

제1회 정보통신표준화 우수논문집

02 장려상 / 일반부문

무선 센서 네트워크를 위한 이중 계층 진화적 매체접근제어(HiPERMAC) 및
네트워크 프로토콜 : Cross Layer 설계 방식 접근

Hierarchically-Paired Evolutionary Radio MAC (HiPERMAC) and Network Protocol for
Ubiquitous Wireless Sensor Network : Cross Layer Design Approach

김일환 / 고려대학교 전파공학과, 김용석 / 삼성종합기술원, 강충구 / 고려대학교 전파공학과
Il-Whan Kim, Chung-Gu Kang / Department of Radio Science & Engineering, Korea University,
Yongsuk Kim / i-networking Lab, Samsung Advanced Institute of Technology

I. 서론

II. WSN 설계를 위한 요구사항 분석

III. WSN을 위한 클러스터링 및 이중 계층 진화적 매체접근제어 (HiPERMAC) 프로토콜

IV. 성능분석

V. 결론

무선 센서 네트워크를 위한 이중 계층 진화적 매체접근제어 (HiPERMAC) 및 네트워크 프로토콜: Cross Layer 설계 방식 접근 Hierarchically-Paired Evolutionary Radio MAC (HiPERMAC) and Network Protocol for Ubiquitous Wireless Sensor Network: Cross Layer Design Approach

김일환 / 고려대학교 전파공학과, 김용석 / 삼성종합기술원, 강충구 / 고려대학교 전파공학과

Il-Whan Kim / Department of Radio Science & Engineering, Korea University,
Youngsuk Kim / i-networking Lab, Samsung Advanced Institute of Technology ,
Chung-Gu Kang / Department of Radio Science & Engineering, Korea University

요 약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 다양한 응용 환경과 상하향 스트림의 트래픽 특성에 따라 유연하게 적용할 수 있는계층간 상호 최적화를 고려한 통합 기반의 매체접근제어 및 네트워크 프로토콜을 제안한다. HiPERMAC (Hierarchically-Paired Evolutionary Radio MAC)이라고 불리는 제안 매체접근제어 프로토콜은 단일의 주파수 채널만을 가지고도 무선 센서 네트워크의 구성을 계층화 할 수 있으며, 이때 발생하는 상호 간섭의 요인들을 시간 및 공간적으로 분리하여 망 확장성과 자원 효율성을 극대화한다. HiPERMAC을 고려하여 설계된 네트워크 계층의 클러스터링 알고리즘은 매체접근제어 프로토콜의 전력 효율성을 극대화할 수 있도록 각 노드의 역할을 결정하고, 매체접근제어 계층에서는 별도의 대역 확산 전송방식이나 다수의 주파수 채널을 사용하지 않고 2개의 시간 구간을 공간적으로 재활용하여 N 계층의 개별적인 통신이 가능한 구조를 제공할 수 있다. 즉, 제안된 프로토콜은 단일 주파수 채널만을 사용하면서도 커버리지 확장에 있어 전력 효율성과 유연성 등과 같이 클러스터 기반의 계층적 망 구조가 갖는 장점을 그대로 유지할 수 있도록 cross layer 최적화 관점에서 설계된 방식이다. IEEE 802.15 계열 WPAN 표준 기술 및 각종 무선 센서 네트워크에서 고려된 기존 기술들은 특정 환경 및 응용 서비스에 따라 개별적으로 최적화된 반면, HiPERMAC은 어떠한 환경과 응용 서비스에 대해서도 자원의 효율성을 최적화할 수 있는 통합적인 구조를 제공함으로써 하나의 표준 규격으로 기존 서비스를 수용할 수 있을 뿐만 아니라 기존 표준 기술들이 제공할 수 없는 광범위한 환경에서 적용 가능한 표준으로서의 후보 기술이 될 수 있다.

I. 서론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network: WSN)는 원격 감시 시스템, 원격 진료 및 무인 탐사 등 다양한 응용을 위하여 특정 영역에서 발생하는 정보를 감지하여 수집하고, 이 정보를 무선 통신 기법을 통하여 사용자에게 전달하기 위하여 설계된 무선 네트워크이다

[1]. 따라서 WSN은 분산된 영역에 걸쳐 각종 데이터를 수집하고 이를 전송하는 센서 노드(sensor node)와, 각 센서 노드에서 전달받은 데이터를 기록 및 유지하고 특정 정보를 원하는 사용자에게 전달하는 기능을 담당하는 수집 노드(sink node)로 구성된다. 한편 WSN은 센싱의 정확성과 감지 영역의 확장성을 위해 대규모의 센서 노드들로 구성되는 것이 일반적이다. 따

라서, 대규모 네트워킹 환경에서 동적인 상황 변화에 적응할 수 있는 자가 구성 능력 및 노드들 간의 상호 협력적인 정보 전달 체계가 요구된다. 또한 다양한 종류의 센서들에 의해 탐지된 정보를 수집 노드로 전달하기 위한 무선 네트워킹 기술을 통해 응용 형태에 따라 전달 지연시간을 보장할 수 있어야 하며, 또한 배터리에 의해 동작하는 센서 노드의 수명을 유지하기 위한 전력 효율성이 확보되어야 한다. 따라서, WSN은 대규모 확장성을 갖고 에너지 효율성이 극대화된 다중 홉의 자율 구성 능력을 갖는 애드혹 네트워크(ad-hoc network)의 구체화된 형태로 볼 수 있다 [2].

다중 홉 애드혹 네트워크를 구성하기 위해서는 먼저 설계하려는 응용 환경 및 서비스의 특성에 적합한 네트워크 구조(topology)가 결정되어야 하며, 이에 적합한 경로 설정 방식 및 매체접근제어 방식이 고려되어야 한다. 다중 홉 애드혹 네트워크는 그 구조에 따라 크게 평면구조(flat topology) 망과 계층구조(hierarchical topology) 망으로 분류된다. 평면구조망에서는 모든 노드들이 라우터 역할을 수행하므로 각 노드들이 경로 설정 알고리즘에 의해 동적으로 선택된 다른 노드들을 경유하여 자신의 목적지까지 직/간접적인 통신이 가능해야 한다. 이를 위해 각 노드가 스스로 경로를 발견하는 기법인 테이블 기반(table-driven) 혹은 요구별(on-demand) 경로 설정 알고리즘들이 주로 사용되며, 매체 접근을 중앙에서 제어하는 주체가 네트워크 상에 별도로 존재하지 않으므로 CSMA-

