했을 때 경로 요청 패킷이 브로드캐스트 되는 경로 (a) 동적 소스 라우팅 프로토콜, (b) 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜

이상의 같은 경로 요청 패킷을 받더라도 자신의 주소가 경로 요청 패킷의 경로 레코드에 들어있지 않다면 다시 브로드캐스트하므로 목적지 노드 Z에 도착하는 경로는 A→B→C→Z, A→B→E→C→Z, A→D→E→C→Z, A→D→B→C→Z, A→D→B→E→C→Z, A→B→D→E→C→Z 총 6개가 된다.

하지만 이렇게 동작하면 경로 요청 패킷을 너무 많이 브로드캐스트하게 되어 패킷의 브로드캐스트에 드는 전력 소모가 많아진다. 따라서 우리는 이러한 문제를 해결할 수 있는 경로 요청 필터링(Route Request Filtering) 방법을 제안한다.

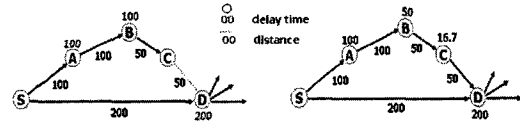
경로 요청 필터링은 한 노드가 경로 요청 패킷을 처음 수신하였을 때 다음에 들어올 수 있는 같은 경로 요청 패킷을 기다릴 대기 시간(W_i)을 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$W_i = RREQ_{wait} \times \frac{d}{h}$$

$RREQ_{wait}$ 은 한 노드에서 경로 요청 패킷을 처음 수신한 후 같은 경로 요청 패킷의 수신을 위해 단위 거리당 기다리는 시간을 상수로 나타낸 것으로 시스템에서 미리 정하는 값이다. h 는 소스 노드로부터 수신 노드까지의 홉 수를 나타낸다. 즉, 대기 시간은 송신 노드와 수신 노드의 거리에 비례하고 홉 수에 반비례하도록 하였다. 만약 수신 노드가 소스 노드로부터 1홉 떨어져 있고 송수신 노드 간의 거리가 1이라면 대기 시간은 $RREQ_{wait}$ 가 된다.

그림 7은 대기 시간 산출 시 노드 간의 거리와 홉 수를 고려한 이유를 나타내고 있다. 최대 전송 범위를 250으로 하였을 때, 그림 7에서 소스 노드 S가 경로 요청 패킷을 전달하면 노드 A와 노드 D가 수신한다. 거리만을 고려하여 대기 시간을 주면 노드 D는 200 동안 대기하고 노드 A는 100 동안 대기 후 수신한 경로 요청 패킷 중 가장 좋은 경로를 다시 브로드캐스트하게 된다. 이처럼 거리만을 고려하여 대기 시간을 정하면 노드 D는 짧게 여러 홉으로 돌아서 오는 경로 S→A→B→C→D를 수신할 수 없다. 하지만 그림 7(b) 처럼 대기 시간 산출 시 노드 간의 거리에 비례하고 홉 수에 반비례하도록 하면 노드 D는 짧게 여러 홉으로 돌아서 오는 경로 S→A→B→C→D를 수신할 수 있다. 때문에 우리는 대기 시간 계산 식을 거리에 비례하고 홉 수에 반비례하도록 하였다. 대기 시간 후에 가장 좋은 경로를 가진 경로 요청 패킷 하나만을 브로드캐스트함으로써 많은 경로 요청 패킷이 다시 브로드캐스트 되는 것을 막을 수 있다.

동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 처음 들어오는 경



(a) Delay time with only distance (b) Delay time with distance and hop
그림 7 RREQ_{wait} = 1일 때 대기 시간. (a) 노드간의 거리만을 고려한 대기 시간, (b) 노드간의 거리와 홉 수를 모두 고려한 대기 시간

로 요청 패킷 하나만을 브로드캐스트한다. 하지만 본 연구에서 제안하는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 경로 요청 필터링을 사용함으로써 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 고려하지 않는 나머지 모든 가능한 경로까지 고려하면서도 경로 요청 패킷의 범람으로 인한 불필요한 에너지 소모를 획기적으로 줄인다. 경로 요청 필터링은 거리와 홉수에 의해 계산된 대기 시간 동안 도착한 경로 중 가장 좋은 경로 하나만을 다시 브로드캐스트하여 나쁜 경로들은 버리고 우수한 경로들은 모두 목적지 노드에 도착하게 한다.

4. 실험 및 결과

본 장에서는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜의 성능 평가를 위한 실험을 수행하고 그 결과를 MAC 계층 전력 제어 방법을 사용하는 동적 소스 라우팅 프로토콜과 비교, 분석한다. 4.1절에서는 실험 환경에 대하여 설명하고, 4.2절에서는 경로 요청 필터링 알고리즘에 대한 실험 결과와 이 알고리즘을 포함하는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에 대한 실험 결과를 제시하고 분석한다.

