

주변 노드 발견을 통한 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 클러스터링 및 전력 균형 분산 기법

준회원 최 지 영*, 종신회원 강 충 구*

Neighbor Node Discovery and Load Balancing Schemes for Energy-Efficient Clustering in Wireless Sensor Networks

Ji-young Choi* Associate Member, Chung-gu Kang** Lifelong Member

요 약

경제성 및 전력 효율성 등을 고려하여 단일 주파수 채널을 사용하는 클러스터 기반의 계층구조 무선 센서 네트워크에서 클러스터 헤드는 클러스터 내의 노드들에 대한 무선 자원 할당 및 제어를 관장하며, 데이터 축약(data aggregation) 또는 라우팅 등의 처리 기능이 집중되어 클러스터 내의 노드들과 빈번한 통신이 이루어진다. 따라서 클러스터 헤드는 일반 노드에 비해 상대적으로 많은 에너지를 소모하게 되고 배터리가 먼저 고갈되면 그 동작을 멈추게 된다. 이는 무선 센서 네트워크 수명을 단축시키는 주요한 원인이 되기 때문에 전력 효율적인 망 구조를 도출할 수 있는 클러스터링을 통해 에너지 소모가 많은 클러스터 헤드의 개수를 최소화하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 노드간의 상호 응답 과정을 통해 주변 노드들을 발견하고 그 개수를 세어 나가는 과정을 통해 클러스터 헤드와 게이트웨이간의 거리를 최대화시켜 평균적으로 클러스터 헤드의 개수를 최소화할 수 있는 새로운 형태의 클러스터링 알고리즘을 제안하였으며, 모의실험을 통해 제안된 클러스터링 알고리즘에 의해 클러스터 헤드 개수가 기존의 클러스터링 알고리즘 대비 최대 21% 감소함을 보여준다. 또한 각 노드들의 역할을 재설정하여 네트워크의 평균 수명을 극대화하기 위한 전력 균형 분배(load balancing) 과정에서 에너지 소모가 많은 재클러스터링 과정의 발생을 억제함으로써 전체 네트워크 수명을 연장 시킬 수 있는 새로운 방식을 제안하였다

Key Words : Wireless Sensor Networks, Hierarchical Routing, Clustering Algorithm, Load Balancing

ABSTRACT

Clustering algorithm is an essential element to implement a hierarchical routing protocol, especially for a large-scale wireless sensor network. In this paper, we propose a new type of energy-efficient clustering algorithm, which maximizes the physical distance between cluster head and gateway by a neighbor node discovery mechanism. Furthermore, a slave/master patching scheme is introduced as a useful means of further improving the energy-efficiency. It has been shown that the number of cluster heads can be reduced by as many as 21% as compared with the existing clustering algorithms.

I. 서 론

무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)

를 구성하기 위해서는 네트워크의 응용 환경 및 서비스의 특성 등을 고려하여 적절한 망의 구조(topology)가 우선 결정되어야 하며, 이에 적합한

* This work has been supported in part by the SAMSUNG Advanced Institute of Technology (SAIT) of Korea and in part by grant R01-2003-000-10155-0(2004) from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation.

* 고려대학교 전파공학과 무선정보통신시스템 연구실(jychoi2004, ccgkang@korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-01-014, 접수일자 : 2006년 1월 6일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 24일

라우팅 방식 및 매체접근제어 방식 등이 함께 고려되어야 한다. 무선 센서 네트워크를 위한 망의 구조는 크게 평면구조(flat topology) 망과 계층구조(hierarchical topology) 망으로 분류할 수 있다.

평면구조 망에서는 모든 센서 노드들이 라우터 역할을 수행하므로 각 노드들은 적절한 라우팅 알고리즘에 의해 주변 노드들을 경유하여 자신의 목적지까지 다중 홉 통신이 가능해야 한다. 이 방식에서는 매체 접근을 제어하는 주체가 네트워크 상에 별도로 존재하지 않으므로 CSMA-CA (carrier sensing multiple access) 프로토콜 등의 경쟁 방식을 통하여 노드들 스스로 분산적인 방식을 통해 데이터 전송을 수행한다. 평면구조 망에서는 센서 노드의 숫자가 증가할수록 노드간의 충돌도 함께 증가하여 데이터를 재전송해야 하는 횟수가 늘어나게 되고, 이는 센서 노드의 에너지 소모를 불러오게 되므로 무선 센서 네트워크에서는 적합하지 않다.

반면, 계층구조 망에서는 다수의 센서 노드들을 관장하는 대표 노드가 선출되며, 선출된 대표 노드는 자신이 관장하는 센서 노드의 무선 자원을 할당하고 제어하는 역할을 담당한다. 대표 노드를 포함한 일반 센서 노드들의 집합을 클러스터(cluster)라고 정의하며, 센서 네트워크 내의 모든 노드들 가운데 대표 노드를 선출하고 클러스터를 구성하는 일련의 과정을 클러스터링(clustering)이라고 한다. 계층구조 망을 구성하기 위해서는 클러스터링이 선행되어야 하며, 클러스터링 과정을 통하여 모든 센서 노드들은 그 역할에 따라 클러스터 헤드(CH: Cluster Head), 게이트웨이(GW: Gateway), 일반 노드(ON: Ordinary Node) 등으로 분류된다. CH는 클러스터 내의 각 센서 노드에게 ID 및 무선 자원을 할당하고 제어하는 역할을 담당한다. 또한, CH는 TDMA(time division multiple access) 기반 프레임 관리를 하며, 각 노드들의 TDMA 슬롯을 예약 및 할당하는 중앙 집중적인 스케줄링의 주체로서 기능을 수행한다. GW는 해당 지역에서 발생한 정보를 감지하여 자신을 관장하는 클러스터 내의 CH로 데이터를 전송한다. 또한, GW는 자신을 관장하는 CH와 인접 클러스터의 CH간 통신을 중간에서 연결해주는 역할을 담당한다. ON은 해당 지역에서 발생한 정보를 감지하여 자신을 관장하는 클러스터내의 CH로 데이터를 전송하는 역할을 담당한다.

계층구조 망에서 CH는 센서 노드에서 수집된 데이터를 수집 노드로 전달하는 과정에서 데이터 축약(data aggregation) 과정을 수행한 후 축약된 데이

터를 최종 목적지까지 전송하여 인접 지역 데이터의 중복 전송을 피할 수 있다⁵⁾. 한편, 클러스터 내에서 다수를 차지하는 ON들은 라우팅 경로 설정에 참여하지 않고, CH와 GW만을 경유하여 최종 목적지까지 데이터를 전송할 수 있으므로 데이터 전달에 소모되는 각 노드의 전력 효율성을 극대화할 수 있다.

