무선 애드혹 망을 위한 연결 지배 집합 다중-링 위상의 분산적 구성-볼츠만 기계적 접근

(Distributed Construction of the Multiple-Ring Topology of the Connected Dominating Set for the Mobile Ad Hoc Networks: Boltzmann Machine Approach)

박 재 현 †

(Jae-Hyun Park)

요 약 본 논문은 연결 지배 집합에 속하는 노드들로 애드혹 망의 위상을 구성하는 완전 분산형 위상 제어 프로토콜을 제시한다. 제안한 프로토콜은 가능한 최소의 노드 수로 위상을 구성할 수 있게 하여 패킷 전송 시 발생하는 간섭을 줄일 수 있다. 제안한 프로토콜의 알고리즘 복잡도는 $O(1)$이다. 각 노드는 분산된 병렬 볼츠만 기계의 한 노드로서 동작한다. 이 볼츠만 기계의 목적 함수를 연결의 차수와 연결 지배 정도를 표현하는 두 개의 볼츠만 인수로 구성한다. 이 볼츠만 인수들을 정의하기 위해 두 개의 퍼지 집합을 정의한다. 하나는 연결 지배 노드로 이루어진 퍼지 집합이며, 다른 하나는 다중-링 위상 구성이 가능한 노드로 이루어진 퍼지 집합이다. 제안한 프로토콜은 이 두 퍼지 집합의 강한 원소 노드들을 애드혹 망의 클러스터 헤드로 선택한다. 모의 실험을 통해 패킷 손실율과 에너지 소비율 측면에서 제안 프로토콜이 기존 방법에 비해 우수함을 확인하였다.

키워드 : 연결 지배 노드 집합, 애드혹 망

Abstract In this paper, we present a novel fully distributed topology control protocol that can construct the multiple-ring topology of Minimal Connected Dominating Set (MCDS) as the transport backbone for mobile ad hoc networks. It makes a topology from the minimal nodes that are chosen from all the nodes, and the constructed topology is comprised of the minimal physical links while preserving connectivity. This topology reduces the interference. The all nodes work as the nodes of the distributed parallel Boltzmann machine, of which the objective function is consisted of two Boltzmann factors: the link degree and the connection domination degree. To define these Boltzmann factors, we extend the Connected Dominating Set into a fuzzy set, and also define the fuzzy set of nodes by which the multiple-ring topology can be constructed. To construct the transport backbone of the mobile ad hoc network, the proposed protocol chooses the nodes that are the strong members of these two fuzzy sets as the clusterheads. We also ran simulations to provide the quantitative comparison against the related works in terms of the packet loss rate and the energy consumption rate. As a result, we show that the network that is constructed by the proposed protocol has far better than the other ones with respect to the packet loss rate and the energy consumption rate.

Key words : Auto-Configuration, Minimal Connected Dominating Set, Multiple-Ring Topology, Topology Control Protocol, Distributed Parallel Boltzmann Machine, Mobile Ad Hoc Network

1. 서 론

무선 애드혹 망의 용량과 에너지의 유한한 가용성 때문에, 위상 제어 프로토콜은 미래의 무선망의 근본적인 구성요소로 생각되고 있다[1]. 공유하는 무선 매체를 통해서, 방송을 사용한 신호 전달을 하는 이동 애드혹 망은 장기간 사용할 수 있고, 패킷들의 전달을 원활히 할 수 있어야 한다. 따라서, 이동 애드혹 망의 위상은 패킷을 전송할 때 발생하는 매체에서의 간섭을 줄이도록 구

· 이 논문은 2005년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임

† 정 회 원 : 중앙대학교 공과대학 컴퓨터공학부 교수

hyunie@cau.ac.kr

논문접수 : 2006년 8월 8일

심사완료 : 2007년 3월 22일

성되어야 한다. 간섭을 줄여서 망의 용량을 증가시키기 위해서, 위상 제어 프로토콜은, 물리적인 노드의 차수가 제한된, 간섭에 한정적인 위상을 생성해야 한다[1]. 그리고, 각 노드에서 소요되는 에너지를 전지로서 공급하기 때문에, 장기간 사용하기 위해서는, 유휴 상태로 있으면서 전송 매체를 읽는데 드는 에너지의 소비를 줄여야 한다. 또한, 노드들의 이동에도 불구하고, 통신 망을 유지해야 한다[1,2].

간섭을 줄이고, 에너지를 절감하는 방법들로서, 무선 연결들의 전송 파워를 조작하여, 가능한 최소의 연결들을 가지는 노드들로 구성된 위상을 만들기 위한 많은 연구들이 있어 왔다[1-5,24-29]. 그러나, 이 방법들 중 대부분은 연결성을 보장하나, 노드의 물리적인 이웃들의 수보다는 오히려 마지막 통신 위상에서 노드의 한-홉 이웃들의 수를 줄이려고 시도한다. 예외적으로, 연결성을 보장하지는 못하나, k 개의 가장 가까운 이웃들에게로 각 노드를 연결하는 경험적(Heuristic) 지식으로, 노드들 물리적 이웃들의 수를 줄이는 프로토콜이 Blough에 의해 최근에 제안되기도 하였다[1]. 그러나, 이 방법들은 모든 노드들로 위상을 만들기 때문에, 약간의 노드들을 사용하여 위상을 구성하는 다른 방법들보다 본질적으로 더많은 연결들을 사용하게 된다.

다른 한편으로, 패킷을 전달하는 애드혹 망의 중추를 전체 노드들 중 일부 노드들만으로 구성하는, 다시 말해 연결된 지배 노드들의 집합(Connected Dominating Set)에 속하는 노드들만으로 망을 구성하여, 전달망을 구성하는 연결들의 개수를 가능한 최소로 선택함과 동시에, 망의 노드 수와 연결들의 수를 줄여, 결과적으로, 간섭을 줄이고 에너지 소비를 줄이는 방법들이 많이 제안되었다[6,7,17-23]. 그러나, 이 구성법들은 그들이 연결성을 보존하지는 못하지만 간섭을 줄이거나[20,21,23], 가능한 최소로 간섭을 줄이지는 못하지만, 연결성을 유지 한다[17-19,22]. 그리고, 이러한 방법들은 성능, 에너지 효율성, 강인성 측면에서 효과적인 특정한 위상을 구성하려고 하지 않았다.

다중-링(Multiple-ring) 망은 고유한 신뢰성과 단일 결함 감내의 성질 때문에 통신 망을 구성하는 우수한 대안으로 생각되어져 왔다[8,9]. 또한, 이러한 링 망은 다중 전송과 방송에 효율적이기 때문에, 병렬 처리를 위한 상호 연결 망으로서 좋은 대안으로 여겨져 왔다[10]. 이러한 다중-링의 망의 신뢰성과 단일 결함 감내의 성질은 이동 애드혹 망의 신뢰성 증진에 효과적일 것으로 믿어지며, 전쟁터를 위한 이동 애드혹 망에 이 위상의 효율적인 다중 전송과 방송을 가능하게 하는 성질이 유용할 것으로 기대한다. 그리고, 다중-링의 위상을 구성하는 대부분의 노드들의 연결 차수는 하나, 둘, 혹은 셋이다. 이러한 차수들은 연결 그래프를 구성하기 위해 각 노드에게 요구되는 최소 연결들의 수이다.

본 논문에서 우리는 기동성이 있는 애드혹 망에서 발생하는 무선 매체의 간섭을 줄이고, 망 운용에 필요한 에너지를 절감하기 위하여, 전체 노드들 중 연결된 지배 노드들의 집합 에 속하는 가능한 최소의 노드들로, 연결성을 유지하며, 다중-링 위상의 망을 구성하는 분산된 위상 제어 프로토콜을 제안한다. 바꾸어 말하면, 우리들은 구성된 토폴로지가 연결성을 보존하는 동안에 가능한 최소 물리적인 연결들로 구성되도록, 모든 노드들로부터 선출된 가능한 최소 노드들로부터 위상을 만드는 분산된 위상 제어 프로토콜을 제안한다. 결과적으로, 구성된 위상은 연결성을 보존하며 가능한 최소의 물리적인 연결들을 가지게 된다.