4.1 실험 환경

무선 애드혹 통신망은 소규모 지역의 통신망을 위하여 설계된 망이다. 따라서 실험 환경도 이에 맞추어 1,000m × 300m 크기의 가상의 공간으로 설정하였다. 이 가상의 공간에는 무선 통신 기능을 갖춘 20개의 노드들이 임의의 지역에 분포하고 있고 이동 속도는 1m/s 또는 30m/s로 계속 움직이는 것으로 설정하였다. 하나의 실험 시 노드들의 이동 속도는 모두 똑같이 설정하였다. 각 노드의 최대 전송 거리는 250m이며 두 개의 노드의 거리가 250m 이상 떨어져면 서로 간의 직접 통신은 불가능하다. 실험에서 사용되는 패킷은 512 바이트(byte)의 CBR(Constant Bit Rate) 패킷이며 최대 8개의 데이터 전송 연결(connection)에서 2초에 한번씩 패킷을 생성하여 전송하도록 한 후 실험하였다. 즉, 각 전송 연결의 전송률은 256bps가 된다. 본 실험은 카네기 멜론(Carnegie Mellon) 대학교에서 개발한 무선 확장

(wireless extension)[6]이 추가된 ns-2[7]로 구현되었고, 지상파 모델로는 Two-ray ground reflection model[8]을 사용하였다

4.2 실험 결과

4.2.1 경로 요청 필터링

우리는 먼저 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 제공하는 경로 외에 모든 가능한 경로를 지원하기 위하여 한 노드가 수신한 같은 경로 요청 패킷을 여러 번 모두 재 브로드캐스트 하는 경우, 소스 라우팅 프로토콜에 비하여 통신망 내 경로 요청 패킷 개수가 얼마나 증가하는지 실험해 보았다. 그리고 나서 경로 요청 필터링 방법을 추가한 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 경로 요청 패킷의 수를 어느 정도 줄일 수 있는지에 대한 실험을 하였다.

그림 8은 20개의 노드가 쉬는 시간 없이 1m/s로 이동한다고 설정한 후 13,000초 간 실험하였을 때 라우팅 프로토콜에 따른 경로 요청 패킷의 개수를 보여주고 있다. 경로 요청 패킷의 개수는 노드들이 경로 요청 패킷을 브로드캐스트한 것의 수를 합산한 것이다. 그림 8의 결과를 보면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 경로 요청 필터링 알고리즘을 사용하지 않은 경우 전송하는 경로 요청 패킷의 개수가 MAC 계층에서 전력 제어 방법을 사용하는 소스 라우팅 프로토콜보다 약 12배 정도 증가되었다. 반면 경로 요청 필터링을 사용하는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 전송되는 경로 요청 패킷의 개수는 동적 소스 라우팅 프로토콜보다 약 15% 정도만 증가되었음을 알 수 있다.

경로 요청 필터링 알고리즘을 포함한 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜과 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 브로드캐스트되는 경로 요청 패킷의 개수에 대하여 좀 더 자세히 살펴보았다. 그림 9는 경로 요청 필터링이 포함된 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜과 동적 소스 라우팅 프로토콜에 대하여 노드들의 이동 속도가 다른 경우 경로 요청 패킷의 개수에는 어떠한 영향이 있는지 실험한 결과이다.

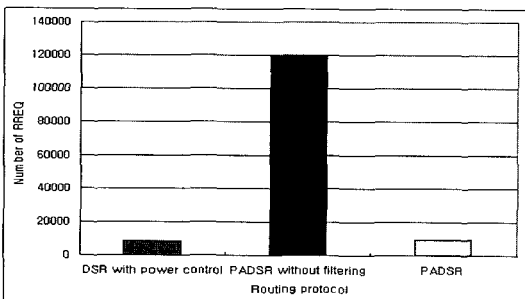
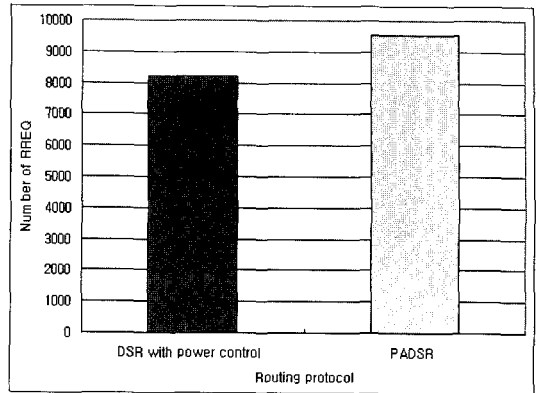
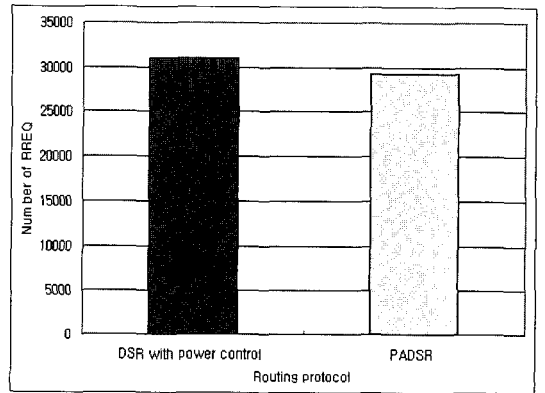