이상에서와 같이 계층구조 망에서는 센서 노드에서 수집된 정보를 목적지인 수집 노드로 전달하는 과정에서 데이터 축약이 수행되고, 예약 기반의 스케줄링을 통해 노드간 충돌 없이 데이터를 전송할 수 있으며, 노드가 자신의 전송 구간을 제외한 다른 구간에서 수면기를 가질 수 있다. 이러한 여러 측면을 고려할 때 평면구조 망보다는 계층구조 망이 무선 센서 네트워크에서 전력 효율성을 극대화 시키기에 적합한 적급 형태이다. 그러나, 계층구조 망이 갖는 가장 큰 한계는 클러스터간의 상호 간섭 문제이다. 즉, 다수의 인접한 클러스터에서 수집된 데이터가 동시 다발적으로 수집 노드로 전송될 때 인접 클러스터간에 상호 간섭이 발생할 수 있다. 보다 구체적으로 보면, 인접 클러스터간의 중첩 영역에 존재하는 노드(GW)가 데이터를 전송할 때, 이웃 클러스터 내에서 데이터 전송 중인 다른 노드(ON)에게 간섭을 발생시키게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 다수의 주파수 채널 또는 코드 채널을 사용하는 것이 일반적이다. 즉, 클러스터 내에서의 통신은 동일 채널을 사용하지만 인접 클러스터간에는 상호 간섭을 배제하기 위해 다른 클러스터와의 통신에는 별도의 주파수 채널이나 코드 채널을 사용하는 방법이다.

무선 센서 네트워크에서는 넓은 지역에 걸쳐 대규모의 센서 노드들이 배치될 수 있기 때문에 저가의 라디오 장치로 구현이 가능하여야 한다. 이러한 경제성을 고려하여 단일 주파수 채널을 사용하는 것이 고려되는 것이 바람직하며, 이 경우 클러스터간의 상호 간섭 문제를 해결하기 위해 경쟁 방식의 매체접근제어 프로토콜을 사용하는 방법이 있다. 최근 제안된 HiPERMAC 프로토콜에서는 하나의 주파수 채널만을 가지고 클러스터간의 상호 간섭 요인들을 시간과 공간으로 분할하여 클러스터 내의 통신(intra-cluster communication)은 TDMA 방식을 사용하고, 클러스터간의 통신(inter-cluster communication)은 CSMA-CA 프로토콜을 사용하고 있다⁶⁾.

이상에서와 같이 경제성 및 전력 효율성을 고려하여 단일 주파수 채널을 사용하는 클러스터 기반

의 계층구조 망에서 CH는 클러스터 내의 노드들에 대한 무선 자원 할당 및 제어를 관장하며, 데이터 축약 또는 라우팅 등의 처리 기능이 집중되어 클러스터 내의 노드들과 빈번한 통신이 이루어지게 된다. 또한, GW는 라우팅 과정에 참여하는 동안 인접 클러스터간의 상호 간섭으로 인해 인접 클러스터와의 통신 시 전력 효율성이 상대적으로 낮은 경쟁 방식의 매체 접근 방식을 사용하여야 한다. 따라서 CH와 GW는 ON에 비해 상대적으로 많은 에너지를 소모하게 되고 배터리가 먼저 고갈되면 그 동작을 멈추게 된다. 이는 무선 센서 네트워크 수명을 단축시키는 주요한 원인이 되기 때문에 효율적인 클러스터링 방법을 통해 에너지 소모가 많은 CH와 GW 개수를 최소화하는 것이 중요하다.

그러나 기존에 제안된 대표적인 클러스터링 알고리즘들을 살펴보면, 먼저 각 노드들의 ID를 바탕으로 CH를 선정하는 방식인 Lowest ID 클러스터링 알고리즘²⁾은 모든 노드에 서로 고유한 ID를 부여한다. 각 노드는 자신의 ID를 포함하여 자신의 이웃 노드들의 ID 정보를 주기적으로 브로드캐스트한다. 모든 노드는 이러한 메시지 교환을 통해 주변 노드들의 ID 정보를 수집하고, 주변 모든 노드들의 ID가 자신의 ID보다 큰 경우 해당 노드는 클러스터 헤드(CH)가 된다. CH는 자신의 전송 반경 내의 노드들에게 beacon 신호를 브로드캐스트 하고 CH로부터 beacon 신호를 수신한 노드는 일반 노드(ON)가 되며, 2개 이상의 CH로부터 beacon 신호를 수신한 ON은 게이트웨이(GW)가 된다. 이 방식은 가장 단순하고 일반적인 클러스터링 기법이지만 에너지 소모가 많은 CH 및 GW가 다수 생성됨으로 전력 효율성이 떨어지는 단점이 있다. Topology Discovery 알고리즘³⁾은 CH와 GW 간의 거리를 최대화시켜 전체 네트워크에서 에너지 소모가 많은 CH와 GW 개수를 최소화시키기 위한 클러스터링 방법이다. 노드 상호 간의 메시지 교환 과정을 통해 전송 지연 (propagation delay) 시간이 노드 간의 상대 거리에 비례한다는 가정을 응용한다. Topology Discovery 알고리즘에서는 클러스터링을 최초 수행할 임의의 한 개 노드가 CH로 미리 지정되어 있다. 미리 지정된 CH는 전송 범위 내의 노드들에게 Topology discovery 패킷을 브로드캐스트 하고, 각 노드들로부터 수신된 응답 신호의 전송 지연 시간을 측정한다. CH는 그 전송 지연 시간이 가장 긴 노드를 상대적으로 가장 거리가 먼 노드로 간주하여 GW로 선정하게 된다. GW는 위와 동일한 방법

으로 이웃 클러스터의 CH를 선정하여 클러스터링 과정을 전체 네트워크로 확산시키게 된다. 이 방식에서 응용하는 전송 지연 시간이 노드 간의 상대 거리에 비례한다는 가정은, 실제 무선 환경에서 페이딩이나 다중 경로 등으로 인해 그 정확도가 떨어질 수 있고, 또한 전송 범위가 수 미터 이내인 무선 센서 네트워크 환경에서 전송 지연 시간의 미세한 차이를 감지하기 어려운 한계가 있을 수 있다.

본 논문에서는 앞서 살펴본 클러스터링 알고리즘들의 단점을 보완하여 노드 간의 상호 응답 과정을 통해 주변 노드들을 발견하고 그 개수를 세어 나가는 과정을 통해 CH와 GW간의 거리를 최대화시키고, 그 결과에 의해 평균적으로 CH와 GW 개수를 최소화할 수 있는 클러스터링 알고리즘을 제안함으로써 전력 효율적인 망 구조를 도출하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 제안된 클러스터링 방식의 개념과 세부적인 절차를 제시한다. III장에서는 에너지 소모가 많은 CH의 역할 수행 기회를 모든 노드에게 공평하게 부여하여, 모든 노드들의 배터리 소모 속도를 균일하게 유지하기 위한 전력 균형 분배(load balancing) 기법을 제안한다. IV장에서는 II장과 III장에서 언급된 클러스터링 방식 및 전력 균형 기법에 대한 성능 분석 결과를 제시하고, 마지막으로 V장에서는 결론 및 향후 연구 과제에 대해 논의한다.

II. Neighbor Node Discovery(NND) 알고리즘

본 장에서는 제안하는 클러스터링 알고리즘을 위한 시스템 모델 유형 및 기본 개념을 먼저 설명하고 상세 동작 원리에 대한 기술이 이어진다.