CA (carrier sensing multiple access) 등의 경쟁 방식을 통하여 노드들 스스로 분산적인 방식을 통해 데이터 전송을 제어한다. 반면, 계층구조 망에서는 다수의 노드를 관장하는 대표 노드가 선출되고, 선출된 노드가 자신이 관장하는 노드의 ID 및 무선 자원을 할당하고 제어하는 역할을 담당한다. 대표 노드와 이에 의해 자원 할당이 제어되는 일반노드들의 집합을 클러스터(cluster)라고 정의한다. 네트워크 내의 모든 노드들에서 대표 노드들을 선택하고 클러스터를 구성하는 일련의 과정을 클러스터링(clustering)이라고 하며, 계층구조 망을 구성하기 위해서는 클러스터링이 선행되어야 한다. 클러스터링에서 선출된 대표 노드를 Cluster Header (CH)라하고, 이는 클러스터 내의 각 노드에게 ID를 부여하는 경로 설정의 주체가 된다. 또한, CH는 TDMA (time division multiple access) 기반 프레임을 관리하며, 각 노드로부터 TDMA 슬롯을 예약 및 할당하는 중앙 집중적인 스케줄링의 주체 기능을 수행한다. 최근 IEEE 802.15 등의 국제 표준 규격 및 일부 관련 연구들에서 제안된 WSN의 형태도 역시 앞에서 이와 같은 평면 구조망과 계층 구조망의 형태로 구분될 수 있으며, 각 기술들은 망 확장성 및 에너지 효율성을 높이기 위한 다양한 세부 요소 기술들을 포함하고 있다.

센서 노드에서 수집된 정보를 싱크 노드로 전달하는 과정에서 데이터 축약(data aggregation)이 수행되어야 하며, 이 과정에서 데이터 전달에 소모되는 각 노드의 전력 효율성을 극대

화할 수 있어야 한다. 이와 같은 측면을 고려할 때 평면구조 망보다는 계층구조 망이 적절하다. 이 경우에, 클러스터 헤드에서 데이터 결합을 수행할 수 있으며, 예약 기반의 스케줄링과 수면 주기의 제어 등을 통해 전력 효율성을 극대화할 수 있다. 즉, 주요 제어 및 처리 기능을 CH에 집중화함으로써 라우팅 및 매체접근제어를 효율적으로 수행할 수 있다. 그러나, 계층망 구조가 갖는 가장 큰 한계는 클러스터간의 상호 간섭 문제이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 다수의 주파수 채널 또는 코드 채널을 사용하는 것이 일반적이다. 즉, 클러스터 내의 통신은 동일 채널을 사용하지만 다른 클러스터간의 통신을 위해 다른 채널을 사용하는 것이다. 단일 채널만을 가지고 계층구조 망을 구성할 수 있는 방법은 경쟁 방식의 매체접근을 적용하는 것이나, 이 경우에는 전력 효율성이 저해된다. 본 논문에서는 하나의 주파수 채널만을 가지고 계층적 구조를 지원할 수 있는 새로운 매체접근제어 및 네트워크 프로토콜을 제안하며, 이 접근 방식이 갖는 주요 특징은 다음과 같다.

- 계층구조에서 발생하는 상호 간섭의 요인들을 시간 및 공간적으로 분할하여 망 확장성과 자원 효율성을 극대화
- TDMA 기반의 중앙 집중적인 자원 관리를 통한 전력 효율성의 극대화

HiPERMAC (Hierarchically - Paired Evolutionary Radio MAC)이라고 불리는 제안 매체접근제어 프로토콜은 단일의 주파수 채널

만을 가지고도 무선 센서 네트워크의 구성을 계층화를 할 수 있으며, 커버리지 확장에 있어 전력 효율성과 유연성 등과 같이 클러스터 기반의 계층적 망 구조가 갖는 장점을 그대로 유지할 수 있도록 cross layer 최적화 관점에서 설계된 방식이다. 단일의 주파수 채널만을 고려하는 이유는 WSN에서는 넓은 지역에 걸쳐 센서 노드들이 대규모로 배치될 수 있기 때문에 그 경제성을 고려할 때 저가의 라디오 장치로 구현이 가능해야 하기 때문이다. 현재 규격화가 되어 있는 IEEE 802.15 계열 WPAN 표준 기술에서도 이와 같은 단일의 주파수 채널을 전제로 하고 있으나, 특정 환경 및 응용 서비스에 적합한 형태로 최적화가 되어 있기 때문에 이와 다른 환경 및 응용 서비스의 출현시에는 새로운 규격의 표준화가 요구될 것이다. 반면, HiPERMAC은 어떠한 환경과 응용 서비스에 대해서도 자원의 효율성을 최적화할 수 있는 통합적인 구조를 제공함으로써 하나의 표준 규격으로 기존 서비스를 수용할 수 있을 뿐만 아니라 기존 표준 기술들이 제공할 수 없는 광범위한 환경에서 적용이 가능한 표준으로서의 후보 기술이 될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 현존하는 WSN 기술의 한계를 살펴보고, 설계 요구사항을 분석한다. III절에서는 네트워크 계층에서의 클러스터링 및 매체접근제어 계층에서의 HiPERMAC 프로토콜에 대해서 기술하고, IV절에서 제안된 프로토콜에 대한 성능 분석 결과를 제시한다. 마지막으로, V절에서 본 논문의 결론 및 향후 연구 방향을 언급한다.

II. WSN 설계를 위한 요구사항 분석

1. WSN의 구성 요소 및 특성

WSN은 수집 노드와 수많은 센서 노드로 구성된 다중 홉 애드혹 네트워크이다. 수집 노드(Sink Node:SN)는 자신이 관장하는 센서 네트워크 내의 각종 현상을 수집 및 관리하며, 외부 사용자가 특정 데이터를 요구할 경우 자신이 직접 전달을 하거나 혹은, 센서 필드에게 특정 데이터를 요청할 수 있는 기능이 요구된다. 즉, 수집 노드는 센서 네트워크의 동작을 총괄하는 주체로서 사용자와 유/무선 연결 기능을 지원하며, AC에 의해 전력이 공급되는 것이 일반적이다. 한편, 센서 노드들은 일정한 영역에서 발생하는 목표 현상을 감지하고 그 결과를 주기 및 비주기적으로 수집 노드에게 전달하는 역할을 담당하며, 필요시 수집 노드에 의해 요청된 문의(query)를 수용할 수 있어야 한다. 또한 센서 노드들은 일반적으로 소형 배터리에 제한적인 전력이 공급되므로 한번 배치된 노드의 수명을 극대화하기 위해서는 모든 통신 프로토콜이 에너지 효율성을 극대화할 수 있도록 설계되어야 한다.

센서 네트워크의 상향 스트림은 일반 센서 노드에서 감지한 데이터를 수집 노드로 보고하기 위한 데이터의 흐름이다. 한편, 하향 스트림은 수집 노드에서 센서 노드들에게 특정 데이터의 수집을 요청하는 query 정보의 흐름에 해당한다. 따라서 하향 스트림의 트래픽은 방송형

(broadcast) 특징을 가지며, 이때 하나의 버스트(burst)로 한꺼번에 모아서 전송하는 것이 효율적이다. 반면 상향 스트림은 각종 센서 노드들이 주기적 혹은 비주기적으로 자신이 감지한 데이터 또는 수집 노드로부터 요청받은 데이터의 전송을 수행한다. 따라서 대부분의 트래픽들은 상향 스트림에 집중된다. 한편 센서 네트워크의 특성상, 상향 스트림의 트래픽은 시/공간적인 상관관계가 매우 높다. 따라서 이들 트래픽을 효율적으로 축약(data aggregation)하는 절차가 요구되며, 이러한 절차는 데이터 전송의 신뢰성을 확보하기 위해서 특정 대표 노드가 일률적으로 수행하는 것이 바람직하다.