그림 8 라우팅 프로토콜에 따른 경로 요청 패킷의 개수



(a) speed: 1m/s



(b) speed: 30m/s

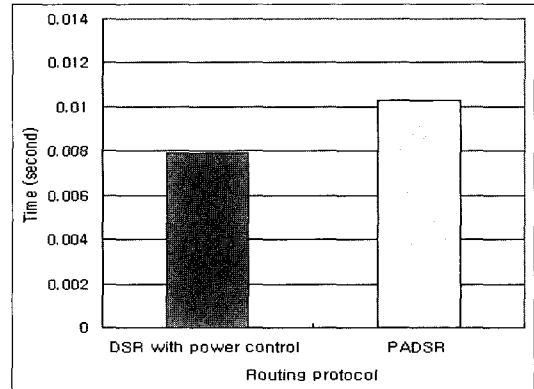
그림 9 노드들의 이동 속도에 따른 경로 요청 패킷의 개수

그림 9(a)의 그래프는 노드들이 1m/s로 계속 움직이고 있을 때 라우팅 프로토콜에 따른 경로 요청 패킷의 개수를 보여준다. 그림 9(a)의 결과를 보면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 동적 소스 라우팅 프로토콜에 비하여 약 15% 정도 브로드캐스트되는 경로 요청 패킷이 증가되었다. 기본적으로 생각해보면 동적 소스 라우팅 프로토콜이나 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이나 경로 요청 패킷을 받은 노드가 하나의 경로 요청 패킷만을 재전송하기 때문에 경로 요청 패킷 수는 같거나 비슷할 것으로 예상된다. 그런데 실험 결과와 같이 동적 소스 라우팅 프로토콜의 경로 요청 패킷이 더 적은 이유는 동적 소스 라우팅 프로토콜의 최적화 기법 중에 하나인 경로 응답 패킷의 캐싱(caching) 효과 때문으로 생각된다. 이 최적화 기법은 경로 응답 패킷을 수신한 중간 노드가 자신의 라우트 캐시에 경로 응답 패킷의 헤더에 있는 경로를 저장함으로써 다음에 같은 목적지 노드로 향하는 패킷에 대해서 자신이 라우

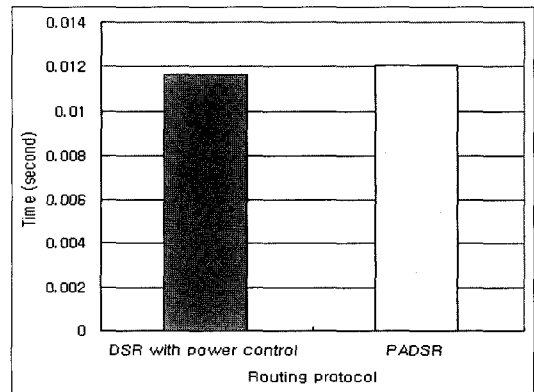
트 캐시에 가지고 있는 경로를 사용하여 패킷을 전달하도록 한다. 그 결과 경로 요청 시 전파되는 경로 요청 패킷의 수를 줄이고 패킷 전송 지연 시간을 줄이는 효과를 가져온다. 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서도 라우트 캐시를 사용하긴 하지만 목적지에서 하나의 경로만을 소스에게 전송하기 때문에 목적지에 도착한 모든 경로를 소스에게 전송하는 동적 소스 라우팅 프로토콜에 비해 캐싱 효과가 떨어지게 된다. 그러나 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 최적의 경로 하나만을 선정하여 그에 대한 경로 응답 패킷을 소스 노드에게 전송하므로 경로 응답 패킷의 개수는 줄어들게 되어 증가한 경로 요청 패킷 전송 시에 소모하는 에너지의 양을 다소 보상할 것으로 기대된다.

그림 9(b)의 그래프는 노드들이 30m/s로 계속 움직이고 있을 때 라우팅 프로토콜에 따른 경로 요청 패킷의 개수를 나타내고 있다. 그림 9(b)의 결과를 보면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 브로드캐스트하는 경로 요청 패킷의 개수는 동적 소스 라우팅 프로토콜에 브로드캐스트하는 개수에 비하여 약 5% 정도 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 노드들이 빠르게 움직일 경우에는 캐싱 효과 보다 링크 에러가 더 크게 작용하기 때문이다. 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 홉 수가 적은 경로를 선택하여 패킷을 전달하므로 경로 상의 인접한 노드끼리 전송 노드의 전송 범위의 경계 부근에 위치하게 되는 경우가 많다[9]. 이러한 경로를 선택하여 패킷을 전송할 때 그림 9(a)에서 노드들이 1ms로 움직일 때보다 9(b)에서처럼 노드들이 30ms로 빠르게 움직인다면 전송 노드의 전송 범위를 벗어나는 일이 자주 발생하게 되어 링크 에러가 빈번하게 발생한다. 그 결과 경로 찾기 동작을 더 자주 수행하게 되어 경로 요청 패킷의 양이 증가한다. 하지만 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 한번에 갈 수 있는 거리를 짧게 여러홉에 감으로 경로의 다음 노드가 전송 범위의 경계에 위치하는 일이 동적 소스 라우팅 프로토콜보다 적음으로 링크 에러가 적게 발생하여 그림 9(b)처럼 경로 요청 패킷의 양이 동적 소스 라우팅보다 적다.