조합적 최적화 문제를 풀기위해, 볼츠만 기계[11,12]와 같은, 신경 망이 많이 사용되어 왔다[13-16]. 이들과 같이, 적절한 목적 함수를 유도한다면 망의 위상의 최적화를 위한 병렬 볼츠만 기계를 만들 수 있다. 우리는 애드혹 망을 구성하는 노드들이 처리 능력이 있기 때문에, 신경 망의 뉴런처럼 동작하는데 아주 적합하다는 점에 착안하여, 우리가 아는 한 최초로, 볼츠만 기계를 이동 애드혹 망에 직접 사상하는 새로운 위상 최적화 프로토콜을 제안한다.

분산된 병렬 볼츠만 기계를 만들기 위해, 우리는 다음과 같은 두개의 볼츠만 인수의 합산으로 구성된 목적 함수를 유도한다. 첫 인수는 노드의 연결 차수가 얼마나 2에 가까운지를 표현한다. 다른 인수는 주변 노드들을 연결하는 것에 대한 노드의 기여 정도를 표현한다. 이 볼츠만 인수들을 정형적으로 유도하기 위하여, 우리들은 연결 지배노드들의 집합(Connected Dominating Set)을 퍼지 집합으로 확장하고, 다중-링 위상을 구성할 수 있는 노드들의 퍼지 집합을 정의한다. 이러한 볼츠만 인수들(Boltzmann factors)로 구성된 목적함수를 사용하여, 각 노드는 자신을 애드혹 전달망의 구성에 참여하는 클러스터헤드로 제안하기 위한 우선순위를 계산한다. 볼츠만 기계에 근거하였기 때문에, 구성되는 위상은 전역적인 최적에 수렴한다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서 관련된 작업들을 살펴본다. 3절에서는 볼츠만 기계에 근거하여, 다중-링의 분산적 병렬 구성 방법을 제시한다. 4절에서는 ns-2 망 모의 구현된 프로토콜을 사용하여, 성능과 에너지의 소모 정도를 분석한 결과들을 제시한다. 마지막으로, 5절에서 결론을 맺는다.

2. 관련된 작업들

위상을 관리하는 방법들로서, 제한된 작은 수의 연결

들로 이어진, 일부의 노드들로 구성하는 전달 망의 중추와, 전원을 꺼서 전체적인 에너지 소모를 줄이며, 이들을 사용하는, 호스트들로 무선 애드혹 망을 구성하기 위한 많은 연구들이 있어 왔다[6,7,17-23]. 이러한 문제는 그래프 이론의 최소 지배노드 집합(Minimum Connected Dominating Set) 문제로 잘 설명된다[6,17]. 이 문제에서, 하나의 노드는 지배 노드 집합에 속하거나, 지배 노드 집합의 노드에 인접하는 특성을 만족한다. 이 지배 노드 집합의 원소는 클러스터헤드(Clusterhead)로 불리우고, 나머지 노드들은 호스트들로 불리운다.

최소 지배노드들의 집합을 계산하는 문제는, 전체 망의 위상을 아는 경우에도 조차, NP-hard 문제로 알려져 있다[6,7]. 더우기, 이동 애드혹 망에서는 전체망의 위상이 동적으로 변하기 때문에, 전체 망의 위상 정보를 얻기 어렵고, 따라서, 최소 지배노드들의 집합을 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 다항식의 수의 절차들에 의해, 국부적으로 최적화된, 가능한 최소의 지배노드 집합(Minimal Connected Dominating Set)을 선출하는 다양한 경험적(Heuristic) 방법들[6,7,17]이 제안되었다. 이러한 방안들은 수신기의 전원을 켜고 끄는 것을 제어하여, 전달망을 구성하는 연결들의 개수를 가능한 적게 선택하여, 전달망을 유지하는데 필요한 에너지를 절약하려고 시도한다. 그러나, 이 구성법들은 그들이 연결성을 보존할 수 없지만 간섭을 줄이거나[20,21,23], 가능한 최소로 간섭을 줄일 수 없지만, 연결성을 유지한다[17-19,22]. 또한, 이들 방법들은 전역적인 최적화가 아닌, 국소적인 최적화를 시도하는 경험적인 방법들이다.

한편, 연결들의 전송 파워를 조절하여, 효율적인 무선 애드혹 망의 위상을 만들기 위한 많은 연구들이 있어 왔다[2]. 무선 애드혹 망의 위상의 구성을 위해, 한정된 수의 연결을 가지고 있는 노드들로 구성된 위상을, 국소적인 방법으로 혹은 전역적인 방법으로, 구성하는 법들이 제안되었다. 이들 방법들은 노드의 전송 파워를 조절하여, 적은 수의 연결들로 연결된 모든 노드들을 포함하는 위상의 망을 구성하였다[24-29]. 이러한 제안들은 원래 계산 기하학에서 연구된 것을 채택한 것인데, Delaunay Triangulation[26], minimum spanning tree [27], Relative Neighborhood Graph[28], 그리고 Gabriel Graph[29]가 그것이다.

이 방법들로 구성된 망은, Blough의 연구[1]를 제외하고는, 연결성을 보장하나, 물리적 연결수를 줄이기 보다는 논리적인 연결을 줄인다. Blough의 연구에서 제시된 방법은 물리적 연결수를 줄이나 연결성을 보장하지 못한다. 그리고, 위상이 모든 노드들로 구성되기 때문에, MCDS인 일부 노드들만을 사용하여 전달 망을 구성하는 방법에 비해 본질적으로 더 많은 연결들을 사용한다. 또한, 전역적인 최적화를 시도하는 방법들이 있었으나, 이 방법들은, 전체 망의 정보를 필요로 하고, 또한 분산적 처리를 할 수 없기 때문에, 실용적이지 못하다[25, 26]. 더군다나 이 방법들에 의해서 만들어진 위상의 희소성은 간섭을 줄이지 못할 수도 있다[25]. 또한, 이 방법들은 방향성 정보나, 지리 정보를 사용하기 때문에, 상대적으로 많은 하드웨어 비용을 요구한다[26].

3. MCDS의 다중-링 구성을 위한 프로토콜

볼츠만 기계[11,12]를 사용하여, 최적화 문제에 대해 전역적인 해를 구하는 많은 연구들이 있어 왔다[13-16]. 그런데, 애드혹 망을 구성하는 노드들은 처리 능력이 있어서, 볼츠만 기계의 뉴런처럼 동작하는데 아주 적합하다. 따라서, 우리는, 목적 함수를 잘 유도 한다면, 애드혹 망으로 병렬 볼츠만 기계를 구성할 수 있다.

3.1 공식화와 일반해

볼츠만 기계를 사용하여 전달망의 위상을 최적화하는 문제에 대한 전역적인 해를 얻기 위하여, 우리는 목적함수를 유도한다. 일반적으로, 볼츠만 기계는, 각 입력이 되는 신경 요소가 입력들의 중요도를 다르게 부여하고, 이들을 곱하여 합을 구한 값에 의존하여 출력하며, 임의성을 가져 확률적(Stochastically)으로 출력하는, 대칭적으로 회귀된 연결들을 가진 신경망이다[12]. 더 자세히 보아, n 개의 뉴런들로 구성된 신경망을 생각해 보자. $w_{ij} = w_{ji}$ 이고, 중요도 w_{ij} 와 w_{ji} 가 뉴런 i 와 뉴런 j 사이의 대칭적 연결들의 중요도들이라고 하자. 자신으로 회귀하는 w_{ii}는 0이라고 가정하자. 여기서, 각 뉴런은 2가지 값을 갖는다: 1 (excited) 그리고 0 (quiesent). 그러면 i 번째 뉴런의 퍼텐셜, u_i, 은 다음과 같이 정의된다[12].

$$u_i = \sum_j w_{ij} x_j \tag{1}$$

여기서 x_j 는 j 번째 뉴런의 상태이다.

볼츠만 기계의 뉴런을 사용하여, 이동 애드혹 망의 노드와 그에 연관된 연결들을 다음과 같이 표현할 수 있다. 위의 식 (1)에서 w_{ij} 를 1로 가정하고, 항 x_j 를 애드혹 망에서의 노드 i 와 노드 j 의 연결을 모형화하기 위해 사용하자. 그러면, 식 (1)에서 뉴런 i 의 퍼텐셜, u_i, 는 연결된 무선 연결들의 수를 의미한다.