2.1 시스템 모델 유형

구현의 편리성 등으로 인해 다수의 주파수 채널을 사용하는 일반적인 기존 시스템을 대신하여, 본 논문에서는 단일 주파수 채널만을 사용하는 시스템 방식을 고려한다. 즉 슈퍼 프레임을 TDMA 구간과 CSMA-CA 구간으로 분할하여 클러스터 내의 통신은 TDMA 기법을 사용하고 클러스터 간의 통신은 CSMA-CA 기법을 사용하는 방식이다. 단일 주파수 채널만을 고려하는 이유는 무선 센서 네트워크의 고유한 특성으로 인해 넓은 지역에 걸쳐 대규모의 센서 노드들이 배치될 수 있으며, 그 경제성을 고려할 때 저가의 라디오 장치로 구현이 가능해야 하기 때문이다. 그림 1은 제안하는 알고리즘에서의 노드

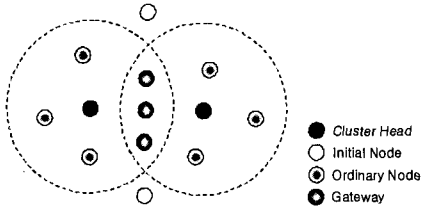


그림 1. NND 알고리즘의 노드 유형

유형을 나타내며 그 역할에 따라 cluster head (CH), initial node (IN), ordinary node (ON), gateway (GW) 등 4가지로 분류된다. CH는 클러스터 내의 각 센서 노드에게 ID 및 무선 자원을 할당하고 제어하는 역할을 담당한다. 특정 클러스터에 속하지 않고 초기 상태에 있는 IN은 클러스터링 과정을 통해 CH, ON, GW 등으로 지정된다. ON은 해당 지역에서 발생한 정보를 감지하여 자신을 관장하는 클러스터내의 CH로 데이터를 전송하는 역할을 담당한다. 그리고 GW는 자신을 관장하는 CH와 인접 클러스터의 CH간의 통신을 중간에서 연결해 주는 역할을 담당한다. 또한, GW도 마찬가지로 해당 지역에서 발생한 정보를 감지하여 자신을 관장하는 클러스터내의 CH로 데이터를 전송한다.

2.2 기본 동작

본 논문에서 제안하는 클러스터링 방식은 노드 간의 상호 응답 과정을 통해 주변 노드들을 발견하고 그 개수를 세어 나가는 과정을 통해 CH와 GW

간의 거리를 최소화시키는 방식으로서, 이를 Neighbor Node Discovery(NND) 알고리즘이라고 부른다. NND 알고리즘의 기본 동작은 초기 클러스터 설정 단계, Gateway 선정 단계, Cluster head 선정 단계, Gateway 재선정 단계로 구성되며, 이러한 과정들은 모든 IN이 CH나 GW 또는 ON 등으로 지정될 때까지 반복된다. 그림 2에서는 NND 알고리즘의 순서도를 나타내며, 상세한 동작 원리는 다음 절에서 설명한다.

2.2.1 초기 클러스터 설정 단계

클러스터링 과정이 순차적으로 진행되는 출발점으로, 수집 노드에 의해 클러스터링을 최초 수행할 임의의 한 개 노드를 CH로 미리 지정한다. 그림 3과 같이 CH는 주변 노드 발견을 위해 beacon 신호를 통해 advertisement 메시지를 1회 브로드캐스트 한다. 이 메시지를 수신한 IN은 자신의 ID 정보를 포함한 Joining request 메시지를 CH에게 송신한다. CH는 수신된 해당 IN의 ID 정보를 저장하고 클러스터의 구성원으로 등록한 후 전송 반경 내의 IN에게 beacon 신호를 주기적으로 브로드캐스트 한다. Beacon 신호를 수신한 IN은 ON으로 상태가 천이된다.

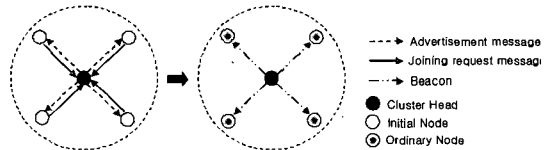


그림 3. 초기 클러스터 설정 단계

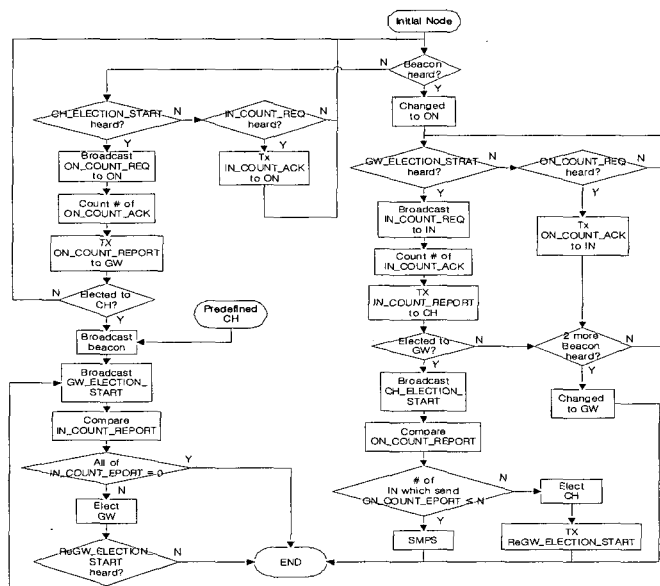


그림 2. NND 알고리즘의 순서도

2.2.2 Gateway 선정 단계

CH와 상대적으로 가장 거리가 먼 ON을 GW로 선정하기 위한 단계로, 일반적으로 CH와 가장 거리가 먼 ON이 주변의 IN을 평균적으로 가장 많이 포함하게 된다는 사실을 이용한다. 각 ON들은 전송 반경 범위 내에 존재하는 IN의 개수를 세어 CH에게 보고하고, CH는 그 중 가장 많은 IN 개수를 포함하는 ON을 GW로 선정하는 방식이다. 이 과정을 보다 상세하게 살펴보면 다음과 같다.

우선 CH는 GW_ELECTION_START 메시지를 브로드캐스트 하고, 이 메시지를 수신한 ON은 각자의 전송 반경 내에 있는 IN들의 개수를 세기 위하여 IN_COUNT_REQ 메시지를 브로드캐스트 한다. 이 메시지를 수신한 IN은 IN_COUNT_ACK 메시지를 ON에게 전송하며, 이때 다수 개의 ON으로부터 IN_COUNT_REQ 메시지를 수신한 경우에도 해당 IN은 IN_COUNT_ACK 메시지를 1회만 전송한다. 각 ON은 IN들로부터 수신한 ACK 개수를 세어 IN_COUNT_REPORT 메시지를 통해 CH에게 보고한다. CH는 수신된 메시지를 비교하여 가장 많은 IN을 포함하고 있는 ON을 GW로 선정하며, 가장 많은 IN을 포함하고 있는 ON이 2개 이상일 때는 ID가 낮은 ON을 GW로 선정하게 된다. 그림 4의 예제에서 노드 A는 전송 반경 범위에 3개의 IN을 포함하고, 노드 B는 2개의 IN을 포함하게 되므로 노드 A가 GW로 선정되는 예시를 보여준다.

수신된 IN_COUNT_REPORT 메시지 값이 모두 0 이면(ON 주변에 IN이 없는 경우) CH는 GW를 선정하지 않고 NND 알고리즘이 종료되며, 한 개 이상의 IN_COUNT_REPORT 메시지 값이 0보다 크면 cluster head 선정 단계로 넘어간다.