경로 요청 필터링 방법을 사용하게 되면 경로 찾기 동작 시에 경로 요청 패킷을 수신한 중간 노드들은 정해진 대기 시간(wait time)동안 경로 요청 패킷들을 기다렸다가 하나의 경로 요청 패킷을 선택하여 재 브로드캐스트하게 된다. 본 실험에서 우리는 $RREQ_{wait}$ 의 값을 0.15초로 설정하고 실험하였다. 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜에서는 경로 찾기 동작 시 중간 노드에서의 지연 시간이 있으므로 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하였을 때보다 패킷 전송 지연 시간(packet delivery delay)이 길어진다. 우리는 패킷 전송 지연 시



(a) speed: 1m/s



(b) speed: 30m/s

그림 10 라우팅 프로토콜에 따른 패킷 전송 지연 시간

간이 얼마나 길어졌는지 측정해 보았다. 그림 10은 기본 환경으로 설정한 후 13,000초 간 실험한 라우팅 프로토콜에 따른 패킷 전송 지연 시간을 보여주고 있다.

그림 10(a)의 그래프는 노드들이 1m/s로 계속 움직이고 있을 때 라우팅 프로토콜에 따른 전송 지연 시간을 보여주고 있다. 그림 10(a)의 결과를 보면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 동적 소스 라우팅 프로토콜에 비하여 약 20% 정도의 패킷 전송 지연 시간이 길어졌다. 동적 소스 라우팅 프로토콜의 패킷 전송 지연 시간이 길어지는 것은 다음 세 가지로 설명할 수 있다. 첫째, 경로 요청 패킷 필터링을 위해서 라우트 상의 각 노드들이 3.3절에서 언급한 식에 따라 어느 정도 대기 시간을 가지기 때문이고 둘째, 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하면 최단 거리 라우트가 아닌 짧게 여러 노드를 거치는 라우트를 선택하므로 그만큼 시간이 지연되기 때문이다. 마지막 세번째 이유는 그림 9 설명에서 언급했듯이 캐싱 효과에 의해 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 경로 찾기를 더 많이 하기 때

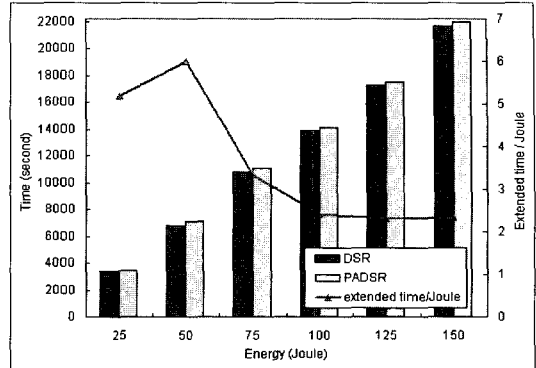
문에 그만큼 시간이 더 지연된다. 그림 10(b)의 그래프는 노드들이 30m/s로 계속 움직이고 있을 때 라우팅 프로토콜에 따른 전송 지연 시간을 보여주고 있다. 그림 10(b)의 결과를 보면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 동적 소스 라우팅 프로토콜에 비하여 약 3% 정도만 패킷 전송 지연 시간이 증가됨을 알 수 있다. 노드들이 1m/s로 느리게 움직이는 것에 비해 지연 시간의 차가 줄어든 이유는 그림 9에서와 마찬가지로 노드들이 빠르게 움직일 경우 링크 에러 효과가 더 많이 발생하기 때문이다. 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하면 통신망 내의 노드들이 빠르게 움직일 경우 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 것보다 링크 에러가 적게 생겨 경로 찾기 동작의 수행 횟수가 줄어든다. 따라서 전송 지연 시간의 차가 느리게 움직이는 상황에 비해 줄어들게 된 것이다.

지금까지 우리는 경로 요청 필터링이 무선 적용 이동 통신망에 미치는 영향에 대하여 살펴 보았다. 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 지원하지 않는 모든 가능한 경로를 지원하기 위해서는 경로 요청 패킷의 수가 증가할 수 밖에 없다. 하지만 우리는 이 제어 패킷의 수를 줄이기 위하여 경로 요청 필터링 알고리즘을 제안하였다. 이 방식을 사용하게 되면 경로 요청 패킷의 수는 줄어들지만 대신 전송 지연 시간이 늘어나게 된다. 하지만 늘어나게 되는 시간이 10^{-3} 초 단위이므로 사용자가 특별한 불편함 없이 사용할 수 있을 것으로 생각한다.