각 뉴런은 비동기적으로 상태 u_i 를 변화시킨다[12]. 따라서, 뉴런들의 상태들로 구성되는 벡터 $X = \{x_1, ..., x_n\}$로 볼츠만 기계의 상태를 표현할 수 있다. 따라서, 상태 천이는 벡터 X의 2^n 상태들로 구성된 마코프 연결로서 수학적으로 기술된다. 모든 뉴런들이 연결되는 경우에, 이것은 하나의 안정적인 (얼고딕) 마코프 연결을 구성하는데, 이 마코프 연결은 독특한 안정적 분포

$p(X)$를 가진다. 이러한 안정적 분포는 일반적인 경우에 다음과 같이 주어진다[11,12].

$$p(X) = c \cdot e^{-E(X)} \tag{2}$$

여기서 c는 정규화 상수이다. 그리고

$$E(X) = \sum_i u_i$$

는 상태 X의 에너지라고 불리운다.

따라서, 볼츠만 기계의 상태가 무엇에서 시작하든지, 그 상태 X의 확률은 $p(X)$에 수렴한다. 다시 말해, 상태 X의 상대 빈도수는 오랜 경과 시간 후의 확률 $p(X)$로 표현될 수 있다[11,12]. 따라서, 이동 애드혹 망의 노드들로 구성되는 병렬 볼츠만 기계의 전체 에너지가 전역적인 최소로 수렴하기 위한 충분 조건은, 노드들의 에너지의 분포가 위의 식 (2)와 같은 볼츠만 분포인 것이다.

그러므로, 이러한 확률 $p(X)$이 볼츠만 분포를 가지며, $E(X)$가 최소로 되도록, 위상을 구성함으로써, 망 전체의 에너지의 량을 전역 최소에 수렴시킬 수 있다. 여기서, 에너지 $E(X)$를 최소화시키기 위해서는, 결국 연결들의 개수를 최소화 하여야 한다. 이것이, 볼츠만 기계에 근거하여, 가능한 최소 연결을 가진 위상을 구성하는 일반적인 해 이다. 다시 말해, 가능한 최소 연결을 가진 망을 구성하는 문제는 다음과 같이 정리할 수 있다.

다음을 최소화한다:

$$E(X) = \sum_i u_i \tag{3}$$

다음 조건을 전제로 한다:

$$p(X) = c \cdot e^{-E(X)}, \tag{4}$$

여기서 u_i는 다음과 같이 정의된다:

$$u_i = \sum_j w_{ij} x_j$$

3.2 다중-링 구성을 위한 볼츠만 기계

이제, 우리는 MCDS의 다중-링 위상을 가진 전송 망을 구성하기 위한 목적 함수를 유도한다. 이러한 목적에 부합하는 노드들의 집합을 정형적으로 정의하기 위해서, 퍼지 집합을 도입한다. 그리고 우리는 다음에서 노드들이 MCDS의 집합에 속하는 정도와 다중-링의 위상을 구성하는 노드들의 집합에 속하는 정도를 퍼지 소속 함수들(Membership functions)로 각각 정의한다. 우리는 최종 목적 함수가 해에 수렴하도록 하기 위해서, 소속 함수들을 볼츠만 인수의 형식으로 정의한다.

먼저, 다중-링 위상을 구성할 수 있는 노드들의 퍼지 집합을 연결 차수가 2에 가까운 노드들의 퍼지 집합으로 정의한다. 그리고, 다음과 같이, 그 소속 함수를 그 차수와 2의 차이에 관한 안정적인(stationary), 식 (2)와 같은, 볼츠만 요소 $p[u_i'=d]$로 정의하자.

$$p[u_i' = d] = c_0 \cdot e^{-d} \tag{5}$$

여기서 $u_i' = |u_i - 2|$이고, 이 u_i'는 노드 i의 차수 u_i와 2와의 차이이다. 그리고, c_0는 정규화 상수이고, 여기서 우리는 0.1을 사용한다.

이 인수는 각 노드들이 망을 구성할 수 있는 최소 연결 개수인 2에 가까운 연결차수를 가진 노드들로 망을 구성하기 위한 함수 이다. 이렇게 연결차수의 확률 분포를 식 (4)와 같은 볼츠만 인수로 만듦으로써, 식 (3)에 표현된 바와 같이, 전역적으로 가능한 최소로 연결 들로 위상을 구성할 수 있다. 결과적으로 무선 공유 매체를 통해 이웃 노드에 패킷을 보낼 때 발생하는 간섭을 줄일 수 있다. 일반적인 경우에, 인접하여 2개의 연결들이 연속적으로 배치된 노드들이 있는 단순한 경우에도, 숨은 단말기가 있으면, 최대 대역폭의 1/4 만이 각 노드들에 의해서 사용이 가능하다[2].

다음으로, 연결 지배 노드들의 집합에 속하는 정도가 높은 노드들을 클러스터헤드로 선출하기 위한 인수를 유도하기 위해, 우리는 연결 지배 노드들의 집합을 퍼지 집합으로 일반화한다. 다시 말해, 연결 지배 정도가 높은 노드들의 퍼지 집합을 한 노드가 깨어 있을 경우에 얼마나 많은 이웃 노드들을 연결할 수 있는지를 퍼지 소속 함수로 하는 퍼지 집합으로 정의한다. 그리고, 회원 인지 여부를 결정하는 회원함수를 노드의 연결에의 기여도에 대한 안정적인(Stationary) 볼츠만 요소 $p[u_j = r]$로 다음과 같이 정의한다. 이 함수는 연결 기여도가 최대가 되는 경우에 극대점을 갖는다.

$$p[u_j = r] = c_1 \cdot e^{-w \cdot r} \tag{6}$$

여기서

$$u_j = 1 - \frac{C_j}{\binom{E_j}{2}}$$

이고, E_j는 노드 j의 이웃들의 수이고, C_j는 노드 j가 추가됨으로써 생기는, 추가되는 이웃들의 쌍의 수이다. 따라서, u_j는 노드 j의 연결 기여도에 반비례 함수 이다. 그리고, w와 c_1는 정규화 상수들이고, 우리는 본 연구에서 w로서 값 10을, c_1로서 값 0.1을 사용한다. 식 (6)에 의해서 연결 기여도가 높은 노드들이 선출된다.

이 두개의 볼츠만 요소들을 선형으로 조합하여, 우리는 식 (5)과 (6)에 의해서 표현된 2개의 목표들을 결합시킨 목적 함수를 만들 수 있다. 결국, 우리는 다음과 같이 백-오프(Back-off) 지연 시간을 정의할 수 있다.

$$delay_0 = \frac{1}{p[u_i] + p[u_j]} \times RTT \tag{7}$$

여기서 RTT는 왕복 지연 시간(Round trip time)을 나타낸다.

3.3 절에 제안된 프로토콜에 따르면, 각 노드는 이러한 $p[u_i]$와 $p[u_j]$의 합에 반비례하는 볼츠만 요소를 가지는 백-오프 지연 시간을 기다린 후에, 클러스터헤드로써 자신을 제안한다. 결과적으로, 노드들은 $delay_0$으로 표현된 우선 순위에 따라서 그들의 클러스터헤드를 선출한다. 그리고, 이 볼츠만 기계의 상태가 무엇에서 시작하든지, 상태 $\tilde{X}$에 있을 확률은 $p(\tilde{X})$에 수렴하고, 결과적으로 전체 상태 X는 볼츠만 요소 $p[u_i]+p[u_j]$의 상대 빈도수로 나타난다. 따라서 이러한 볼츠만 인수에 의해 결정되는 위상은 안정적 이다. 그림 1은 연결 차수와 연결 기여도의 변화에 대한 지연시간 $delay_0$ 을 보여 준다.