2. 기존 센서 네트워크 구조 분석

2-1 평면구조(flat topology) 망

평면구조 망은 주로 점-대-점 통신을 근간으로 하며, 이를 위해 실제 데이터 통신 직전에 상호 제어 메시지의 교환을 통해 경로를 설정해야 한다. 따라서 평면구조 망에서는 모든 통신 주체들이 하나의 주파수 채널을 공유하고 CSMA/CA와 같은 경쟁기반 매체접근제어 방식을 통하여 점-대-점 통신을 분산적으로 수행한다. 따라서 대규모 센서 네트워크를 구성하기 위해 망 확장성이 요구될 경우에도 경로설정이 이루어지기만 하면 망의 규모와 상관없이 경쟁 방식에 의해 분산적으로 매체접근이 수행되는 장점을 갖는다. 평면구조의 WSN을 고려한 대표적인 접근 방식으로 Directed diffusion [3]과

S-MAC [4]을 들 수 있다.

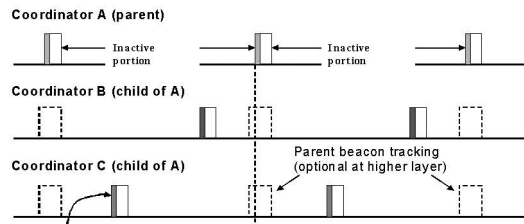
평면구조 망의 통신 프로토콜들은 통신 주체들이 모두 상호 listen 상태일 때에만 제어 패킷의 교환이 가능하며, 궁극적으로 통신이 이루어질 수 있다. 따라서 자신이 전송할 데이터가 없는 경우에도 타 노드가 자신에게 데이터를 보낼 경우를 대비하여, 일정한 시간 동안 listen 상태를 지속해야 한다. 예를 들어, S-MAC에서도 주기적인 listen/sleep 상태 전이를 기본통신 방식으로 채택하고 있다. 따라서 이와 같은 주기적인 listen 상태의 유지로 인해 불필요한 에너지 소모가 필연적으로 발생하는 한계점을 갖는다.

2-2 계층구조(hierarchical topology) 망

계층구조 망에서는 하나의 클러스터¹⁾을 관리하는 대표 노드인 클러스터 헤드(Cluster Header)²⁾가 선출되고, 이를 통해 TDMA 프레임에서의 동적인 자원 예약 및 할당 방식을 수행한다. 각 센서 노드가 특정 프레임에서 자신에게 할당된 TDMA 슬롯에서만 데이터를 송/수신하고, 그 외의 시간동안에는 수면상태로 머물게 함으로써 에너지 효율성을 극대화 하는 장점을 갖는다. 계층구조의 WSN을 고려한 대표적인 프로토콜로서 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)를 들 수 있으며[4], 또한 IEEE 802.15.4 Low-Rate WPAN 규격도 이러한 구조를 채택하고 있다[5] [6] [7].

계층구조 망에서는 인접 클러스터간의 물리

적인 전송 신호 간섭을 회피하기 위하여, 클러스터별로 통신 자원이 독립적으로 할당되어야 한다. 그 예로서, IEEE 802.15.4 규격에서는 (그림 2-1)과 같이 인접 피코넷의 수면주기를 자신의 통신 구간으로 사용하는 방법을 사용하며, LEACH에서는 서로 다른 주파수 채널을 사용하는 것을 고려한다. 따라서 계층구조 망에서 망의 확장성은 독립된 자원(주파수, 코드, 시간)에 의해 제한되는 단점이 있다. 예를 들어, 하나의 주파수 채널을 가지고 계층 구조망을 구현할 경우에는 클러스터간의 상호 간섭으로 인해 망의 확장이 어려워지며, 이때 시분할을 통해 클러스터간의 상호간섭을 완화하고자 할 때는 대역 효율성이 심각하게 저해될 수 있다.



(그림 2-1) IEEE 802.15.4 계열의 슈퍼 프레임 구조
(다중 피코넷)

3. WSN의 설계 고려사항

앞 소절에서 살펴본 바와 같이 WSN에서는 무엇보다도 각 센서 노드들의 수명을 극대화하기 위한 에너지 효율성이 최우선적으로 고려되

1) IEEE 802.15 규격에서는 클러스터를 피코넷(piconet)이라고 지칭하고 있음

2) IEEE 802.15 규격에서는 이를 piconet coordinator (PNC)라고 지칭하고 있음

어야 한다. 따라서, 평면구조 망에 내재되어 있는 에너지 비효율성과는 달리 계층구조 망에서는 각 클러스터 내에서 TDMA 기반의 중앙 집중적인 자원 할당이 수행되고 경로설정이 단순화되므로 에너지 효율성이 극대화될 수 있다.

또한, 단일의 주파수 채널로 상향과 하향 스트림을 동시에 지원하기 위해 TDD (Time Division Duplexing)을 적용한다. 이때 인접 클러스터간의 상호 간섭에 대응하기 위한 방안이 고려되어야 하며, 클러스터간 시분할을 적용할 경우에는 적절한 자원 배분이 이루어질 수 있는 매체접근제어 프로토콜의 유연성이 확보되어야 한다.

한편, 계층구조 망을 구성하는 클러스터링 과정에서 선출된 클러스터 헤더와 게이트웨이 노드들에 많은 처리 기능이 집중되는 점이 고려되어야 한다. 노드들의 이동성이 존재하거나 또는 노드들의 수명이 다하여 네트워크 토폴로지가 빈번하게 변할 수 있으며, 이때마다 클러스터링이 수행되어 새로운 클러스터 헤더와 게이트웨이 노드들이 선출되게 된다.

따라서, 전체 네트워크의 수명을 극대화하기 위해서는 주어진 토폴로지에서 선출되는 클러스터 헤더와 게이트웨이 노드의 수를 최소화할 수 있어야 한다. 또한, 단일 주파수 채널을 사용하는 경우에 필연적으로 발생하는 상호간 은닉 단말 문제(hidden terminal problem)를 해결해야 한다. 이와 같은 요구사항은 네트워크 계층의 클러스터링 알고리즘 설계 과정에서 반영되어야 한다.