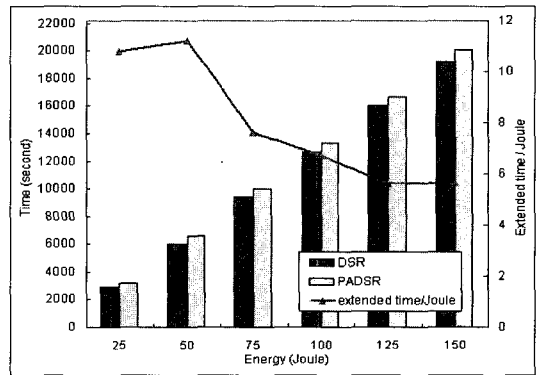
4.2.2 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜

무선 애드혹 통신망이 오랫동안 유지되도록 한다는 것은 통신망을 구성하고 있는 모든 노드들이 오랫동안 서로 통신이 가능하다는 것을 의미한다. 만약 어떤 노드가 다른 노드들에 비하여 자신의 에너지를 더 일찍 많이 소모하고 동작을 멈추게 된다면 통신망의 분할을 야기시킬 수도 있다. 대부분 처음 에너지를 모두 소모하는 노드들은 통신망을 형성하는데 중요한 역할을 하는 노드가 된다. 따라서 우리는 통신망에서 처음 에너지를 모두 소모하는 노드가 나타나는 시간을 통신망의 수명이 다하는 시간으로 정하였다. MAC 계층에서 전력 제어를 하는 동적 소스 라우팅 프로토콜과 본 논문에서 제안하는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용한 경우에 대하여 실험하여 에너지를 모두 소모한 노드가 처음 나타나는 시간을 측정해 보았다.

그림 11은 기본 환경으로 설정한 후 13,000초간 실험 하였을 때 각 노드의 초기 에너지량에 따른 에너지를 모두 소모한 노드가 처음 나온 시점을 라우팅 프로토콜에 따라 보여준다. 그림 11의 2개 그래프 중 막대 그래프는 에너지량에 따라 자신의 에너지를 모두 소모한 노드가 처음 발생한 시간을 나타내고, 선 그래프는 전력



(a) speed: 1m/s



(b) speed: 30m/s

그림 11 노드들의 초기 에너지량에 따라 에너지를 모두 소모한 노드가 처음 나오는 시점

인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용한 경우 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하였을 때 보다 에너지 1 줄(joule)당 수명이 얼마나 더 유지되는지를 나타낸다.

그림 11(a)의 막대 그래프는 노드들이 1m/s로 계속 움직이고 있을 경우 에너지량에 따라 통신망 내의 모든 노드들 중 에너지를 모두 소모한 노드가 처음 나타나는 시간을 라우팅 프로토콜에 따라 나타낸 것이다. 그림 11(a)의 결과를 보면 초기 에너지량이 증가함에 따라 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 동적 소스 라우팅 프로토콜에 비하여 좀 더 오래 살게 됨을 알 수 있다. 그림 11(a)의 선그래프를 보면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 것이 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 것보다 에너지량 1 줄당 2.3초가량 더 살게 됨을 알 수 있다. 즉, 각 노드의 초기 에너지량이 1,000줄이었다면 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 것이 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 것보다 약 2,300 초 가량 더 살게 된다. 다시 말하면 통신망의 분할 없이 유지되는 무선 애드혹 통신망의

수명이 2,300초 가량 연장된다는 것을 의미한다.

그림 11(b)의 그래프는 노드들이 30m/s로 계속 움직이고 있을 경우의 실험 결과이다. 그림 11(b)의 결과를 보면 그림 11(a)에서의 결과처럼 초기 에너지량이 증가함에 따라 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜이 동적 소스 라우팅 프로토콜에 비하여 좀 더 오래 살게 된다. 하지만 노드들의 이동 속도가 빨라지게 되면 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 링크가 더 자주 끊기게 되어 경로 유지 관리를 위해 소모하게 되는 에너지가 증가하게 된다. 따라서 노드들이 1m/s로 움직일 때보다 30m/s로 빠르게 움직일 경우 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하면 에너지 1줄 당 증가한 수명이 더 커지게 된다. 그림 11(b)의 선 그래프를 보면 1m/s로 노드들이 이동할 때보다 통신망의 수명이 2배 이상 증가되었음을 알 수 있다.

무선 애드혹 통신망이 구성되어 동작할 때 모든 노드들의 에너지량이 서로 다른 경우가 대부분일 것이다. 이렇게 각 노드들의 에너지량이 다른 경우 에너지량이 적은 노드는 더 빨리 에너지를 모두 소모하게 될 것이다. 따라서 가능한 한 에너지량이 적은 노드를 피하여 경로를 선택하는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하면 시간이 지남에 따라 노드들의 에너지량이 점차 비슷해질 것이다.