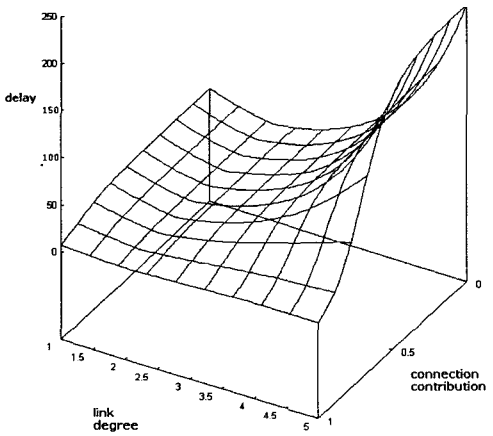

그림 1 연결 차수와 연결 기여도의 변화에 대한 지연시간 $delay_0$

그런데, 에너지 소비량은 패킷 전달을 포함한 통신을 위한 노드들 일로 인한 결과일 뿐이어서, 최적 위상을 찾기위한 인수로써 유용하지 못하다. 다시 말해, 이는 망의 현재 상태로부터 나오는 것이 아니라, 망의 과거 상태로부터 나오는 것이다. 그러므로, 이는 위상을 구성하는데 제약조건일 뿐이다. 따라서, 특정 문턱치를 넘는 경우만을 제외하고, 에너지소비량을 고려하지 않는 것이 패킷 손실율과 에너지 소비율을 줄이는 데에 유리하다. 그런데, 일반적인 전지는 용량의 약 80%를 다 써버릴 때까지 정상적인 전압을 공급한다[31]. 따라서, 문턱치를 표현하는 함수를 다음과 같이 만들 수 있다.

$$E = \frac{e^{(w\cdot(E_u-0.8))}}{1+e^{(w\cdot(E_u-0.8))}} \cdot MAX_{i,j}\left\{\frac{1}{p[u_i]+p[u_j]}\right\} \quad (8)$$

$$E_u = 1 - \frac{E_r}{E_m} \quad (9)$$

여기서 E_u는 초기 에너지 량에 대한 사용된 에너지의 량의 비율이다.

그리고, $MAX_{i,j}\left\{\frac{1}{p[u_i]+p[u_j]}\right\}$는 하나의 최대치 222,000이고, w는 에너지의 소비가 0.8인 점의 곡선의 변화율을 나타내는 상수이다. 실험에서 사용된 이 상수의 값은 1,000이다.

이제 지연 시간 $delay_0$을 구하는 식에 이 항을 추가하여, 소비된 에너지의 양을 고려한, 지연시간 $delay_1$을 다음과 같이 만들 수 있다.

$$delay_1 = \left(\frac{1}{p[u_i]+p[u_j]} + E\right) \times RTT \quad (10)$$

그런데, 많은 노드들이, 이 지연 시간 $delay_1$ 후에, 자신들을 후보들로 공지하는 경우에, 매체상의 간섭으로 인해서, 모든 노드들이 동시에 클러스터헤드의 부재를 발견하고, 그들은 클러스터헤드로 봉사하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, SPAN의 프로토콜에서는, 임의의 수를 사용하고 있다. 그런데, 이러한 임의성은 성능이 좋은 위상으로의 수렴을 방해한다. 그렇지만, 이러한 임의성은 지역적 최적 조건들보다는 오히려 전역적 최적 조건들로 볼츠만 기계를 수렴시키는 것을 돕기 때문에 유용하다[13]. 우리는, 가중치를 곱해서 작게 만든 에너지 소모 비율을 SPAN 에서의 임의의 수처럼 사용하여, 같은 지연 시간 $delay_1$를 지니는 노드들 중에서 에너지 소모가 가장 적은 노드가 클러스터헤드로 선정되도록 하며, 동시에 임의성도 부여한다.

각 노드의 에너지 잔여량 E_u는 서로 다르고, 각각 다른 비율로 줄어들기 때문에, 같은 지연시간 $delay_0$을 가지는 후보들 중 에너지 잔여량이 많은 노드를 우선 선출하며, 선출에 임의성을 주기 위하여, 우리는 다음과 같이 지연 시간을 수정한다.

$$delay_2 = \left(\frac{1}{p[u_i]+p[u_j]} + E + W\cdot E_u\right) \times RTT \quad (11)$$

여기서 W 정규화 상수이며, 값은 0.01로서, 지연 시간 $delay_1$로 주어진 우선순위를 변화시키지 않는 범위 내에서, 그 우선순위를 조정하기 위해, 우리는 이 값을 사용한다.

3.3 프로토콜

다음 절차에 따라, 각 노드는 클러스터헤드로서 스스로를 추천한다. 각 노드는, 앞 절의 식 (11)에 따라, 백-오프 지연 시간을 계산하고, 이 지연 시간 후에 클러스터헤드로써 자신을 공지하는 HELLO 메세지를 발송한다. 다른 노드들로부터, 만약 지연 시간의 끝까지, HELLO 메세지를 받지 못하면, 그 노드는 HELLO 메

세지를 보낸다. HELLO 메시지를 보낸 노드들은 패킷을 전달한다.

HELLO 메세지는 노드 자신의 클러스터헤드 그리고 노드의 이웃들에 관한 정보를 담고 있다. 그 HELLO 메세지들, 그리고 결과적으로 제안된 규약으로 유지되는 상태들은 이전에 만들어진 애드혹 망의 경로설정 규약들(즉, 지리적인 라우팅[28], DSDV[32] 혹은 SPAN [17])의 그것에 거의 유사하다. 그림 2에 보여진 바와 같이, 이 분산된 알고리즘은 매우 단순하다: (1) 각 노드는 방정식을 이용하여 지연시간을 계산한다, (2) 노드는 지연 시간후에 메시지를 보낸다. 그리고, (3) 지연 시간동안에 HELLO 메시지를 받았으면 스스로 일정시간 동안 전원을 끄고, 그렇지 않으면, 노드는 HELLO 메시지를 보낸 후에 클러스터헤드가 된다. 그러므로 우리들은 이 알고리즘의 시간 복잡성이 $O(1)$임을 간단히 알 수 있다. 이렇게 클러스터헤드를 선정하는 방법은 IGMP와 같은 멀티캐스팅 프로토콜에서 상실된 패킷들의 중복되는 재전송을 피하기위해서 사용된 나누어뿌리기(slotting-and-damping) 방법을 원용하였다.

SPAN[17]의 경우도 제시된 방법과 거의 비슷한 나누어뿌리기 방법을 사용하였다. SPAN의 경우에는 노드가 깨어있을 경우에 얼마나 많은 이웃 노드들을 연결할 수 있는지를 선형 함수로 정량화하고 에너지 잔여도를 선형 함수로 정량화해서, 두 인자들의 선형 조합한 방정식에 근거하여 백-오프 지연 시간을 계산한다. 결과적으로, SPAN은, 경험적 지식을 사용하여, 망을 구성하는 노드들의 수를 줄여 망을 구성하는 연결들의 수를 줄이려고 국부적으로 시도하지, 제안한 프로토콜처럼 직접적으로 물리적 연결수를 전역적으로 줄이려는 시도는 하지 않는다.

클러스터헤드를 발견할 수 없었던 모든 노드들은 그림 2에 보여진 단계 5에 따라 클러스터헤드로서 자신들을 선언한다. 따라서, 제안된 프로토콜의 단계 5는 최악의 경우의 연결성을 보장한다. 그리고, 공지 메세지 사이에 전송 망의 연결성이 잠시 손실되는 것을 방지하기 위하여, 노드는 사임후의 짧은 시간 동안에 계속해서 클러스터헤드로 봉사한다. 우리는 그림 3에서 제안된 프로토콜을 사용하여 구성된 망의 예를 보여 준다.

4. 성능 평가

제안된 프로토콜을 평가하기 위해서, 우리는 몇몇의 정적 및 동적 위상에 대해, 그 프로토콜을 모의실험한다.

4.1 모의 실험 환경

우리는 NS-2를 사용하여 만들어진 SPAN의 모의 실험기를 수정해서 모의 실험기를 만들었다. 본 절에서, 우리는 제안된 방법의 성능과 에너지 소모를 SPAN, 802.11 MAC PSM 과 PSM이 없는 802.11 MAC의 그것들과 비교한다. 편의를 위해, 우리는 그들을 MORCDS, SPAN, 802.11 PSM, 그리고 802.11로 생략하여 언급한다.

For each node:

1. The node awakes up periodically, and it turns on its radio and listens. (This waking is supported by 802.11 power-save mode.)
2. For every HELLO messages from other nodes, it stores the identity of the node itself, identities of its neighbors and its clusterheads, and whether it is clusterhead or not.
3. By comparing the identity lists of neighbors with those of node itself, each node gets the connection contribution factor C_j of Equation (6). From the number of the HELLO messages, it gets the link degree of node itself.
4. By using Equation (5), (6), and (11), it calculates the back-off delay time.
5. If a node does not receive the HELLO message from the other nodes until the end of the delay time, the node sends out the HELLO message that informs itself to be the clusterhead, and forwards the packets as a clusterhead.
6. If a node receives the HELLO message, the node will be a host, and it gets sleep.

(After sleeping, it wakes up in accordance with 802.11 power-save mode as described in 1st step.)