III. WSN을 위한 클러스터링 및 이중 계층 진화적 매체접근제어 (HiPERMAC) 프로토콜

본 절에서는 WSN의 다양한 응용 환경과 상하향 스트림의 트래픽 특성에 따라 유연하게 적용할 수 있는 계층간 상호 최적화를 고려한 통합 기반의 매체접근제어 및 네트워크 프로토콜을 제시한다. 이는 2개의 연속된 계층을 묶어서 각각 TDMA 기반의 예약 방식과 CSMA-CA 기반의 경쟁 방식을 적용함으로써 단일 주파수 채널로도 인접 클러스터간에 상호 간섭이 발생하지 않도록 계층 구조를 구성할 수 있으며 트래픽 부하에 따라 시분할을 통해 예약 방식과 경쟁 방식 구간을 제어하는 방식으로, 이중 계층 진화적 매체접근제어 (Hierarchically-Paired Evolutionary Radio MAC: HiPERMAC) 이라고 명명한다.

또한, 제안된 HiPERMAC 프로토콜 구조에 적합한 새로운 형태의 클러스터링 기법을 제안한다. 제안된 클러스터링 기법은 CH와 GW의 개수를 최소화함으로써 노드들의 불필요한 전력 소모를 줄이고, HiPERMAC 프로토콜은 이를 통해 형성된 망 구조에서 발생하는 통신 시나리오를 포괄적으로 지원하면서 동시에 에너지 효율성을 극대화하게 된다. 즉, 제안된 클러스터링 기법과 HiPERMAC은 계층구조 망에서의 에너지 효율성을 극대화하기 위해 네트워크 계층 및 매체접근제어 계층간 최적의 상호 결합을 통해 설계된 것이다.

1. 네트워크 계층 : 클러스터링 알고리즘

1-1 클러스터링 알고리즘의 설계 개념

(그림 3-1) (a)는 계층구조 망을 예시한 것으로서, 여기서 보는 바와 같이 각 클러스터 내의 센서 노드들은 Cluster Head (CH), Gateway (GW), 그리고 2가지 유형(Type-1 및 Type-2)의 일반 센서 노드로 구분된다.

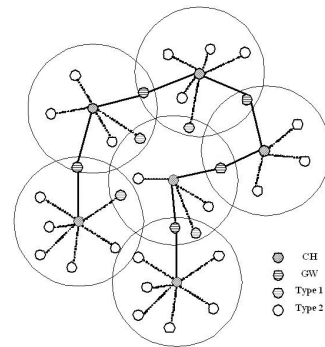
CH는 특정 클러스터 내부의 모든 노드 (GW, Type-1, Type-2)의 주소를 관리하고 해당 계층을 대표하는 노드이다.

한편 2개 이상의 CH로부터 방송형 제어 정보를 동시에 수신할 수 있는 영역(즉, 2개의 클러스터가 겹치는 영역)에 위치한 노드들 중에서 CH간의 통신을 중계하기 위해 선출된 노드를 GW 노드로 정의한다.

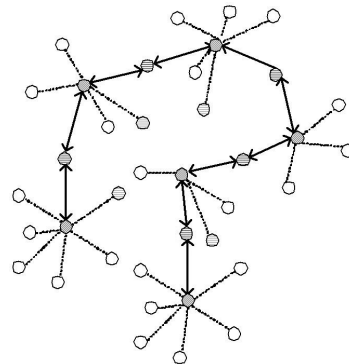
그리고, 이 GW 노드를 제외하고, 중첩 영역에 있는 노드들을 Type-1 노드라고 정의한다. 각 클러스터에서 CH, GW, 그리고 Type-1 노드들을 제외한 나머지 노드들을 Type-2 노드라고 분류한다. Type-1 및 Type-2 노드들은 단순히 자신이 소속된 클러스터의 CH와 통신을 수행하므로 수집 노드(sink node)까지 도달하기 위한 어떠한 경로에도 참여하지 않는다.

반면 CH는 수집 노드와 각 계층간의 통신을 위한 경로상에서 각 계층별 거점 노드 역할을 수행하고, GW들은 각 거점들을 서로 연결하는 기능을 수행한다. 따라서 CH와 GW는 Type-1 및 Type-2 노드에 비해 에너지 소모량이 매우 크다. 네트워크 토폴로지가 변할 때마다 클러스

터링 과정이 재수행되고, 그 과정에서 임의의 노드가 CH 또는 GW 노드로 선출될 수 있다. 따라서, 네트워크의 수명을 극대화하기 위해서는



(a) 계층구조



(b) 경로설정의 예

(그림 3-1) 제안 방식의 네트워크 구조 및 경로

전체 네트워크를 구성하는 CH와 GW의 수를 최소화해야 한다. 한편 서로 인접한 클러스터에서 Type-1 노드와 CH 노드간의 통신이 동시에 진행될 경우 이들 통신 쌍들은 상호간 은닉 단말 문제(hidden node problem)를 겪게 된다.

이는 단일 주파수 채널을 사용하는 경우에 발

생하는 전형적인 문제이다. 따라서, 이와 같은 은닉 단말 문제를 완화하고 CH와 GW 노드의 수를 최소화하기 위해서는 클러스터링 과정에서 CH와 GW 노드간의 거리를 최대화해야 한다. 즉, CH와 GW의 거리가 최대화되면서 CH간 겹치는 통신 영역이 최소화될 수 있다.

이때, Type-1 노드의 개수가 최소화될 수 있고, 은닉 단말을 발생하는 통신쌍의 수를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 설계 관점을 구현할 수 있는 Neighbor Node Discovery (NND) 알고리즘을 제안하며, 다음 소절에서 상세히 기술한다.

1-2 Neighbor Node Discovery (NND) 알고리즘

클러스터링이 수행되는 초기 시점에는 수집 노드를 제외한 모든 노드들을 IN (initial node)로 지정하며, 이 노드들은 클러스터링 과정을 통해 CH, ON (ordinary node), GW 등으로 지정된다.

여기서 ON는 Type-1 및 Type-2 노드를 통칭한다. 본 논문에서 제안하는 클러스터링 방식은 노드간의 상호 응답 과정을 통해 주변 노드들을 발견하는 방식으로, 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 IN 집합에 있는 모든 노드들이 CH, GW 또는 ON으로 지정될 때까지 반복된다.

• 초기 클러스터 설정 단계

수집 노드에 의해 임의의 한 개 노드가 CH로 지정되고, 이는 (그림 3-2)에서 보는 바와 같이 Advertisement 메시지를 방송함으로써 클러스터링 과정을 시작한다. Advertisement 메시지를 수신한 IN들은 CH에게 자신의 존재를 알리고 해당 CH의 멤버로 등록하기 위하여 Joining request 메시지를 CH에서 송신한다. CH는 수신된 해당 노드들의 ID 정보를 저장하고 클러스터의 구성원으로 등록하고 beacon 신호를 방송 형태로 전송함으로써 해당 노드들을 ON로 지정한다.

• Gateway 선정 단계

GW는 CH와 상대적으로 가장 거리가 먼 거리에 있는 ON가 선정되어야 한다. 따라서 CH와 가장 먼 거리에 있는 ON의 주변에 IN이 가장 많이 존재하는 사실에 입각하여 각 ON들 중 전송 반경 범위 내에서 가장 많은 IN의 개수를 포함하는 ON을 GW로 선정한다. 이 과정을 보다 상세히 살펴보면 다음과 같다.