그림 12는 20개의 노드가 1,000m×300m의 공간에서 쉬는 시간 없이 1m/s로 계속 이동한다고 설정한 후 13,000초간 실험하였을 때 노드들의 초기 에너지량의 표준 편차에 따른 에너지를 모두 소모한 노드가 처음 나타난 시점을 보여주고 있다. 이 실험에서 사용된 노드들의 초기 에너지량의 평균은 100줄이다.

그림 12의 결과를 보면 노드들의 에너지량의 표준 편차가 커짐에 따라 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 통신망이 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 통신망에 비하여 점차적으로 더 오래 유지됨

을 알 수 있다. 그림 12의 선 그래프를 보면 초기 에너지량의 표준 편차가 0일 때는 에너지 1줄 당 약 2.3초 가량 처음 에너지를 모두 소모한 노드의 수명을 연장시켰다. 그리고 초기 에너지량의 표준 편차가 18까지 커지면 약 2.7초 가량으로 에너지 1줄 당 수명이 늘어나게 된다. 이것은 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용할 경우 통신망 내의 노드들의 에너지량이 다르다면 경로 선택 시 에너지량이 작은 노드를 포함하고 있는 경로를 피하여 경로가 선택된다는 것을 의미한다. 본 실험의 노드들의 평균 에너지량은 100줄이므로 표준편차가 20% 이상이 될 경우 에너지량이 아주 작은 노드가 경로에 포함될 수 밖에 없는 상황이 존재하여 특정 노드의 수명이 통신망의 수명에 아주 큰 영향을 주게 된다. 따라서 표준편차 20% 이하에서는 줄당 수명 연장 시간이 점차 늘어나다가 20% 이상부터 그림 12와 같이 줄당 수명 연장 시간이 줄어들게 된 것이다.

5. 관련 연구

5.1 PARO(Power-Aware Routing Optimization)

PARO[3]는 모든 노드들이 각 노드의 전송 범위 안에 위치하고 있는 무선 애드혹 통신망을 위한 전력 인식 라우팅 기술이다. PARO의 원리는 소스 노드와 목적지 노드가 패킷을 송수신하고자 할 때 그 패킷을 중계해줄 리다이렉터(redirector)라고 불리는 중계 노드들을 선출하여 짧은 거리로 여러 중계 노드를 거쳐서 패킷을 전송하여 패킷 전송시에 소모되는 전체 전송 에너지를 줄이고자 하는 것이다. PARO는 소스 노드와 목적지 노드 사이에 리다이렉터 노드들의 수를 최대한 함으로써 전송 에너지의 양을 최소화 한다. PARO 프로토콜의 동작 과정을 보면 먼저 소스 노드와 목적지 노드는 중간에 패킷을 전달해주는 중계 노드 없이 직접 통신을 하게 된다. 이 패킷을 엿들은 중간 노드들은 만일 자신을 거쳐서 목적지에 갈 때 직접 소스 노드와 목적지 노드가 통신하는 것보다 전송 에너지의 소비를 줄일 수 있는지 계산한다. 만일 전송 에너지의 소비를 줄일 수 있다면 이 노드는 리다이렉터가 되어 소스 노드와 목적지 노드에게 경로 전환(route-redirect) 메시지를 보낸다. 이런 식으로 반복적으로 여러 번 동작하여 가장 작은 전송 에너지를 소모하는 최적의 경로를 찾는다. PARO 모델은 통신망 내의 모든 노드들이 1홉 범위 안에 위치하는 경우에만 적용할 수 있는 라우팅 프로토콜이다. 또한 전송 에너지량의 소모가 가장 적은 경로만을 고려하여 패킷을 전송하기 때문에 통신망 내의 어떤 특정 노드가 다른 노드들에 비하여 일찍 에너지를 소모할 수 있다.