그림 2 제안한 위상 제어 프로토콜

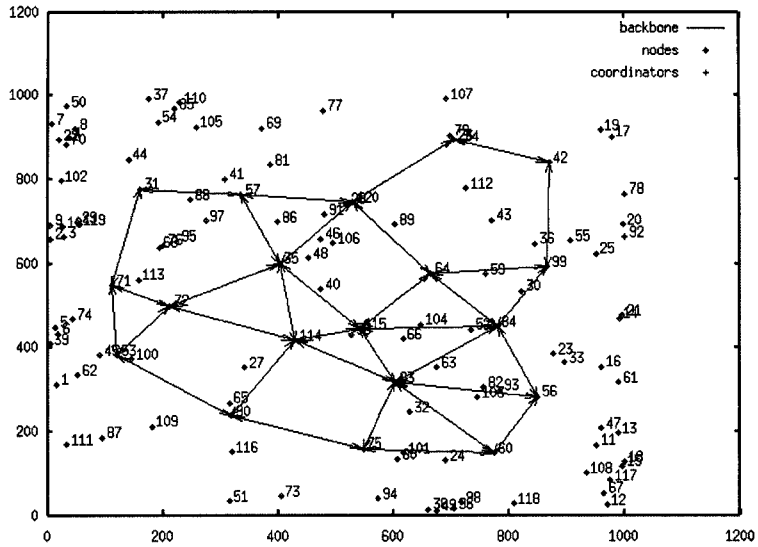

그림 3 100개의 노드들이 1000 m × 1000 m 의 영역에 임의로 분포된 경우, 제안한 방법으로 선발된 19개의 클러스터헤드들로 구성된 이동 애드혹 망의 위상

우리는 정량적인 비교를 위해, 다음과 같이, 실험 모형을 SPAN의 그것과 거의 동일하게 만들었다. 노드들의 다양한 밀도에 대해서 제안된 방법을 평가하기 위해, 우리는 다양한 크기들의 정방형 영역에 120 개의 노드들이 임의로 설치된 무선 망들에 대해서 모의실험을 수행한다. 이 실험에서, 노드의 대역폭은 2Mbps 이고, 노드의 무선 영역은 250 미터 반경 이다. 전체 노드들 중 20개의 노드들이 패킷들을 보내고 받는다. 이들의 각각은 다른 노드들에게 고정 비트 비율의 트래픽을 보내고, 각 CBR 흐름은 128 바이트 패킷들로 구성된다.

각 패킷들이 목적지 노드에 여러 홉들을 거쳐서 도달하게 만들기 위해, 10 개의 원천지와 10 개의 목적지 노드들이, 모의 실험되는 영역의 왼쪽과 오른쪽에 위치한, 2개의 50 미터 넓이의 전체 높이의 한변을 가진 직사각형의 영역들 각각에 임의로 균일하게 위치한다. 그리고, 원천지의 노드들은 반드시 다른 영역의 목적지 노드들로 패킷들을 보낸다. 나머지 100개의 노드들의 초기 위치들은 모의실험 영역 안에서 임의로 균일하게 분포된다. 그러므로, 모의 실험 영역의 면적의 제곱근과 각 패킷에 의해서 요구되는 홉들의 수는 근사적으로 비례한다.

원천지와 목적지 노드들은 움직이지 않는다. 이동성에 대한 실험들을 위해서, 그 100 개의 노드들은 임의 경유지 모형[30]에 따라 움직인다. 즉 모의 실험 영역에서 각 노드는 그것의 목적지를 임의로 균일하게 선택한다. 그리고, 각 노드는 0 meters/sec에서 20 meters/sec 사이에서 균일하게 선택된 속도로 목적지를 향해 각각 이동한다. 이동 노드는 동일한 과정을 반복하기 전에 일정 기간의 시간 동안 멈춘다. 그래서, 우리는 이 정지 시간의 길이로 노드들의 이동성의 정도를 모형화 한다. 우리는 각 모의 실험을 위해 900 초의 모의 실험 시간을 사용한다.

4.2 패킷 손실 모형

802.11 에너지 절약형 방식은, 주기적인 비컨들을 사용하므로써, 노드들을 망에 동기화 한다. 각 비컨 주기는 애드혹 트래픽 표시 메시지 윈도우(ATIM 윈도우)로 시작된다. 전송을 기다리고 있는 트래픽들은 ATIM 윈도우에 광고된다. 만약 한 노드가 자신을 향한 트레픽의 광고를 받고, 응답을 한다면, 그 노드는 비컨 주기의 남은 시간 동안 깨어 있어야 한다. 다른 노드들은 ATIM 윈도우의 끝에서 다음 비컨 주기의 시작까지 그것들의 전원을 끌 수 있다. ATIM 윈도우가 지나간 후에, 광고된 패킷은 전송된다.

만약 ATIM 윈도우 동안에 패킷이 MAC에 도착하거나, 혹은 패킷에 대한 광고가 응답되지 않았다면, 그것은 완충 저장장치에 의해서 처리된다. 따라서, 패킷은 전달되며, 각 홉에서 비컨 주기의 반에 해당하는 시간 동안 지연될 수 있다. 최악의 경우에, 패킷은 두 비컨 주기 동안에 버퍼로 저장된다. 두 비컨 주기후에 전송되지 못한 패킷은 폐기된다. 그러므로, 802.11 에너지 절약형 방식은 패킷 배달을 위해 오랜 지연시간을 가지게 된다. 비컨 주기의 크기와 ATIM 윈도우의 크기는 전송

의 성능에 많은 영향을 미친다[20]. 우리들은, SPAN과 동일하게, 200밀리 초의 비컨 주기와 40밀리 초의 ATIM 윈도우 사이즈를 사용한다.

4.3 패킷 손실율 및 에너지 소비율의 비교 분석

본 절에서 우리는 일반적인 802.11 망을 구성할 경우의 패킷 손실율 및 에너지 소비율과 802.11 PSM의 그것들, SPAN의 그것들과 제안된 방법의 그것들을 비교한다. 임의로 선택된 서로 다른 10개의 시나리오들을 사용하여 얻은, 총 10번의 모의 실험들의 결과들을 평균하여, 우리는 본 절에서 제시된 모든 결과들을 얻었다. 우리는 하나의 무선 영역, 즉 $250^2 \times \pi$ 정방 미터 영역에, 존재하는 원천지와 목적지가 아닌 노드들의 수로 노드의 밀도를 정의 한다.

4.3.1 이동이 없는 노드들에 관한 분석

먼저 제안된 방법, SPAN, 802.11 PSM, 802.11의 정량적인 비교를 위해서, 우리는 각 노드가 일정한 비트율 흐름인 3 Kbps인 부하를 발생시킬 경우, 패킷 손실율과 에너지 소모율을 제시한다. 노드의 밀도를 변화시키기 위해, 우리는 모의 실험 영역의 면적을 변화시켜가며 실험한다.

표 1에 보인 바와 같이, 각 원천지 노드들이 3Kbps의 패킷들을 생성할 경우, 제안된 방법에 의해서 구성된 위상은, 전송 지연을 802.11 PSM의 지연에 비해 최대 96.4%를 줄이며, 최소 95.0%를 줄인다. 802.11 PSM의 ATIM 윈도우 동안에 패킷이 MAC에 도착하거나, 혹은 패킷에 대한 광고가 응답되지 않았다면, 그것은 버퍼에 저장된다. 따라서, 패킷은 전달되면서 각 홉에서 평균적으로 비컨 주기에 해당하는 200밀리 초 동안 지연될 수 있다[20]. 실험 결과, 802.11 PSM은 패킷 배달을 위해 홉당 대략 200 밀리초의 지연시간을 가지게 된다.

SPAN과 비교하여, 우리들은 0.5%만큼 그리고 최대 3.1%만큼 홉의 수를 줄일 수 있다. 그리고 우리들은 또한 적어도 3.5%만큼 그리고 최대 8.0%만큼 에너지 소비를 줄인다. 802.11 PSM과 비교해서, 에너지 소비의 최대 63.3%를 줄였고, 적어도 39.9%를 줄인다.

그림 4에서, 우리는 노드들의 밀도가 높을수록 MORCDS로 구성된 망의 패킷 손실율이 더욱 낮아진다는 사실을 알 수 있다. 노드들의 밀도가 12.6인 경우에, MORCDS로 구성된 망의 패킷 손실율은 802.11의 그것의 29.2%에 불과하고, 802.11 PSM의 그것의 28.9%에 불과하고, SPAN의 74.5%에 불과하다. 더군다나, 나머지의 밀도들의 경우에, 제안된 프로토콜에 의해 구성된 망은 패킷 손실이 없다.