우선 CH는 GW_ELECTION_START 메시지를 방송한다. 이를 수신한 ON은 각자의 전송 반경 내에 있는 IN들의 개수를 세기 위하여 노드 ON은 IN_COUNT_REQ 메시지를 방송한다. 이 메시지를 수신한 IN은 IN_COUNT_ACK 메시지를 노드 A 및 B에게 각각 전송한다. 이때 다수의 ON으로부터 IN_COUNT_REQ 메시지를 수신한 경우에도 해당 IN은 IN_COUNT_ACK 메시지를 1회만 전송한다. 두 ON들은 IN들로부터

터 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 선정한다. 수신된 IN_COUNT_REPORT 메시지 값이 모두 0이면 (ON 주변에 IN이 없는 경우) CH는 GW를 선정하지 않고 NND 알고리즘을 종료하고, 1개 이상의 메시지 값이 0보다 크면 Cluster head 선정 단계로 넘어간다. (그림 3-3)의 예제에서는 노드 A가 전송 반경 범위에 3개의 IN을 포함하고, 노드 B는 2개의 IN을 포함하게 되므로 노드 A가 GW로 선정되는 것을 예시하고 있다.

• Cluster head 선정 단계

GW와 상대적으로 가장 먼 거리에 있는 IN을 인접 클러스터의 CH로 선정해야 한다. 따라서 GW 선정 과정과 동일하게, GW와 거리가 가장 먼 IN이 주변의 ON을 가장 적게 포함하게 된다는 일반적인 사실을 이용하여 각 IN들은 전송 반경 범위 내에 있는 ON의 개수를 세어 GW에게 보고하고, GW는 그 중에서 가장 적은 ON 개수를 포함하는 IN을 이웃 클러스터의 CH로 선정하는 방식을 따른다.

자세한 절차는 다음과 같다.

(그림 3-4)에서 보는 바와 같이 노드 A는 전송 반경 범위에 3개의 ON을 포함하고, 노드 B는 2개의 ON을 포함하게 되므로 노드 B가 인접 클러스터의 CH로 선정되게 된다. GW는

CH_ELECTION_START 메시지를 방송한다. 메시지를 수신한 IN은 다음과 같이 각자의 전송 반경 내에 있는 ON들의 개수를 센다. 각 IN은 ON_COUNT_REQ 메시지를 방송한다.

이 메시지를 수신한 ON은 ON_COUNT_ACK 메시지를 IN에 전송한다(다수의 IN으로부터 ON_COUNT_REQ 메시지를 수신한 경우에도 해당 ON은 ON_COUNT_ACK 메시지를 1회만 전송). 각 IN은 ON들로부터 수신한 ACK 개수를 세어 ON_COUNT_REPORT 메시지를 통해 GW에게 보고한다.

GW는 수신된 메시지를 비교하여 가장 적은 수의 ON을 포함하고 있는 IN을 주변 클러스터의 CH로 선출하며, 가장 적은 수의 IN을 포함하고 있는 IN이 2개 이상일 때는 ID가 낮은 IN을 CH로 선출한다.

ON_COUNT_REPORT 메시지를 송신한 IN이 없을 때(GW 주변에 IN이 없는 경우) GW는 CH를 선정하지 않고 알고리즘을 종료하고, 1개 이상의 IN으로부터 메시지를 수신하면 인접 클러스터의 CH를 선정한 후 다음 Gateway 선정 단계로 넘어간다. 새로 선출된 CH(C)는 IN에게 Advertisement 메시지를 브로드캐스트 하고 이를 수신한 IN은 CH에게 Joining request 메시지를 송신한다. CH는 수신된 해당 IN의 ID 정보를 저장하고 클러스터의 구성원으로 등록한다. CH는 전송 반경 내의 IN에게 beacon 신호를 브로드캐스트 하고 이를 수신한 IN(D)은 ON으로 변경되고, 2개 이상의 CH로부터 beacon신호를 수신한 ON(E)은 GW로 상태가 천이된다.

• Gateway 재선정 단계

이는 클러스터링 과정을 여러 방향으로 확산시키고 병렬적인 클러스터링 과정을 통해 전체 네트워크 상의 클러스터링 소요 시간을 줄이기 위한 과정이다. (그림 3-5)에서 보는 바와 같이 인접 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 과정을 수행한다.

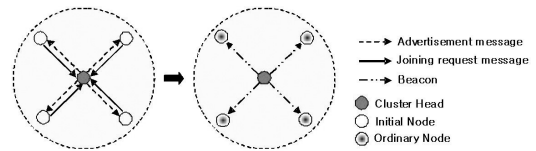
1-3 Slave/Master Patching(SMP) 기법

제안하는 NND 알고리즘을 포함한 대부분의 클러스터링 방식들은 (그림 3-6)과 같이 ON을 포함하지 않거나 소수의 ON을 포함하는 CH의 생성으로 인하여 GW 개수가 급속히 증가하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 불필요한 GW 생성을 억제하기 위해 Slave/Master Patching(SMP) 기법을 제안한다. SMP는 NND 알고리즘의 cluster head 선정 단계에서 GW 전송 반경 내의 IN 개수 (수신된 ON_COUNT_REPORT 메시지 개수)가 미리 설정해 놓은 election threshold N 이하이면 GW가 IN 중에서 CH를 선정하지 않고($N = 0, 1, 2, \dots$), (그림 4-5)과 같이 IN 상태로 남겨두게 하여 GW 개수가 불필요하게 급증하는 증가 문제를 완화시킬 수 있다. 여기서 GW는 IN의 Master Node(MN)이 되고 IN은 GW의 Slave Node(SN)로 지정되며, MN은 SN의 자원 할당이나 트래픽 등을 제어하게 된다.

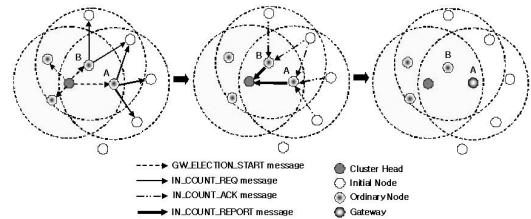
2. 매체접근제어 계층: HiPERMAC 프로토콜

2-1. 매체접근제어 프로콜의 설계 개요

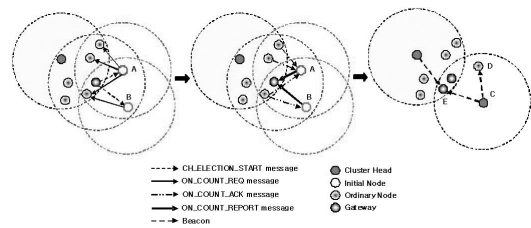
(그림 3-7)은 NND 알고리즘에서 의해 클러스터링된 계층구조 망에서의 통신 형태를 예시한 것으로서, 크게 intra-cluster 통신과 inter-cluster 통신 형태로 구분된다.