5.2 On-Demand Power Management for Ad Hoc Networks[10]

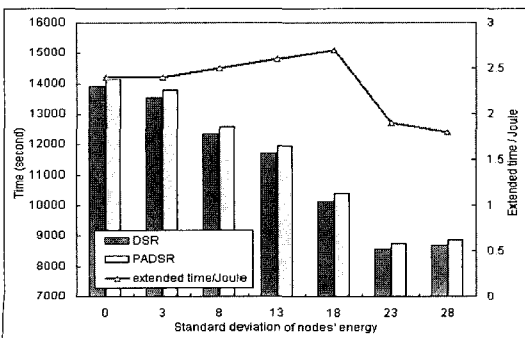


그림 12 각 노드의 초기 에너지량의 표준 편차에 따라 처음 에너지를 모두 소모한 노드가 나타나는 시점

[10]은 라우팅 프로토콜의 두 가지 접근 방법인 프로액티브(proactive)와 리액티브(reactive) 방법을 적절히 상황에 맞게 선택하여 노드의 전력 소모를 최소화하는 방법을 제안하였다. 각 노드는 소프트 스테이트 타이머(soft-state timer)를 이용하여 제한 시간을 결정하고 그 시간 동안 통신망을 통해 어떠한 메시지도 오지 않았을 경우 전력 제한(power-save) 모드로 변경된다. 노드는 전력 제한 모드에서 주기적으로 깨어나 처리해야 할 메시지가 있는지 검사하고 만약 있을 경우 활성화(active) 모드로 돌아오게 된다. 다시 말하면 [10]은 데이터 링크 계층과 통신망 계층을 모두 고려하는 접근 방법을 사용하여 데이터 링크 계층에서는 소프트 스테이트 타이머를 작동시키고 통신망 계층에서는 통신망 정보를 수집하여 노드 자신이 라우팅과 관련이 없고 타이머가 만료되었을 경우 노드의 통신망 관련 부분의 동작을 정지시켜 전력 소모를 줄이는 방법을 제안하였다. [10]은 각 노드가 소모하는 송신 에너지의 양을 줄이고자 하는 방법으로 어떤 특정 노드가 여러 소스 노드로부터의 중간 노드가 되어 자신의 에너지를 많이 소모하게 될 경우 그 노드가 다른 노드들에 비하여 일찍 죽게 되어 통신망에 파티션을 야기할 수 있다.

5.3 PBSR(Power-Based Source Routing)

PBSR[11]은 송신 전력을 조절하여 각 노드가 소모하는 에너지량을 줄이는 방법이다. PBSR은 이웃 테이블(neighbor table)을 만들어 자신의 이웃 노드의 정보를 관리하여 전송 에너지 조절에 이용한다. 이웃 테이블은 이웃 타이머(neighbor timer)가 만료될 때 마다 이웃 정보를 갱신한다. 각 노드는 자신이 소스 노드이거나 목적지 노드인 경우 최대 전송 에너지로 패킷을 전송하고, 자신이 중간 노드인 경우 이웃 노드의 숫자에 따라 전송 에너지를 조절한다. 또한 모드 타이머(mode timer)를 이용하여 일정시간 동안 노드가 어떠한 패킷도 전송하지 않으면 취침 모드(sleep mode)로 변환하여 송신 전력을 최저값으로 설정하여 패킷을 전송한다. PBSR도 [10]과 마찬가지로 각 노드가 소모하는 송신 에너지의 양을 줄이고자 하는 방법으로 어떤 특정 노드가 여러 소스 노드로부터의 중간 노드가 되어 자신의 에너지를 많이 소모하게 될 경우 통신망에 파티션을 야기할 수 있다.

6. 결론

무선 애드혹 통신망을 구성하는 이동 기기들이 서로 통신을 하고자 할 때 송신 기기는 수신 기기로 가기 위한 경로를 선택 해야 한다. 이때 특정 이동 기기가 자신의 에너지를 모두 소모하여 동작을 멈추게 되었을 때 전체 통신망의 분할을 가져올 수 있다. 따라서 본 논문

에서는 이렇게 특정 이동 기기가 다른 이동 기기들에 비하여 일찍 자신의 에너지를 모두 소모하게 되는 것을 막고 모든 노드들이 비슷하게 수명을 유지하여 전체 통신망의 수명을 연장시킬 수 있는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 라우팅 프로토콜은 동적 소스 라우팅 프로토콜에서 고려하지 않는 모든 가능한 경로까지 고려하기 위하여 기존의 라우팅 프로토콜에 비하여 많은 제어 패킷을 브로드캐스트하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 분산 알고리즘인 경로 요청 필터링 알고리즘을 제안하였다. 실험을 통한 성능 측정 결과, 경로 요청 필터링 알고리즘을 사용하면 사용하지 않았을 때에 비하여 브로드캐스트 되는 제어 패킷의 개수가 약 90% 가량 줄어 들었다. 본 논문에서 제안한 경로 요청 필터링 알고리즘을 사용하는 라우팅 프로토콜은 이동 기기들이 1m/s로 천천히 움직일 경우에 통신망 내에 브로드캐스트되는 제어 패킷의 수가 기존의 라우팅 프로토콜을 사용하는 경우에 비하여 약 15% 가량 증가하였다. 하지만 이동 기기들이 30m/s로 빠르게 움직일 경우엔 오히려 기존의 라우팅 프로토콜에 비하여 브로드캐스트 되는 제어 패킷의 수가 약 5% 가량 감소하는 효과를 보였다. 한편 이 알고리즘은 지연 시간을 가지고 제어 패킷을 재 브로드캐스트하므로 패킷 전송 지연 시간이 기존의 라우팅 프로토콜에 비하여 길어진다. 하지만 실험 결과 늘어난 지연 시간은 10^{-3} 초 단위이므로 사용자로 하여금 특별한 불편함을 느끼도록 하진 않을 것으로 생각된다.