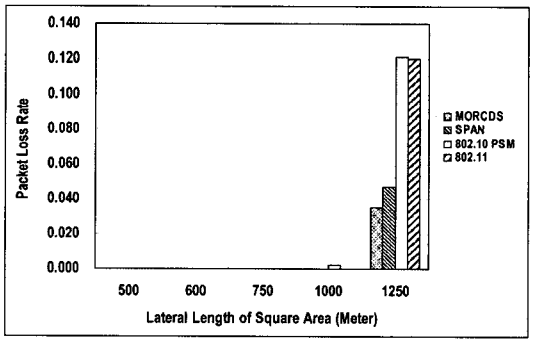

그림 4 CBR 흐름 당 3Kbps 부하에서 노드들의 다양한 밀도들에 대한 패킷 손실율들

표 1 CBR 흐름 당 3Kbps 부하에서 MORCDS, SPAN, 802.11 PSM, 802.11 의 성능 비교

		Lateral Length of Square Area (meters)					Pause Time (seconds)			
		500	600	750	1000	1250	15	30	60	90
loss	MORCDS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.009	0.009	0.007	0.005
	SPAN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047	0.011	0.010	0.008	0.007
	802.10 PSM	0.000	0.000	0.000	0.002	0.121	0.030	0.026	0.021	0.018
	802.11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.120	0.030	0.026	0.021	0.017
latency	MORCDS	20.349	24.827	30.146	38.305	49.349	123.978	120.757	107.122	102.604
	SPAN	15.944	21.354	25.859	34.667	53.021	155.321	134.782	116.958	114.905
	802.11 PSM	410.704	538.326	714.220	1007.457	1383.866	1056.174	1032.062	1053.300	1046.563
	802.11	4.905	6.911	8.959	12.725	16.758	28.511	25.413	23.578	22.358
hops	MORCDS	2.886	3.502	4.511	6.135	7.925	6.424	6.347	6.519	6.421
	SPAN	2.938	3.613	4.559	6.165	7.996	6.420	6.373	6.456	6.438
	802.11 PSM	2.539	3.133	4.019	5.462	7.364	5.483	5.419	5.550	5.522
	802.11	2.535	3.125	4.007	5.425	7.288	5.390	5.333	5.463	5.447
consumption	MORCDS	0.306	0.314	0.324	0.367	0.412	0.386	0.383	0.383	0.375
	SPAN	0.317	0.333	0.347	0.398	0.448	0.398	0.396	0.396	0.395
	802.11 PSM	0.834	0.812	0.759	0.721	0.686	0.757	0.749	0.744	0.740
	802.11	0.878	0.882	0.882	0.880	0.875	0.888	0.887	0.887	0.886

표 2와 그림 5에서 보인 바와 같이, 각 노드가 일정한 비트율 흐름인 6 Kbps인 부하를 발생시킬 경우에, 노드들의 밀도가 12.6이면, MORCDS로 구성된 망의 패킷 손실율은 802.11 PSM의 패킷 손실율의 58.9%에 불과하다. 그리고, 노드들의 밀도가 19.6인 경우에는, 802.11 PSM의 그것의 37.5%에 불과하다. 또한, 노드들의 밀도가 34.9인 경우에, 802.11 PSM의 패킷 그것의 16.3%에 불과하고, SPAN의 패킷 손실율의 51.2%에 불과하다. 그리고, MORCDS의 패킷 손실율이 성능면에서 최적인 802.11의 손실율에 근접하고 있는 사실은 주목할 만하다.

한편, 그림 6에서 보인 바와 같이, 노드들의 밀도가 높을 수록, MORCDS를 사용하여 구성한 망의 에너지 소비는 줄어든다. 망이 이동이 없는 노드들로 구성되고, 각 노드가 일정한 비트율 흐름인 6 Kbps인 부하를 생성하는 경우에, 망의 밀도가 54.5 인 경우는, 802.11의

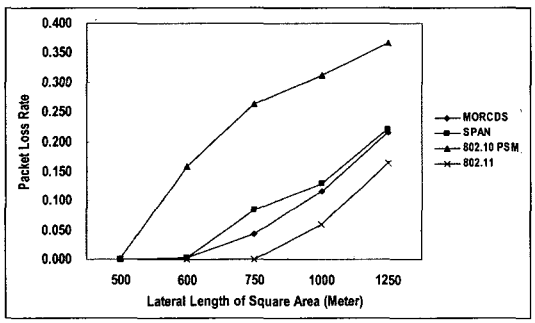

그림 5 CBR 흐름 당 6 Kbps 부하에서 노드들의 다양한 밀도들에 대한 패킷 손실율

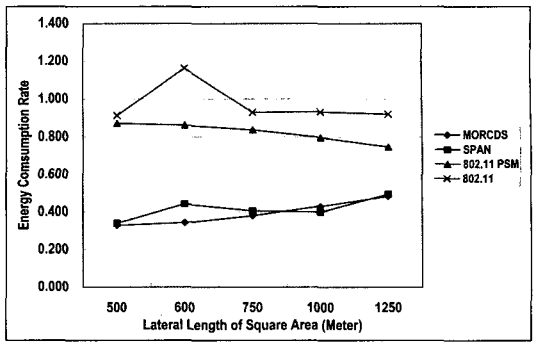

그림 6 CBR 흐름 당 6 Kbps 부하에서 노드들의 다양한 밀도들에 대한 에너지 소비율

에너지 소비에 비해 70.5% 절약하고, 802.11 PSM의 에너지 소비보다 60.2% 절약하고, SPAN의 에너지 소비보다 22.2% 절약한다. 그리고, 망의 밀도가 78.5인 경우에는, 802.11의 에너지 소비보다 64.1% 절약하고, 802.11 PSM의 에너지 소비보다 62.3% 절약하고, SPAN의 에너지 소비보다 3.5% 절약한다. 망의 밀도가 12.6인 경우에, 802.11의 에너지 소비의 47.5% 절약하고, 802.11 PSM의 에너지 소비의 35.3% 절약하고, SPAN의 에너지 소비의 2.2% 절약한다. 따라서 제안된 방법이 SPAN이나 기타 방법들에 비해서, 노드들의 밀도가 높은 경우에, 낮은 패킷 손실율을 보인다. 그리고 이 경우에, 상대적으로 적은 에너지로 망을 구동할 수 있는 사실로부터 다른 기존의 방법들에 비해 적은 노드들과 물리적인 연결들로 망을 구성함을 알 수 있다.

4.3.2 이동을 하는 노드들에 관한 분석

표 2 CBR 흐름 당 6 Kbps 부하에서 MORCDS, SPAN, 802.11 PSM, 802.11 의 성능 비교

		Lateral Length of Square Area (meters)					Pause Time (seconds)			
		500	600	750	1000	1250	15	30	60	90
loss	MORCDS	0.000	0.003	0.043	0.117	0.216	0.261	0.257	0.234	0.252
	SPAN	0.000	0.003	0.084	0.130	0.221	0.292	0.270	0.286	0.267
	802.10 PSM	0.001	0.159	0.263	0.312	0.367	0.388	0.401	0.377	0.383
	802.11	0.000	0.000	0.000	0.060	0.165	0.227	0.217	0.178	0.173
latency	MORCDS	19.653	104.724	1107.383	2377.038	2864.742	4063.962	3953.577	3912.947	4220.782
	SPAN	19.504	72.778	1972.487	2587.267	2529.697	4283.199	4037.804	3982.991	3603.405
	802.11 PSM	438.135	1476.349	2114.116	2778.780	3832.457	2961.408	3077.756	2934.367	3041.388
	802.11	7.191	16.596	21.270	1518.010	527.057	6147.440	5720.715	4876.779	4477.818
hops	MORCDS	2.925	3.561	4.618	6.396	8.247	6.865	6.794	6.902	6.913
	SPAN	2.937	3.576	4.739	6.437	8.274	6.904	6.739	6.918	6.961
	802.11 PSM	2.540	3.191	4.181	5.725	7.691	5.769	5.729	5.832	5.831
	802.11	2.533	3.123	4.012	5.570	7.437	5.819	5.752	5.821	5.801
consumption	MORCDS	0.328	0.343	0.380	0.429	0.483	0.497	0.494	0.493	0.488
	SPAN	0.340	0.441	0.406	0.399	0.494	0.496	0.618	0.557	0.489
	802.11 PSM	0.871	0.861	0.836	0.796	0.747	0.832	0.828	0.823	0.820
	802.11	0.913	1.161	0.930	0.932	0.920	0.943	1.178	1.176	1.044