2.2.3 Cluster head 선정 단계

GW와 상대적으로 가장 거리가 먼 IN을 이웃 클

러스터의 CH로 선정하기 위한 단계로, GW와 가장 거리가 먼 IN이 주변의 ON을 가장 적게 포함하게 되는 원리를 이용한다. 각 IN들은 전송 반경 범위 내의 ON의 개수를 세어 GW에게 보고하고, GW는 그 중 가장 적은 ON 개수를 포함하는 IN을 이웃 클러스터의 CH로 선정하는 방식이며 이 과정을 보다 상세하게 살펴보면 다음과 같다.

우선 GW는 CH_ELECTION_START 메시지를 브로드캐스트 하고 이 메시지를 수신한 IN은 각자의 전송 반경 내에 있는 ON 들의 개수를 세기 위하여 ON_COUNT_REQ 메시지를 브로드캐스트 한다. 이 메시지를 수신한 ON은 ON_COUNT_ACK 메시지를 IN에게 전송하며, 이때 다수개의 IN으로부터 ON_COUNT_REQ 메시지를 수신한 경우에도 해당 ON은 ON_COUNT_ACK 메시지를 1회만 전송한다. 각 IN은 ON들로부터 수신한 ACK 개수를 세어 ON_COUNT_REPORT 메시지를 통해 GW에게 보고한다. GW는 수신된 메시지를 비교하여 가장 적은 ON을 포함하고 있는 IN을 주변 클러스터의 CH로 선정하며, 가장 적은 IN을 포함하고 있는 IN이 2개 이상일 때는 ID가 낮은 IN을 CH로 선정하게 된다. 그림 5의 예제에서 노드 A는 전송 반경 범위에 3개의 ON을 포함하고, 노드 B는 2개의 ON을 포함하게 되므로 노드 B가 이웃 클러스터의 CH로 선정되는 예를 보여주고 있다.

ON_COUNT_REPORT 메시지를 송신한 IN이 없을 때(GW 주변에 IN이 없는 경우) GW는 CH를 선정하지 않고 NND 알고리즘이 종료되며, GW가 한 개 이상의 IN으로부터 메시지를 수신하면 이웃 클러스터의 CH를 선정한 후 gateway 선정 단계로 넘어간다.

새로 선출된 CH (C)는 주변 IN에게 자신의 존재를 알리기 위해 Advertisement 메시지를 브로드캐스트 하고 이를 수신한 IN은 자신의 ID 정보를 포

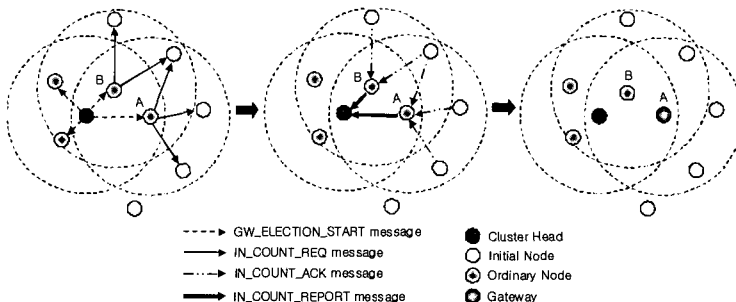


그림 4. Gateway 선정 단계

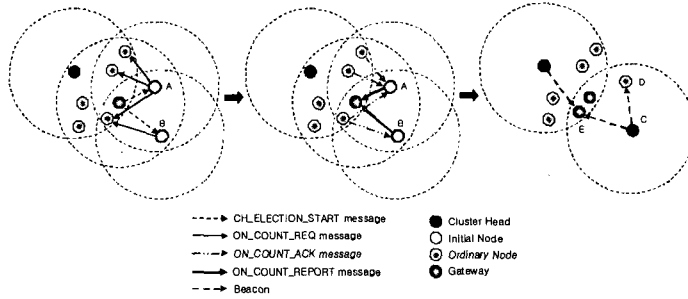


그림 5. Cluster head 선정 단계

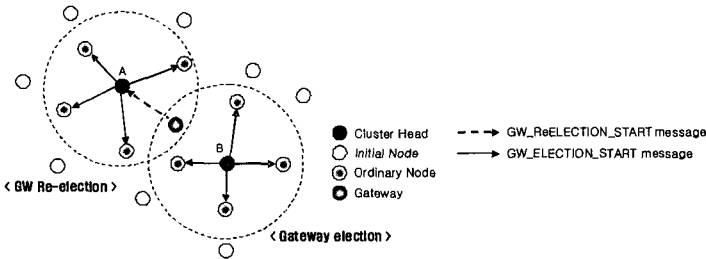


그림 6. Gateway 재선정 단계

함한 Joining request 메시지를 CH에게 송신한다. CH는 수신된 해당 IN의 ID 정보를 저장하고 클러스터의 구성원으로 등록한 후 전송 반경 내의 IN에게 beacon 신호를 브로드캐스트 한다. Beacon 신호를 수신한 IN (D)은 ON으로 상태가 천이되며, 2개 이상의 CH로부터 beacon 신호를 수신한 ON (E)는 GW로 상태가 천이된다.

2.2.4 Gateway 재선정 단계

클러스터링 과정을 여러 방향으로 확산 시키고 병렬적인 클러스터링 과정을 통해 전체 네트워크 상의 클러스터링 소요 시간을 줄이기 위한 과정이다. 그림 6에서와 같이 이웃 클러스터의 CH (B) 선정 작업을 마친 GW는 자신을 GW로 선정한 원래의 CH (A)에게 GW_ReELECTION_START 메시지를 전송한다. CH (A)는 클러스터 내의 ON을 대상으로 또 다른 GW를 선정하는 gateway 선정 단계를 수행한다.

2.3 Slave/Master Patching(SMP) 기법

제안하는 NND 알고리즘을 포함한 대부분의 클러스터링 방식들은 그림 7에서와 같이 ON을 포함하지 않거나 소수의 ON을 포함하는 CH의 생성으로 인하여 GW 개수가 급속히 증가하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 불필요한 GW 생성을 억제하

기 위해 Slave/Master Patching (SMP) 기법을 제안한다. SMP는 NND 알고리즘의 Cluster head 선정 과정에서 GW 전송 반경 내의 IN 개수 (수신된 ON_COUNT_REPORT 메시지 개수)가 미리 설정

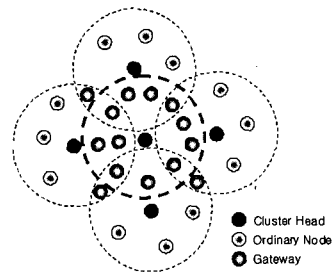


그림 7. 불필요한 GW 생성 예시

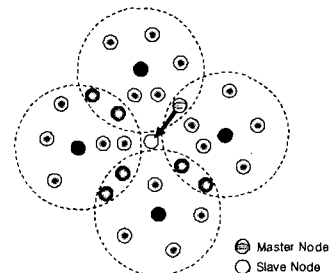


그림 8. Slave/Master Patching 기법 예시

해 놓은 election threshold ($N = 0, 1, 2, \dots$) 이하이면 GW가 IN 중에서 CH를 선정하지 않고, 그림 8에서와 같이 IN 상태로 남겨두게 하여 GW 개수가 불필요하게 증가되는 문제를 완화시킬 수 있다. 여기서 GW는 IN의 MN (Master Node)이 되고 IN은 GW의 SN (Slave Node)으로 상태가 천이되어 MN은 SN의 자원 할당이나 트래픽 등을 제어하게 된다.