본 논문에서는 실험을 통하여 전력 인식 동적 소스 라우팅을 사용할 경우 통신망의 수명이 얼마나 연장되는지 측정해 보았다. 통신망을 구성하는 이동 기기들이 1m/s로 천천히 움직일 때는 기존의 라우팅 프로토콜을 사용하는 것보다 통신망의 수명이 에너지 1줄 당 약 2.3초 가량 연장되었고 이동 기기들이 30m/s로 빠르게 이동할 때는 통신망의 수명이 에너지 1줄 당 약 6초 가량 연장된다는 것을 알 수 있었다. 또한 통신망을 구성하는 노드들의 초기 배터리량이 모두 다른 경우 즉, 노드들의 배터리량의 표준 편차가 0 이상인 경우 통신망의 수명은 표준 편차가 커질수록 점차적으로 증가하였다. 그 이유는 전력 인식 동적 소스 라우팅 프로토콜을 사용하는 경우 노드의 배터리량이 많은 경로를 찾아 패킷을 전송 하도록 동작하기 때문이다. 전력 인식 동적 소스 라우팅을 사용할 경우, 주로 에너지량이 많은 이동 기기를 통하여 통신을 하도록 하여 전체 이동 기기들의 수명을 비슷하게 만든다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] Elizabeth Royer and C-K. Toh, "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," IEEE Personal Communication, Vol. 6, pp. 46-55, Apr. 1999.

[2] D. B. Johnson, D. A. Maltz and Josh Broch, "The dynamic source routing protocol for multihop wireless ad hoc networks," Ad Hoc Networking, edited by C. E. Perkins, pp. 139-172, 2001.

[3] J. Gomez, A. T. Campbell, M. Naghshineh, and C. Bisdikian, "Conserving transmission power in wireless ad hoc networks," In ICNP' 01, Nov. 2001.

[4] Eun-Sun Jung and Nitin H. Vaidya, "A power control MAC protocol for ad hoc networks," In MobiCom2002, Sep. 2002.

[5] C. E. Perkins and E. M. Royer, "The ad hoc on-demand distance-vector protocol," Ad Hoc Networking, edited by C. E. Perkins, pp. 173-219, 2001.

[6] THE CMU MONARCH GROUP, "Wireless and mobility extensions to ns-2," <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>, Oct. 1999.

[7] K. Fall and K. Varadhan, The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation), The VINT Project, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation>.

[8] T. S. Rappaport, Wireless communications, principles and practice, Prentice Hall, 1996.

[9] Geunhwi Lim, Kwangwook Shin, Seunghak Lee, and H. Yoon, "Link stability and route lifetime in ad-hoc wireless networks," 2002 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'02), Aug. 18-21, 2002.

[10] Rong Zheng and Robin Kravets, "On-demand power management for ad Hoc networks," IEEE Infocom 2003, San Fransisco, 30 Mar.~3 Apr. 2003.

[11] Yu Liu and Jack Lau, "A power-based source routing for wireless mobile ad hoc communications, 4th International workshop on mobile and wireless communications network, Stockholm, Sweden, 9-11 Sep. 2002.

[12] IEEE Std. 802.11, Wireless LAN Media Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.

[13] 임근휘, "애드혹 무선 통신망에서의 플러딩에 관한 연구", 석사학위 논문, 1998.

[14] S. Singh, M. Woo, and C.S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," ACM/IEEE MOBICOM, Dallas, Texas, Oct. 1998.

[15] C. S. Raghavendra, and S. Singh, "PAMAS-Power aware multi access protocol with signaling for ad hoc networks," Computer Communications Review, 1998.



정혜영

2001년 숭실대학교 컴퓨터학부 졸업
2003년 2월 한국과학기술원 전산학과 졸업. 2003년 3월~현재 삼성전자 연구원
관심분야는 MANET, Wireless PAN, IPv6, P2P 등



신광욱

1997년 서강대학교 전산학과 졸업(학사)
1999년 한국과학기술원 전산학과 졸업(석사). 1999년 9월~한국과학기술원 전자전산학과 박사과정. 관심분야는 애드혹 네트워크, 센서 네트워크, 피투피 네트워크 등



임근휘

1996년 한국과학기술원 전산학과 졸업
1998년 한국과학기술원 전산학과 석사
2003년 한국과학기술원 전산학과 박사
2003년~현재 삼성전자 근무



이승학

2000년 한국과학기술원 전산학과 졸업(학사). 2003년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2003년 3월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정. 관심분야는 애드혹 네트워크, 센서 네트워크 등



윤현수

1979년 서울대학교 전자공학과 졸업
1981년 한국과학기술원 전산학과 석사
1988년 미국 오하이오 주립대학 전산학과 박사. 1989년~한국과학기술원 교수
관심분야는 병렬 컴퓨터 구조, 무선 이동통신, 애드혹 네트워크, 정보 보호 등