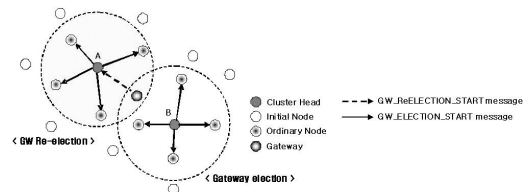
(그림 3-2) 초기 클러스터 설정 과정



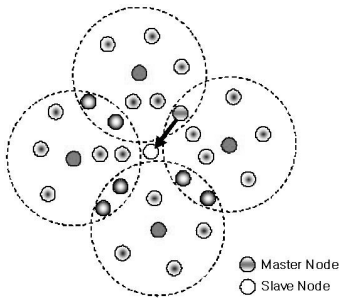
(그림 3-3) Gateway 선정 과정



(그림 3-4) Cluster head 선정 과정



(그림 3-5) Gateway 재선정 과정



(그림 3-6) Slave/Master Patching 기법 예시

Intra-cluster 통신은 개별 클러스터 내에서 CH와 Type-2 노드간의 통신으로서, 여기서 Type-2 노드들은 공간적인 분리에 의해 인접 클러스터의 Type-2 노드에게 서로 간섭을 미치지 않고 각 클러스터별로 독립적인 통신이 이루어진다.

즉, 이는 인접 클러스터간의 공간적인 분리에 의해 상호 간섭을 미치지 않고 주파수가 재사용되는 구조이다.

한편 (그림 3-7)의 inter-cluster 통신은 CH, Type-1 노드, GW간의 통신 형태로서(그림 3-1의 경로 참조), 인접 클러스터간의 상호 접속을 통해 수집 노드와 각 계층을 연결하는 백본(backbone) 망 기능을 수행하므로 계층의 수에 관계없이 빠른 속도로 정보 전송이 요구된다. 한편, 인접 클러스터간에 중첩된 영역에 속하는 Type-1 노드와 CH간의 통신도 inter-cluster 통신으로 간주하고 있는 점에 유의해야 한다. Intra-cluster 통신의 경우에는 각 클러스터별로 CH에 의해 개별적인 동적 자원 할당이 가능하므로 전력 효율성을 극대화할 수 있는 TDMA 방식이 적절하다.

반면, inter-cluster 통신의 경우에는 별도의 중앙집중적인 관리 주체가 존재하지 않기 때문에 CH, Type-1 노드, GW들간에는 분산적인 매체접근제어만이 가능하다.

따라서, 단일의 주파수 채널을 이용하여 intra-cluster 및 inter-cluster 통신을 동시에 지원하기 위해 하나의 TDMA 프레임을 2개의 시간 구간으로 구분한다. Intra-cluster 통신의 경우에는 클러스터간에 완전한 공간적 주파수 재사용이 가능하므로 각 클러스터의 CH가 해당 구간에서의 동적 자원할당을 수행하는 중앙집중식 동적 TDMA 방식을 적용하여 에너지 효율성을 극대화할 수 있다.

한편, inter-cluster 통신의 경우에는 노드의 배치 특성상 은닉 단말 문제가 존재하므로 RTS/CTS handshaking 기반의 CSMA-CA 프로토콜을 이용하여 단일채널을 통한 계층간 통로를 제공할 수 있다. NND 알고리즘은 이와 같은 제2 시나리오에 연루되는 노드의 수를 최소화하고 제1시나리오에 연루된 노드의 수를 최대화 하도록 설계되었기 때문에 경쟁 방식에 발생하는 비효율성을 낮출 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안하는 HiPERMAC 프로토콜은 intra-cluster 및 inter-cluster 통신이 2개의 계층에 걸쳐 연속적으로 묶여 적용되며 (hierarchical-paired), 경쟁 구간에 발생하는 트래픽의 부하에 따라 필요시에는 하나의 프레임을 다수 개의 구간으로 분리하여 다 계층간에 걸쳐 동일한 개념을 확장할 수 있는(evolutionary) 무선 매체접근제어 프로토콜이다.

2-2. HiPERMAC 프로토콜의 구조

가. 프레임 구조

HiPERMAC 프로토콜의 프레임은 intra-cluster 및 inter-cluster 통신을 위한 2개의 구간으로 시분할되며, (그림 3-8)에서 보는 바와 같이 이를 각각 데이터 전송 구간(data transmission period: DTP)과 데이터 중계 구간(data relay period: DRP)라고 부른다. DTP 구간에는 하향 스트림 데이터(예를 들어, query 메시지)와 더불어 비콘 메시지를 전송하는 비콘 전송 구간(beacon transmission period: BTP)이 설정되어 있으며, 상향 스트림 통신을 위하여 CH가 각 노드에 대한 TDMA 슬롯 할당을 제어하는 TDMA 구간(TDMA Period: TP)을 설정한다. 한편, inter-cluster 통신을 위한 DRP 구간에서는 비콘 메시지를 하위 계층으로 전달하기 위한 비콘 중계 구간(beacon relay period: BRP)이 설정되며, 상향 스트림 통신은 RTS/CTS 패킷 교환을 근간으로 한 CSMA-CA 방식으로 통신이 이루어지는 CSMA-CA 구간(CSMA-CA Period: CP)을 설정한다. 클러스터링 과정에서 정의된 Type-1 및 Type-2 노드는 각각 CP 및 TP 구간에서 통신이 이루어지므로 HiPERMAC 프로토콜에서는 편의상 이들을 각각 CSMA 노드(CN) 및 TDMA 노드(TN)라고 재정의한다.

나. HiPERMAC 프로토콜의 통신 구조: 예제
(그림 3-9)은 HiPERMAC 프로토콜에서 망의 구성에 따른 통신 구조를 살펴보기 위한 예

제를 보여준다. 클러스터링 알고리즘에 의해 (그림 3-9) (a)와 같이 물리적 공간상에서 각 노드들의 역할이 지정된다. 여기서 각 클러스터는 하나의 계층을 구성하고, 이는 (그림 3-9) (b)에서 보는 바와 같이, TP 구간에서 intra-cluster 통신을 수행하는 CH와 TN 노드로 구성되는 제1 부계층과 CP 구간에서 inter-cluster 통신을 수행하는 GW 및 CN 노드로 구성되는 제2 부계층으로 논리적인 구분이 이루어진다. 제1 계층에 있는 즉, (그림 3-9) (a)와 같이 클러스터링된 노드들은 데이터 전달 경로 순서에 따라 클러스터의 레벨이 정해지며, 각 레벨의 클러스터를 다시 논리적으로 부계층화한다. 각 레벨의 제1 부계층에서는 상호 간섭 없이 독립적으로 intra-cluster 통신이 수행된다. 한편, 각 레벨의 제2 부계층에서는 CSMA/CA 방식으로 inter-cluster 통신이 수행되며, 이때 클러스터 간의 통신 경로는 계층적 구조에 따라 미리 정해진 레벨 순서대로 설정된다. 이 경로에 따라 각 클러스터에서 2개의 다른 부계층에 걸쳐 intra-cluster 통신과 inter-cluster 통신이 수행되는 이중화 계층(hierarchically paired) 구조를 가진다. (그림 3-9) (b)의 레벨 1, 레벨 2, 그리고 레벨 3에 속하는 클러스터의 TN들은 동시에 해당 클러스터의 CH와 통신이 가능하다. 한편, 계층 구조상에서 미리 정해진 레벨에 의해 결정된 경로에 따라 서로 하위와 상위 레벨에 속하는 클러스터의 CH간 통신은 CP 구간에서 수행된다. 결국 HiPERMAC은 각 논리적 계층을 노드의 공간 배치에 따라서 이분화 하고, 접