III. 전력 균형 분배(Load Balancing) 기법

앞서 살펴본 바와 같이 CH는 계층구조 망에서 클러스터내의 노드들의 무선 자원 할당 및 제어를 관장하며, 데이터 축약(data aggregation) 또는 라우팅 등의 처리 기능을 집중 수행 하므로 일반 노드에 비해 상대적으로 많은 에너지를 소모하게 되고 배터리가 먼저 고갈되면 네트워크 전체의 망 구성에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 다수의 CH가 동작을 멈추게 되면 재클러스터링(re-clustering) 과정을 통해 센서 네트워크를 초기화할 수 있지만, 한번 배터리가 고갈되어 그 동작을 멈춘 노드는 배터리의 재충전이나 교환이 어려워 센서 노드와 수집 노드 사이의 경로가 물리적으로 단절되는 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 모든 노드에게 CH 역할을 수행할 기회를 공평하게 부여하여 특정 노드의 배터리가 모두 소모되는 것을 사전에 방지하고, 모든 노드들의 배터리 소모 속도를 균일하게 유지하는 과정을 전력 균형 분배(load balancing)이라고 한다.

전력 균형 분배를 위한 일반적인 접근 방법은 특정 시간마다 주기적으로 네트워크를 초기화 시키고 특정한 기준에 의해 CH가 재선정 되도록 하는 것이다. 여기서 말하는 특정한 기준에는 노드들의 배터리 잔량 정보를 상호 교환하여 주변 노드 중 배터리 잔량이 가장 많은 노드가 CH로 선정되도록 하거나, 노드들의 CH 역할 수행 횟수를 상호 교환하여 주변 노드 중 그 수행 횟수가 가장 적은 노드가 CH로 선정되도록 하는 방식 등을 고려할 수 있다.

한편, NND 알고리즘을 통해 초기에 구성된 클러스터링 형태가 생성된 CH와 GW 노드의 수를 최소화한다는 측면에서 가장 이상적인 망의 형태로 볼 수 있으며, 이를 오랜 시간 동안 유지시키는 것이 바람직 하지만 노드의 배터리 고갈로 인한 네트워크 단절을 방지하기 위해 노드간의 전력 균형 분배 기법이 필요하다. 이를 위해 수집 노드가 배터리 잔량이 가장 많은 노드를 CH로 재선정하게 되면,

노드간의 배터리 소모 속도가 공평하게 유지될 수는 있지만 에너지 소모가 많은 CH와 GW 생성 개수가 증가하게 되어 전체 네트워크 수명이 단축되는 주요한 원인이 된다. 반면에 NND 알고리즘에서 이웃 노드의 ACK 개수를 세어 CH를 선정하는 방식으로 CH를 재선정 하게 되면, CH와 GW간의 거리를 최대화시켜 CH와 GW 생성 개수를 증가시키지 않으나, 이전에 CH나 GW 노드 역할을 수행함으로써 배터리 소모가 많았던 노드가 다시 CH로 재선정되어 불필요한 재클러스터링이 빈번하게 발생할 수 있다. 이 과정에서 과도하게 소모되는 에너지로 인해 전체 네트워크 수명이 단축되는 주요한 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 NND 알고리즘에서는 CH의 배터리가 소모되어 그 잔량이 기준치 이하로 떨어지기 전까지 CH 역할을 지속시키도록 하고, CH의 배터리 잔량이 기준치 이하로 떨어지면 해당 CH가 수집 노드에게 재클러스터링을 요청한다. 특정 CH로부터 재클러스터링을 요청받은 수집 노드는 전체 네트워크를 초기화 시키고 재클러스터링을 수행한다. 재클러스터링 과정에서는 각 노드의 배터리 잔량과 이웃 노드들로부터 수신한 ACK 개수에 각각의 가중치(weight factor: w)를 부여하여, 이들의 합이 가장 큰 노드가 CH로 선정되게 된다. 본 절에서는 이 가중치의 적절한 조정을 통해서 NND 알고리즘 초기에 구성된 클러스터링 대비 CH와 GW 생성 개수를 크게 증가시키지 않으면서, 에너지 소모가 많은 재클러스터링 과정을 최대한 억제하여 전체 네트워크 수명을 극대화시킬 수 있는 새로운 형태의 전력 균형 분배(load balancing) 기법을 제안한다. 본 과정을 보다 상세하게 살펴보면 다음과 같다.

특정 CH의 배터리가 소모되어 그 배터리 잔량이 기준치 이하로 떨어지게 되면, 해당 CH는 수집 노드에게 ReCLUSTERING_REQ 메시지를 전송하여 재클러스터링을 요청한다. 이 메시지를 수신한 수집 노드는 네트워크 초기화 및 재클러스터링을 위해 ReCLUSTERING_START 메시지를 브로드캐스팅을 통해 모든 노드에게 전달하고 이 메시지를 수신한 모든 노드는 IN으로 상태가 천이된다. 수집 노드는 주변 노드 중 배터리 잔량이 가장 많은 한 개의 노드를 CH로 지정하고, 선정된 CH는 초기 클러스터 설정 단계를 수행한다. 초기 클러스터 설정 단계가 종료된 후 CH가 주변의 ON중에서 GW를 선정하기 위한 Gateway 선정 단계가 진행되는 동안 모든 ON은 다음 식(1)에서와 같이 주변 IN으로부터

수신한 ACK 개수와 자신의 배터리 잔량에 각각의 가중치(weight factor: w)를 곱한 GW priority 값을 갖게 되며($0 < w < 1$), 자신의 값을 CH에게 보고한다. CH는 ON으로부터 수신된 GW priority 값을 비교한 후 가장 큰 값을 갖는 ON을 GW로 선정한다.

$$GW\ priority(i) = w\{ONPRemain(i)\} + (1-w)\{ONNIN_ACK(i)\} \quad (1)$$

여기서, ONNIN_ACK는 ON이 주변 IN으로부터 수신한 ACK 개수를 나타내며, ONPRemain는 ON의 배터리 잔량을 나타낸다. 즉, 주변에 다수의 IN을 포함하거나 배터리 잔량이 많은 ON이 GW로 선정된다. 여기서 가중치 값이 작아질수록 CH와 멀리 떨어져 있는 ON이 GW로 선정될 확률이 높아져서 CH와 GW 생성 개수가 감소하게 되며, 이에 반해 배터리 잔량이 적은 ON이 GW로 선정될 확률도 함께 높아져 재클러스터링 발생 확률도 커지게 된다.

Gateway 선정 단계가 종료된 후 선출된 GW에 의해 이웃 클러스터의 CH를 선정하기 위한 cluster head 선정 단계가 진행되는 동안, 모든 IN은 다음 식(2)에서와 같이 주변 ON으로부터 수신한 ACK 개수와 배터리 잔량에 각각 가중치를 곱한 CH priority 값을 갖게 되며, 자신의 값을 GW에게 보고한다. GW는 IN으로부터 수신된 CH priority 값을 비교한 후 가장 큰 값을 갖는 IN을 이웃 클러스터의 CH로 선정한다.

$$CH\ priority(i) = w\{INPRemain(i)\} + (1-w)\{1 / INNON_ACK(i)\} \quad (2)$$

여기서, INNON_ACK은 IN이 주변 ON으로부터 수신한 ACK 개수를 나타내며, INPRemain는 IN의 배터리 잔량을 나타낸다. 즉, 주변에 소수의 ON을 포함하거나 배터리 잔량이 많은 IN이 이웃 클러스터의 CH로 선정된다. 여기서 가중치 값이 작아질수록 GW와 멀리 떨어져 있는 IN이 이웃 클러스터의 CH로 선정될 확률이 높아져 CH와 GW 생성 개수가 감소하게 되며, 이에 반해 배터리 잔량이 적은 IN이 주변 클러스터의 CH로 선정될 확률도 함께 높아져 재클러스터링 발생 확률도 커지게 된다.