표 1의 우측 편에서, 이동성이 패킷 손실율과 에너지 소비율에 미치는 영향을 각각 보여주고 있다. 각 노드가 일정한 비트율 흐름인 3 Kbps인 부하를 생성하는 경우에, 각 움직이는 노드들이 이동 중에 90초의 정지 시간을 가지면, MORCDS로 구성된 망의 패킷 손실율은 802.11의 패킷 손실율의 29.4%에 불과하고, 802.11 PSM의 패킷 손실율의 27.8%에 불과하고, SPAN의 패킷 손실율의 71.4%에 불과하다. 반면에 전달 지연은 802.11 PSM의 지연에 비해 90.2% 적고, 그리고, SPAN의 지연보다 10.7% 적다. 이동 노드의 정지시간이 15초인 경우, MORCDS에 의해서 구성된 망의 패킷 손실율은, 802.11의 패킷 손실율의 30.0%에 불과하고, 802.11 PSM의 패킷 손실율의 30.0%에 불과하고, SPAN의 패킷 손실율의 81.8%에 불과하다. 이 경우 전달 지연은 802.11 PSM의 지연 대비 88.3% 적고, SPAN의 지연에 비해 20.2% 적다.

그림 7에서 보인 바와 같이, 각 노드가 일정한 비트율 흐름인 6 Kbps인 부하를 생성하는 경우, 제안된 방법으로 구성된 망의 패킷 손실율은, 노드의 이동 중에 가지는 정지 시간이 90 초인 경우에, 802.11 PSM의 패킷 손실율보다 34.2% 적고, SPAN의 그것보다 5.6% 적다. 정지 시간이 60 초인 경우의 802.11 PSM의 패킷 손실율에 비해 37.9% 적고, SPAN의 그것보다 18.2% 적다. 정지 시간이 15 초인 경우의 802.11 PSM의 패킷 손실율보다 32.7% 적고, SPAN의 그것보다 10.6% 적다.

그림 8에서 보인 바와 같이, 노드의 이동 정도에 대해, 다음과 같이 각각 에너지 소비가 절약된다. 정지 시간이 60초인 경우에, 802.11의 에너지 소비에 비해 58.1%가 절약되고, 802.11 PSM의 에너지 소비에 비해 40.1%가 절약되고, SPAN의 에너지 소비보다 11.5%가 절약된다. 그리고, 정지 시간이 30초인 경우에는, 802.11의 에너지 소비 대비 58.1%가 절약되고, 802.11 PSM의 에너지 소비보다 40.3%가 절약되고, SPAN의 에너지 소비보다 20.1%가 절약된다.

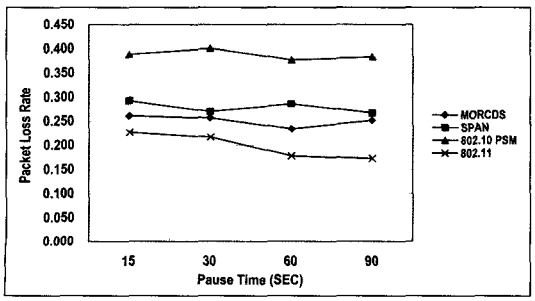

그림 7 CBR 흐름 당 6 Kbps 부하에서 노드들의 다양한 이동들에 대한 패킷 손실율들

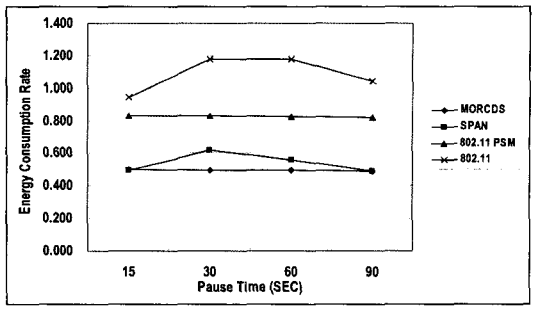

그림 8 CBR 흐름 당 6 Kbps 부하에서 노드들의 다양한 이동들에 대한 에너지 소비율

5. 결 론

본 논문에서, 우리는 전체 노드들 중 연결된 지배 노드들의 집합에 속하는 가능한 최소의 노드들로 다중-링 위상의 망을 구성하는 분산된 위상 제어 프로토콜을 제시 하였다. 제시된 프로토콜은 연결성을 유지하며 모든 노드들로부터 선출된, 그리고 가능하면 최소 물리적인 노드 차수를 가지고 있는, 최소 노드들로부터 위상을 만든다. 결과적으로 구성된 위상은 가능한 최소 수의 물리적 연결들을 가지고 있어, 무선 연결의 매체의 간섭을 줄이고, 패킷의 손실을 감소시키며, 동시에 연결성을 보존한다. 최악의 경우에도 연결성은 프로토콜에 의해 보장된다. 또한 전력을 소비하는 노드들과 연결들의 수를 줄임으로써, 망 전체를 구동시키는데 사용되는 에너지의 소비를 감소시킨다.

우리는 무선 애드혹 망에 병렬 볼츠만 기계를 직접 사상한다. 제안된 프로토콜은 매우 단순하여, 그 시간 복잡성은 $O(1)$이다. 그리고, 볼츠만 기계에 근거하였기 때문에, 구성되는 위상은 전역적인 최적에 수렴한다. 애드혹 망을 구성하는 노드들은 처리하는 능력이 있고, 이웃 노드들로의 방송을 사용하여, 이웃 노드들과 통신하는 능력을 가지고 있다. 따라서, 각 노드는 볼츠만 기계의 노드로써 동작하는데 아주 적합하다. 우리는 연결들의 차수와 연결 공헌도를 표현하는 볼츠만 인수들의 합산으로서 목적 함수를 유도한다. 두 개의 목표들을 가지고 있는 그러한 목적 함수로 계산된 우선 순위에 따라서, 각 노드는 애드혹 전송망의 구성에 참여하는 클러스터헤드로서 자신을 선출한다. 그러므로, 구성된 위상은 물리적인 연결들의 수를 가능한 최소로 줄이며, 동시에 연결성을 유지한다. 최악의 경우 연결성은 프로토콜에 의해서 보장된다.

이러한 볼츠만 인수들을 유도하기 위하여, 우리는 다중-링을 구성할 수 있는 노드들의 퍼지 집합과 볼츠만 인수인 퍼지 소속 함수를 정의하였다. 그리고 연결된 지배 노드들의 집합을 일반화 하여 연결된 지배노드의 퍼

지 집합을 정의하고, 또한 볼츠만 인수인 퍼지 소속 함수를 정의하였다.

제안한 방법으로 구성된 망의 성능과 에너지 효율을 기존의 다른 방법들로 구성된 망의 위상들의 그것들과 정량적으로 비교하기 위해, 우리는 수정된 NS-2 망 모의 실험기를 사용하여, 다양한 부하들 아래에서, 망을 구성하는 노드들의 밀도를 변화시켜가며, 이동하지 않는 노드들로 구성된 망의 경우와 이동하는 노드들로 구성된 망의 경우로 나누어, 위상들을 구성하는 모의 실험을 행하였다. 노드들이 움직이지 않고, 각 원천지 노드들이 3Kbps의 패킷들을 생성할 경우, 노드들의 밀도가 12.6인 경우에, 제안된 프로토콜로 구성된 망의 패킷 손실율은 802.11의 29.2%에 불과하고, 802.11 PSM의 28.9%에 불과하고, SPAN의 74.5%에 불과하다.

각 노드가 일정한 비트율 흐름인 3 Kbps인 부하를 발생시키는 경우에, 각 움직이는 노드들이 이동 중에 90초의 정지 시간을 가지면, MORCDS로 구성된 망의 패킷 손실율은 802.11의 패킷 손실율의 29.4%에 불과하고, 802.11 PSM의 패킷 손실율의 27.8%에 불과하고, SPAN의 패킷 손실율의 71.4%에 불과하다. 전달 지연은 802.11 PSM의 지연의 90.2%를 줄이며, 그리고, SPAN의 지연의 10.7%를 줄인다. 이동 노드의 정지시간이 15초인 경우, MORCDS에 의해서 구성된 망의 패킷 손실율은, 802.11의 패킷 손실율의 30.0%에 불과하고, 802.11 PSM의 패킷 손실율의 30.0%에 불과하고, SPAN의 패킷 손실율의 81.8%에 불과하다. 이 경우 전달 지연은 802.11 PSM의 지연보다 88.3% 적고, 그리고, SPAN의 지연보다 20.2% 적다.