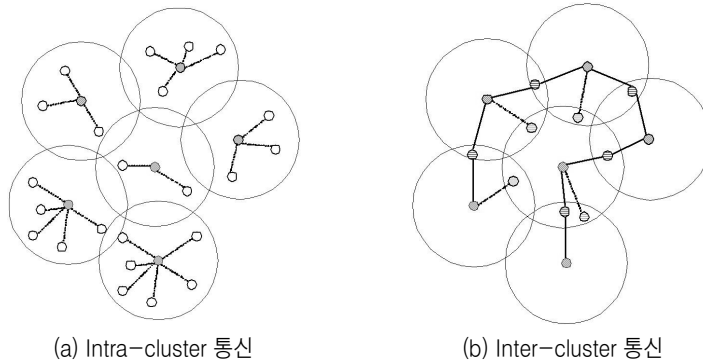
속 특성에 따라 각각 TDMA와 CSMA-CA 방식을 적용함으로써 주파수 재사용도 1을 실현하고 에너지 효율성을 극대화할 수 있는 매체접근 제어 프로토콜이다.

다. 채널 액세스 방식

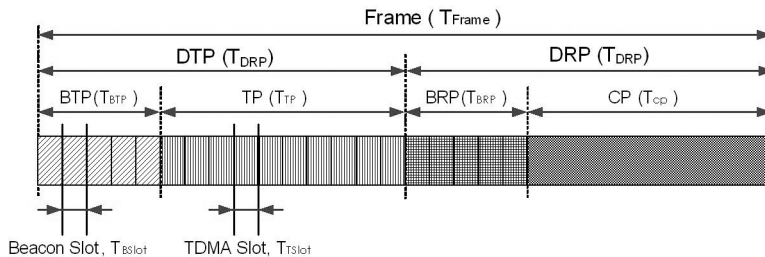
• DTP 구간에서의 채널 액세스 방식

DTP 구간에서 각 CH는 수집 노드(SN)로부터 전달되는 데이터 요청 메시지를 자신의 클러스터 내에 속한 노드들에게 전파해야 한다. 이에 CH는 이를 비콘(beacon) 메시지에 포함시킨다. 한편 CH는 해당 클러스터의 TDMA 슬롯을 TN

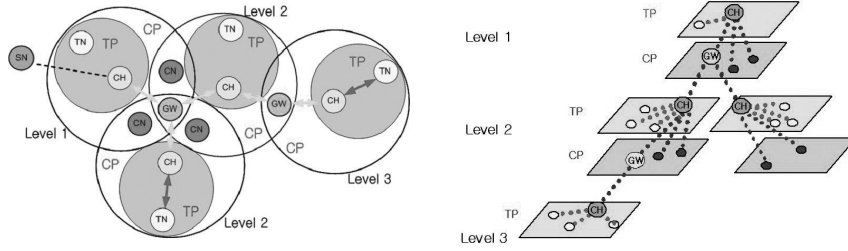
들에게 동적으로 할당하는 역할을 담당하다. 클러스터링 과정을 통해 CH는 자신이 관장하는 클러스터 내 모든 TN들의 ID를 알고 있다고 가정한다. 각 TN에 대해 TP 구간의 슬롯 할당 정보를 비콘 메시지에 기록한다. 즉, CH는 BTP 구간에서 비콘을 통하여 하향 스트림 제어 정보 및 슬롯 할당 정보를 자신의 클러스터에 속한 TN들에게 전송한다. 한편 TN들은 BTP 구간에서 전송되는 슬롯 할당 정보를 확인한 후, 자신에게 할당된 시간 슬롯을 통해 데이터를 전송한다. 만일에 보낼 데이터가 없거나 또는 시간 슬롯을 할당 받지 못한 경우에는 수면 상태로 천이한다.



(그림 3-7) HiPERMAC을 고려한 계층구조 망에서의 통신 형태



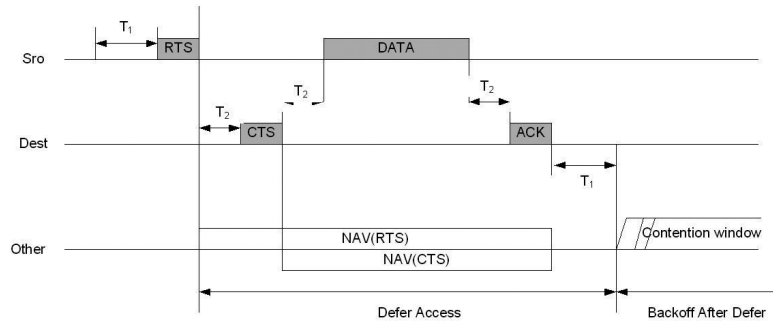
(그림 3-8) HiPERMAC 프로토콜에서의 프레임 구조



(a) 물리적 공간상의 통신 구조

(b) 논리적 계층상의 통신 구조

(그림 3-9) HiPERMAC 프로토콜에서의 통신 구조: 예시



(그림 3-10) RTS/CTS/data/ACK와 NAV설정

• DRP 구간에서의 채널 액세스 방식

DRP 구간에서는 CSMA-CA 방식으로 동작하므로 반송파 센싱 과정에서 필요한 backoff time을 설정해야 한다. T1 시간동안 채널이 유힘하게 되면 CH, GW 및 CN는 random backoff time을 선택하며, 그 중에서 가장 짧은 random backoff time을 생성한 노드가 제일 먼저 매체 접근을 시도한다. 이때 해당 노드는 RTS (Ready To Send) 프레임을 전송한다. RTS 프레임에는 데이터를 전송하고자 하는 출발지 (source) STA의 주소와 NAV 설정에 사용되는 duration field가 포함된다. RTS 프레임을 수신한 노드들 중에서 목적지 노드는 RTS 프레임에

대한 ACK으로서 T2 시간 이후 CTS (clear-to-send) 프레임을 전송한다. 그리고, 나머지 노드들은 자신의 NAV를 RTS 프레임에 포함된 duration field의 값으로 설정한 뒤, NAV를 줄여나가면서 매체접근을 연기한다. RTS/CTS 프레임의 전송이 끝나면, 송신 노드는 데이터 전송을 시작하게 되고 수신 노드는 ACK 프레임을 전송한다. 모든 프레임에는 duration field가 포함되어 있고, STA들은 현재 NAV보다 더 큰 duration field를 수신할 경우에만 NAV를 갱신한다. NAV가 0이 되면, STA들은 매체가 유힘 상태라고 판단하면서 다시 DIFS (inter-frame space)동안 기다린 뒤 자신의 backoff time을

줄여나가면서 매체접근을 시도한다. (그림 3-10)에서 이 과정을 예시하고 있다.