IV. 성능 분석

본 논문에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 성능

분석을 수행하였으며, 제안하는 NND 알고리즘의 성능을 Lowest ID 알고리즘²⁾과 Topology Discovery (TopDisc) 알고리즘⁴⁾ 등의 기존 클러스터링 알고리즘의 성능과 상호 비교하였다. Lowest ID 알고리즘은 단일 홉 이내에 있는 노드들 중에서 가장 낮은 ID를 갖는 노드가 CH로 선출되는 방식이다. TopDisc 알고리즘은 노드간 상호 제어 메시지 교환 과정을 통해 메시지 전송 지연 시간이 가장 큰 노드가 상대적으로 가장 거리가 먼 노드로 간주되어 CH 및 GW로 선출되는 거리 기반의 클러스터링 방식이다.

성능 분석을 위해 50m x 50m 환경에서 센서 노드를 임의의 위치에 분포시키고, 센서 노드의 전송 반경은 5m로 설정했다. 본 실험에서는 무선 채널에서의 다중 경로 페이딩을 반영하지 않은 이상적인 무선 채널을 고려하였으며, 센서 노드의 수를 500 ~ 1,500개까지 변화시키면서 각각의 클러스터링 알고리즘을 500번 수행한 후 생성되는 노드별 평균 개수를 비교 분석했다. NND 알고리즘에 부가된 Slave/Master Patching (SMP) 기법의 election threshold (N) 값은 2를 적용했으며(즉, GW는 전송 반경 내의 IN 개수가 2개 이하이면 CH를 선정하지 않음), 다음 결과 제시에서 NND 알고리즘에 SMP 기법을 적용한 경우를 NND + SMP로 표기한다.

그림 9-11에서는 각 클러스터링 알고리즘을 수행한 후 생성되는 CH, GW, ON의 평균 개수를 나타낸다. 그림 9에서는 동일한 환경에서 제안하는 NND 알고리즘에 의해 CH 생성 개수가 Lowest ID 알고리즘 대비 6% 감소하며, 본 실험에서는 다중 경로 페이딩이 고려되지 않았음에도 TopDisc 알고리즘과 유사한 성능을 확인할 수 있다. NND 알고리즘에 SMP 기법을 적용했을 때 CH 생성 개수가 Lowest ID 대비 21% 감소함을 확인할 수 있다.

그림 10에서는 동일한 환경에서 NND 알고리즘에 의해 GW 생성 개수가 Lowest ID, TopDisc 알고리즘 대비 각각 13%, 8% 감소하며, NND 알고리즘에 SMP 기법을 적용했을 때 GW 생성 개수가 Lowest ID 대비 40% 감소함을 확인할 수 있다.

그림 11에서는 동일 환경에서 NND 알고리즘에 의해 ON 생성 개수가 Lowest ID, TopDisc 알고리즘 대비 각각 29%, 11% 증가하며, NND 알고리즘에 SMP 기법을 적용했을 때 ON 생성 개수가 Lowest ID 대비 66% 증가함을 확인할 수 있었다.

그림 12-15에서는 NND 알고리즘의 Cluster head 선정 단계에서 GW 전송 반경의 IN 개수가 election

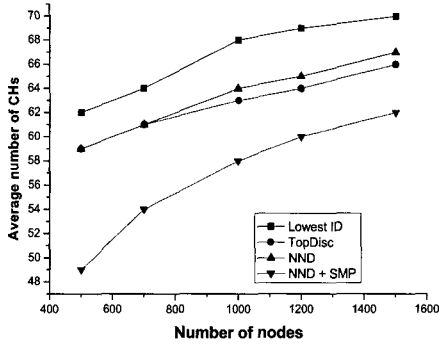


그림 9. 클러스터링 기법별로 생성된 CH의 평균 개수

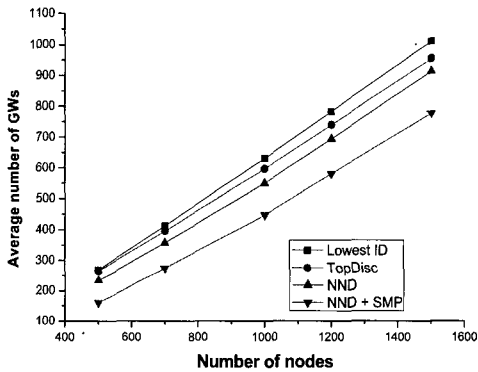


그림 10. 클러스터링 기법별로 생성된 GW의 평균 개수

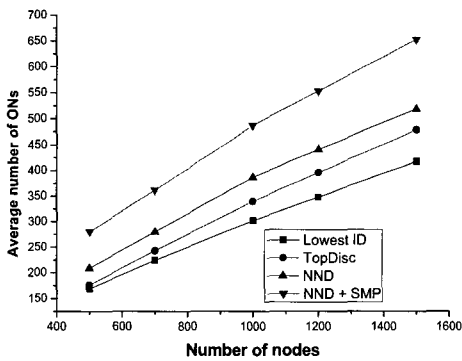


그림 11. 클러스터링 기법별로 생성된 ON의 평균 개수

threshold (N) 이하이면 CH를 선정하지 않고 IN을 SN 상태로 남겨 놓는 SMP 기법을 적용하여 N값을 증가시킬수록 에너지 소모가 상대적으로 많은 CH와 GW 개수를 감소시킬 수 있으며, 에너지 소모가 상대적으로 적은 ON 개수를 증가시킬 수 있기 때문에 보다 에너지 효율적인 센서 네트워크 구성이 가능하다. 그러나 CH와 GW 개수 감소의 목적으로 N 값을 크게 할수록 SN 개수도 함께 증가

하게 되는데, 이러한 경우 MN(GW)이 peer-to-peer로 SN을 제어해야 하기 때문에 SN에서 수집된 데이터를 성공적으로 전송하기 위해 전송 시도 횟수가 증가할 수 있으며, 이는 수집 노드까지 전송하는데 소요되는 전송 시간의 지연을 유발할 수 있다. 따라서 센서 네트워크의 다양한 응용 환경에 따라 에너지 효율성과 전송 시간 지연 등을 고려한 N 값의 적절한 선택이 요구된다.