각 노드가 일정한 비트율 흐름인 6 Kbps인 부하를 발생시키는 경우, 제안된 방법으로 구성된 망의 패킷 손실율은, 노드의 이동 중에 가지는 정지 시간이 60 초인 경우에, 802.11 PSM의 패킷 손실율보다 37.9% 적고, SPAN의 그것보다 18.2% 적다. 정지 시간이 60초인 경우에, 802.11의 에너지 소비보다 58.1%가 절약되고, 802.11 PSM의 에너지 소비보다 40.1%가 절약되고, SPAN의 에너지 소비보다 11.5%가 절약된다. 그리고, 정지 시간이 30초인 경우에는, 802.11의 에너지 소비보다 58.1%가 절약되고, 802.11 PSM의 에너지 소비보다 40.3%가 절약되고, SPAN의 에너지 소비보다 20.1%가 절약된다.

노드들의 이동이 없고, 각 원천지 노드들이 3Kbps의 패킷들을 생성하는 경우에, 제안된 방법에 의해서 구성된 위상은, 전송 지연이 802.11 PSM의 지연에 비해 최대 96.4% 적으며, 그리고, 최소 95.0%가 적다. SPAN과 비교하여 적어도 3.5%만큼 그리고 최대 8.0%만큼 에너지 소비가 적다. 802.11 PSM과 비교해서, 에너지 소비가 최대 63.3% 적고, 최소한 39.9% 적다. 제시된 방법이 전송 파워를 조절하지도 않고, 연결성을 유지하기 위하여 방향성 정보나 지리 정보를 사용하지 않아서 적은 하드웨어의 비용으로 적용이 가능하여 실용적이다.

다중-링 망은 고유한 신뢰성과 단일 결함 감내의 성질 때문에 통신 망을 구성하는 우수한 대안으로 생각되어져 왔다. 또한, 이러한 링 망은 다중 전송과 방송에 효율적이다. 추후 연구들로는 구성된 위상의 신뢰성 분석과 다중 전송과 방송에 관한 연구를 진행하고 있다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Blough, M. Leoncini, G. Resta, and P. Santi, "The k-Neighbors approach to interference bounded and symmetric topology control in ad hoc network," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 9, pp. 1267-1282, 2006.

[2] Rajmohan Rajaraman, "Topology control and routing in ad hoc networks: a survey," *ACM SIGACT News*, Vol. 33, No. 2, pp. 60-73, 2002.

[3] G. Toussaint, "The relative neighborhood graph of a finite planar set," *Pattern Recognition*, Vol. 12, pp. 261-268, 1980.

[4] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y.-M. Wang, "Distributed topology control for wireless multihop ad-hoc networks," *INFOCOM 2001, Proceedings of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, IEEE, Vol. 3, pp. 1388-1397, April 2001.

[5] Yu Wang and Xiang-Yang Li, "Localized construction of bounded degree and planar spanner for wireless ad hoc networks," *Proceedings of the 2003 joint workshop on Foundations of mobile computing*, pp. 59-68, San Diego, CA, USA, September 19, 2003.

[6] Lichun Bao and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Topology management in ad hoc networks," *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 129-140, Annapolis, Maryland, USA, June 01-03, 2003.

[7] Yuanzhu Peter Chen and Arthur L. Liestman, "Approximating minimum size weakly-connected dominating sets for clustering mobile ad hoc networks," *Proceedings of the third ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, Lausanne, Switzerland, June 09-11, 2002.

[8] Jun Wang and William Yurcik, "A Survey and comparison of multi-ring techniques for scalable battlespace group communications," *SPIE Security and Defense Conference/Progam on Communications and Networking Technologies and Systems*, Orlando FL USA, Tuesday March 29th 2005.

[9] Andrea Fumagalli, Isabella Cerutti, and Marco Tacca, "Optimal design of survivable mesh networks based on line switched WDM self-healing rings," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, Vol. 11, No. 3, pp. 501-512, 2003.

[10] V.C. Hamacher and Hong Jiang, "Hierarchical ring network configuration and performance modeling," *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-12, 2001.

[11] C. Kittel and H. Kroemer, *Thermal Physics*, 2nd ed., Reading Mass, W. H. Freeman, New York, NY, 1980.

[12] S. Amari, K. Kurata, and H. Nagaoka, "Information geometry of Boltzmann machines," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 3, No. 2, pp. 260-271, 1992.

[13] Emile Aarts and Jan Korst, *Simulated annealing and Boltzmann machines: a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1989.

[14] M. Fleischer, "Simulated annealing: past, present, and future," *1995 Winter Simulation Conference Proceedings*, pp. 155-161, 3-6 Dec. 1995.

[15] Christian Blum and Andrea Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison," *ACM Comput. Surv.*, Vol. 35, No. 3, pp. 268-308, 2003.

[16] Juan D Vicente, Juan Lanchares, and Roman Hermida, "Annealing placement by thermodynamic combinatorial optimization," *ACM Trans. Des. Autom. Electron. Syst.*, Vol. 9, No. 3, pp. 310-332, 2004.

[17] Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Robert Morris, "Span: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks," *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 5, pp. 481-494, 2002.

[18] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin, "Geography-informed energy conservation for Ad Hoc routing," *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 70-84, Rome, Italy, July 2001.

[19] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Adaptive energy-conserving routing for multihop ad hoc networks," *Technical Report 527*, USC/ISI, October 2000.

[20] Suresh Singh and C. S. Raghavendra, "PAMAS: power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 28, No. 3, pp. 5-26, July 1998.

[21] Robin Kravets and P. Krishnan, "Power management techniques for mobile communication," *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 157-168, Dallas, Texas, USA, October 25-30, 1998.

[22] M. Stemm and R. Katz, "Reducing power consumption of network interfaces in hand-held devices," *Proceedings of the Third Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC-3)*, Princeton, NJ, 1996.

[23] W. Mangione-Smith, P. Ghang, S. Nazareth, P. Lettieri, W. Boring, and R. Jain, "A low power architecture for wireless multimedia systems: lessons learned from building a power hog," *Proceedings of the 1996 international symposium on Low power electronics and design*, pp. 23-28, Monterey, California, USA, August 12-14, 1996.

[24] Yu Wang and Xiang-Yang Li, "Localized construction of bounded degree and planar spanner for wireless ad hoc networks," *Proceedings of the 2003 joint workshop on Foundations of mobile computing*, pp. 59-68, San Diego, CA, USA, September 19, 2003.

[25] Martin Burkhart, Pascal von Rickenbach, Roger Wattenhofer, and Aaron Zollinger, "Does topology control reduce interference?," *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 9-19, Roppongi Hills, Tokyo, Japan, May 24-26, 2004.

[26] L. Hu, "Topology Control for Multihop Packet Radio Networks," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 41, No. 10, pp. 1474-1481, 1993.

[27] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment," *Proc. of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp. 404-413, 2000.

[28] Brad Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 243-254, Boston, Massachusetts, USA, August 06-11, 2000.

[29] V. Rodoplu and T. H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks," *IEEE J. Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 8, pp. 1333-1344, 1999.

[30] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih-Chun Hu, and Jorjeta Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 85-97, Dallas, Texas, USA, October 25-30, 1998.

[31] Duracell, (1998), "Performance characteristics," [On-Line]. Available: http://www.duracell.com/oem/ primary/lithium/performance.asp.

[32] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat, "Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers," *Procee-*

dings of the conference on Communications architectures, protocols and applications, pp. 234-244, London, United Kingdom, August 31-September 02, 1994.

박 재 현

1988년 2월 중앙대학교 전자계산학과 졸업. 1991년 2월 한국 과학기술원 전산학과 석사. 1995년 8월 한국 과학기술원 전산학과 박사. 1995년 8월~2000년 2월 삼성전자 정보통신 본부 데이타네트웍 개발팀 MPLS/ATM 개발담당. 2000년 3월~2002년 8월 영남대학교 전자정보공학부, 정보통신 전공 교수. 2002년 9월~현재 중앙대학교 컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 ATM Switch Arch., Multiprotocol Label Switching System, Routing Protocols, Ad Hoc Networking, Peer-to-Peer System