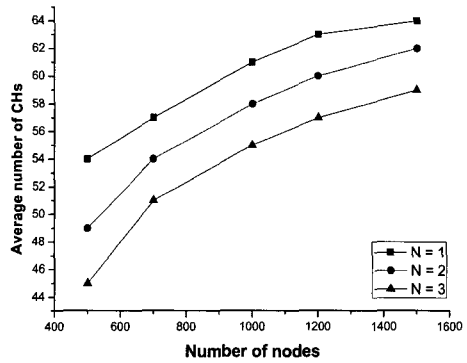


그림 12. SMP 임계값에 따라 생성된 CH의 평균 개수

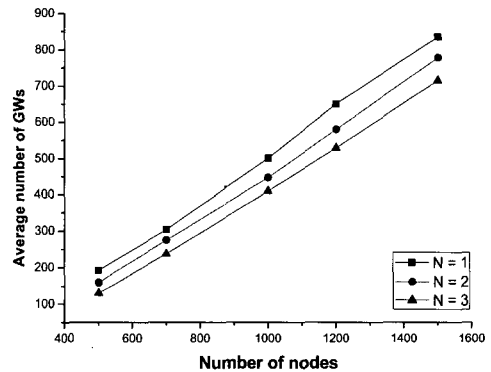


그림 13. SMP 임계값에 따라 생성된 GW의 평균 개수

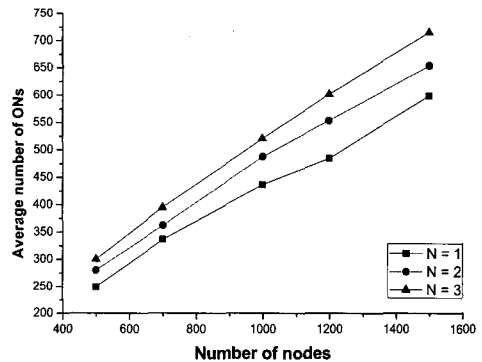


그림 14. SMP 임계값에 따라 생성된 ON의 평균 개수

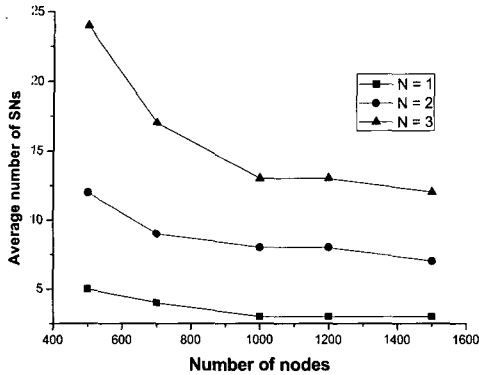


그림 15. SMP 임계값에 따라 생성된 SN의 평균 개수

제안하는 전력 균형 분배(load balancing) 기법의 성능 분석을 위해 앞의 실험 조건과 동일한 환경에서 1,000개의 센서노드를 가지고 모의실험을 진행하였다. 모든 노드들의 초기 배터리 에너지는 2J로 동일하다고 가정하였으며, 각 노드별 소모되는 에너지는 다음과 같이 계산되었다.

1) 클러스터 헤드(CH)

$$E_{CH_TX}(k,d) = (E_{elec} \times k) + (E_{amp} \times k \times d^2)$$

$$E_{CH_RX}(k) = \{(E_{elec} + E_{DA}) \times k\} \times N_N$$

2) 게이트웨이 노드(GW)

$$E_{GW_TX}(k,d) = \{(E_{elec} \times k) + (E_{amp} \times k \times d^2)\} \times N_{RT}$$

$$E_{GW_RX}(k) = E_{elec} \times k$$

3) 일반 노드(ON)

$$E_{ON_TX}(k,d) = (E_{elec} \times k) + (E_{amp} \times k \times d^2)$$

$$E_{ON_RX}(k) = E_{elec} \times k$$

4) 초기 노드(IN)

$$E_{IN_TX}(j,d) = \{(E_{elec} \times j) + (E_{amp} \times j \times d^2)\} \times N_{RT}$$

$$E_{IN_RX}(j) = E_{elec} \times j$$

노드별 소모 에너지를 산출하기 위해 필요한 각 요소들의 정의 및 해당 값들은 표 1에서와 같으며 “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks”^[7]에서 사용한 값들을 동일하게 적용하였다. 제안된 클러스터링 과정에서 COUNT_REQ에 대한 응답으로 다수의 노드들이 동시에 COUNT_ACK을 전송하는 경우에는

표 1. 노드별 에너지 소모 요소

	정의	값
E_{elec}	송수신회로 소모 에너지	50nJ/bit
E_{amp}	송신 앰프 소모 에너지	100pJ/bit/m ²
E_{DA}	데이터 병합 소모에너지	5nJ/bit
N_{RT}	노드별 재전송 횟수	
N_N	클러스터 내의 노드 개수	
d	노드 전송 반경	5m
k	송신 데이터 크기	1,000bit
j	REQ/ACK 메시지 크기	50bit

충돌이 발생하게 되며, 이에 따른 재전송 과정이 불가피하다. 이와 같은 재전송으로 인한 노드별 전력 소모가 불가피하며, 재클러스터링으로 인해 발생하는 추가적인 전력 소모는 이 과정에서의 각 노드별 재전송 횟수와 밀접한 관련이 있다. 따라서, 재클러스터링에 따른 추가적인 전력 소모를 산출하기 위해 클러스터링 과정에서 발생하는 각 노드별 재전송 횟수가 반영되어야 한다. 본 분석에서는 각 노드별로 전송을 성공할 때까지 수행되는 총 전송 횟수를 geometric 랜덤 변수로 가정한다, 이때, 이때 각 전송 시도에서 성공할 확률은 경쟁하는 노드의 수에 따라 달라지며, n개의 노드가 경쟁할 때 각 전송 시도에서 성공할 확률을 P_n 이라고 한다. n개의 노드가 독립적으로 전송 시도를 할 때 k개의 노드가 동시에 전송할 확률은 다음과 같은 binomial 확률로 주어진다.

$$p_n(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

여기서, 각 노드가 독립적으로 전송 시도를 할 확률은 $p = 1/n$ 로 가정하며, 이때 단 하나의 노드만이 전송에 성공할 확률은 $P_n(1)$ 으로 주어진다(즉, $P_n = P_n(1)$). 총 전송 횟수는 P_n 을 파라미터로 하는 geometric 랜덤 변수로 가정하였으므로, 각 노드별 재전송 횟수는 $N_{RT} = 1/P_n(1)$ 로 주어진다.

한편, 네트워크 수명(network lifetime)을 나타내는 간접적인 척도로서 시간에 따른 생존 노드 개수를 기준으로 삼았다. 여기서 생존 노드는 전체 노드 중 배터리가 모두 소모되어 그 역할을 수행할 수 없는 노드와 배터리가 남아 있어도 주변에 통신 가능한 노드가 없어서 수집노드와 통신을 수행할 수 없는 노드를 제외한 나머지 노드를 의미한다.

그림 16은 기중치에 따라 제안된 방식에 의해 발

생된 각 노드의 수를 나타낸 것이며, 그림 17은 가중치별로 수행된 재클러스터링의 평균 회수를 나타낸다. 한편, 그림 18은 시간이 지나면서 생존하는 노드 수를 나타낸 것으로서, 전력 효율적인 망 구성에 대해서 더 많은 노드들이 생존하게 된다. 이 경우, 가중치에 따라 노드들의 생존도가 다른 것을 알 수 있다. 그림 18의 예시에서는 $w = 0.5$ 일 때 가장 생존도가 높으며, 이 때 전력 효율성이 가장 좋은 망 구성이 이루어지는 것을 암시한다.

배터리 잔여 에너지만을 고려한 전력 균형 분배 기법을 수행했을 때는(즉, $w=1$ 인 경우), 그림 16에서와 같이 에너지 소모가 많은 CH와 GW 개수가 증가하고 에너지 소모가 작은 ON 개수가 감소한다. 한편, 이때 그림 18에서 보는 바와 같이 전체 네트워크의 수명이 짧아지는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 주변에서 수신한 ACK 개수만을 가지고 전력 균형 분배 기법을 수행했을 때는($w=0$ 인 경우) 그림 17에서와 같이 재클러스터링 횟수가 증가하고, 이때 소모되는 에너지로 인해 그림 18에서와 같이 전체 네트워크 수명이 짧아지게 됨을 알 수 있다. 따라서

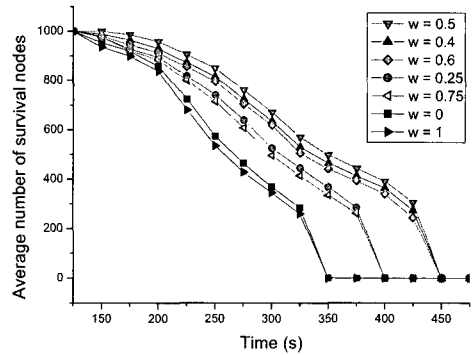


그림 18. 가중치에 따른 생존 노드의 평균 개수

제안하는 전력 균형 분배 기법에서 가중치 값을 적절히 조정하여(예를 들어, $w=0.5$), NND 알고리즘 초기에 구성된 클러스터링 대비 CH와 GW 생성 개수를 크게 증가시키지 않으면서, 에너지 소모가 많은 재클러스터링 과정이 빈번하게 발생하지 않도록 하여 전체 네트워크 수명을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 단일 주파수 채널을 사용하는 클러스터 기반 계층 구조의 무선 센서 네트워크에서, 노드 간의 상호 응답 과정을 통해 인접 노드를 발견하고 그 개수를 세어 나가는 과정(Neighbor Node Discovery: NND)을 통해 상대적으로 에너지 소모가 많은 클러스터 헤드(Cluster Head: CH) 노드와 게이트웨이 노드(Gateway: GW) 개수의 최소화가 가능하여 전력 효율성을 향상시킬 수 있는 클러스터링 알고리즘을 제안하였다. 또한 무선 센서 네트워크의 다양한 응용 환경과 요구 사항에 따라 전체 노드에서 차지하는 CH와 GW, 그리고 ON의 비율을 자유롭게 조절하여, NND 알고리즘의 전력 효율성을 극대화하기 위한 Slave-Master Patching (SMP) 기법을 제안하였다. 그리고 각 노드들의 역할을 재설정하여 전체 네트워크의 평균 수명을 연장하기 위한 전력 균형 분배(load balancing) 과정에서 NND 알고리즘 초기에 구성된 클러스터링 대비 CH와 GW 생성 개수를 크게 증가시키지 않고 에너지 소모가 많은 재클러스터링 과정의 발생을 억제함으로써 전체 네트워크 수명을 연장시킬 수 있는 새로운 방식을 제안하였다.

최근 제안된 HiPERMAC 프로토콜은 단일 주파

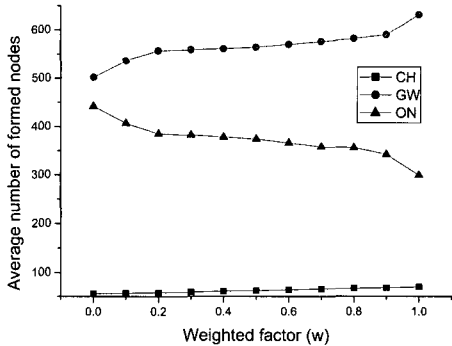


그림 16. 가중치에 따른 생성 노드 평균 개수

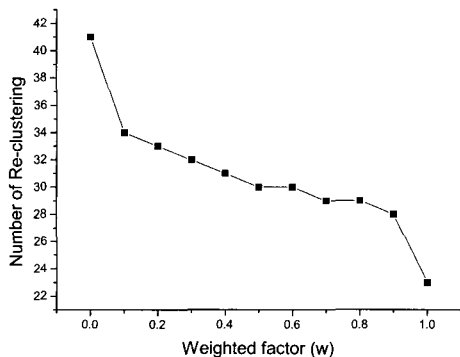


그림 17. 가중치에 따른 재클러스터링 평균 수행 횟수

수 채널을 사용하면서 계층구조 망의 구조를 갖는 대표적인 접근 방식으로서, 본 논문에서 제안된 기법들은 그 성능을 극대화 시킬 수 있는 최적화된 클러스터링 구조와 운용 형태로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 서창수, 고영배, "유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적 MAC 프로토콜", *Telecommunication review*, 15권 2호, pp. 323-336, 2005.

[2] M. Gerla and J. Tsai, "Multicluster mobile multimedia radio network," *ACM Baltzer Journal of Wireless Networks*, 1995.

[3] D.J. Baker and A. Ephremides, "The Architectural Organization of a Mobile Radio Network via a Distributed Algorithm," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 29, No. 11, 1981.

[4] D. Budhaditya, Sudeept Bhatnagar and Badri Nath, "A Topology Discovery Algorithm for Sensor Networks with Application to Network Management," *Technical Report DCS-TR-441, Department of Computer Science, Rutgers University*, 2001.

[5] B. Krishnamachari, "The impact of data aggregation in wireless sensor networks," *22th International Conference of Distributed Computing Systems Workshops*, 2002.

[6] K.S. Chang, C.G Kang, I.H Kim and Y.S Kim, "HiPERMAC: Hierarchically-Paired Evolutionary Radio MAC Protocol," *IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 2006.

[7] W.B. Heinzelman, A.P. Chandarkasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *Wireless. Comm, IEEE, Vol 1, No. 4, pp. 660-670*, 2002.

[8] Gupta G and Younis M, "Load-balancing clusters in wireless ad hoc networks," *Communi-*

cations, 2003 ICC' 03. IEEE International Conference on Volume 3, 11-15, 2003.

[9] Guangyu Pei and Chien C, "Low power TDMA in large wireless sensor networks," *Military Communications Conference, MILCOM*, 2001.

[10] Mao Ye, Chenfa Li Guihai Chen and Jie Wu, "An energy efficient clustering scheme in wireless sensor network," *Performance, Computing and Communications Conference, IPCC 2005, 24th IEEE International pp. 535-540*.

[11] Elizabeth M and Belding-Royer, "Multi-level hierarchies for scalable ad hoc routing," *Wireless Networks, Volume 9, Issue 5, September, 2003*.

최 지 영 (Ji-young Choi)

준회원



1997년 2월 전북대학교 전자공학
학과 졸업
2006년 2월 고려대학교 전자공학
학과 석사
2006년 3월~현재 LG-Nortel RND
(BCS)
<관심분야> ad-hoc, wireless

sensor network

강 충 구 (Chung-gu Kang)

종신회원



1987년 6월 Univ. of California
(San Diego), 전자공학과 졸업
1989년 12월 Univ. of California
(Irvine), 전자 및 컴퓨터공학과
박사
1992년 7월~1992년 5월 Aero-
space Corp. 연구원

1993년 4월~1994년 2월 Rockwell International 연구원
1994년 3월~현재 고려대학교 전기전자공학부 교수
<관심분야> 광대역 무선 전송 기술 및 매체접근 제어 프
로토콜 설계/구현, 시스템 모델링 및 성능 분석,
Wireless PAN/LAN/MAN, 4세대 이동통신