라. 비콘 스케줄링

HIPERMAC 프로토콜에서는 CH와 GW에서 전송되는 비콘을 통해서 사용자의 데이터 요청 정보(query) 및 네트워크 정보를 각 센서 노드들에게 전달한다. 이때 CH와 GW가 전송하는 비콘 신호간의 충돌이 발생한다. 비콘은 방송형 신호이므로 RTS/CTS handshaking과 CSMA-CA 방식으로 그들간의 충돌 문제를 해결할 수 없다. 따라서, CH와 GW이 전송하는 비콘간의 충돌 현상을 근본적으로 차단하기 위한 비콘 스케줄링 기법이 요구된다.

이와 같은 기법은 제안된 NND 기법에 비콘 스케줄링을 위한 정보를 추가함으로써 가능하며, (그림 11)은 제안 스케줄링 기법의 동작을 예시한 것이다. 클러스터링 과정의 initial cluster set-up 단계에서 CH로 선출된 노드 A는 BTP 구간의 첫번째 슬롯에서 비콘을 전송한다. 한편 Gateway 선정 단계에서 노드 B가 GW로 선출된 후, (그림 3-11)(a)에서와 같이 노드 C가 CH로 선출된 경우, GW로 선출된 노드 B는 등록절차 과정에서 joining message를 통하여 노드 C에게 인접 클러스터의 CH인 노드 A가 첫 번째 비콘 슬롯을 사용하고 있다는 정보를 전송함으로써 노드 C는 그 슬롯을 피해 다음 비콘 슬롯을 사용할 수 있게 된다. (그림 3-11)(b)에서는 노드 D가 GW로 선정된 후에 인접 클러스터에서 노드 E가 CH로 선출되는 경우를 보여준다. 이때, 중

첩된 영역의 ON 및 GW인 노드 F와 노드 D가 등록과정을 통해 각각 CH 노드 A와 C의 비콘 정보를 전송함으로써 노드 E는 순차적으로 충돌 없는 세 번째 비콘 슬롯의 결정이 가능하다.

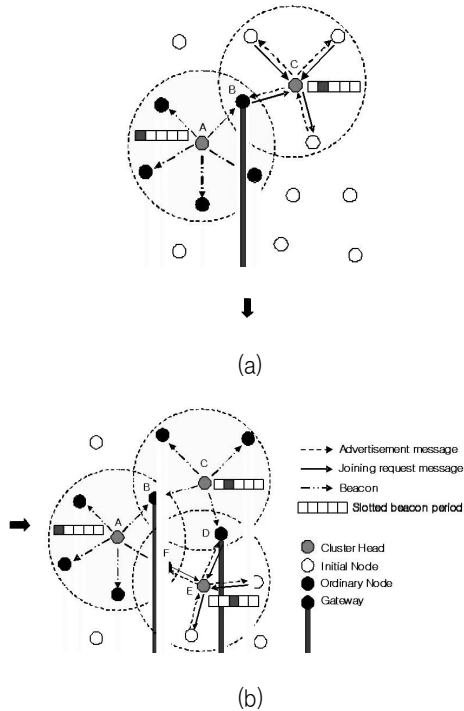
마. 노드별 수면주기

HIPERMAC 프로토콜에서 DTP 및 DRP가 순차적으로 활성화 된다. TN은 DTP 구간 내의 BTP 구간을 통하여 하향 스트림을 수신하고, TP 구간중 자신에게 할당된 시간 슬롯을 통해 상향 스트림 통신을 수행하므로, 그 외의 모든 구간에서는 수면 상태로 전환한다. CN 역시 BRP에서 하향 스트림을 수신하고, 자신이 데이터를 보낼 필요가 있을 때 CP중 일부 구간에서만 통신을 하기 위하여 활성(active) 상태를 유지하며, 그 외의 경우에는 모두 수면(sleep) 상태를 유지한다. 한편 GW들은 DRP 구간에서 활성 상태를 유지하고, 추가적으로 상위 CH로부터 비콘 정보를 수신해서 BRP 구간을 통해 하위 CH에게 해당 정보를 전송하기 위해서 BTP 구간에 추가적으로 활성 상태로 천이한다. CH는 프레임의 모든 구간에 걸쳐 항상 활성 상태를 유지해야 한다.

IV. 성능분석

본 논문에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 성능 분석을 수행한다. 성능 분석을 위해 50m X 50m 환경에서 고정 개수의 센서 노드들을 임의로 분포시키고, 센서 노드의 데이터 전송 반경을 5m로

설정한 후 노드의 수를 변화 하면서 NND 기법
및 HiPERMAC 기법을 개별적으로 검증하였다.



(그림 3-11) 비콘 스케줄링 기법의 동작: 예시

가. 클러스터링 알고리즘의 성능 분석

본 분석에서는 제안된 NND 알고리즘의 성능을 Lowest ID 알고리즘 [1]과 Topology Discovery (TopDisc) 알고리즘 [3] 등의 기존 클러스터링 알고리즘의 성능과 비교한다. Lowest ID 알고리즘은 단일 홉 이내에 있는 노드들 중에서 가장 낮은 ID를 갖는 노드로 CH로 선출하는 방식이다. TopDisc 알고리즘은 노드 간 메시지 교환을 과정에서 제어 메시지가 소스 노드에서 목적지 노드에게 전달되는데 소요된 시간을 거리로 환산하여 가장 멀리 떨어져 있는

노드가 각각 GW 및 CH로 선출되는 거리 기반의 클러스터링 방식이다. 무선 채널에서의 페이딩을 고려하지 않고 거리에 따른 다중 경로 감쇄만을 반영한 이상적인 무선 채널을 고려하였다. NND 알고리즘에 적용된 Slave/Master Patching (SMP) 기법의 election threshold는 $N = 2$ 를 적용한다(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 4-1), (그림 4-2), (그림 4-3), (그림 4-4)는 각 클러스터링 알고리즘을 수행한 후 생성되는 CH, GW, TN, CN의 평균 갯수를 나타낸다. (그림 4-1)에서는 NND 알고리즘에 의해 CH의 수가 Lowest ID 알고리즘 대비 6 % 감소하며, (그림 4-3)에서는 NND 알고리즘에 의해 Lowest ID 알고리즘 대비 TN의 개수는 최대 33% 증대하는 것을 확인할 수 있었다 한편 Lowest ID 방식에는 GW를 선출하는 방식이 없으므로, Lowest ID에 의해 선출된 CN은 NND 알고리즘에서 선출된 GW와 CN의 합과 비교할 때 최대 38% 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 TopDisc 방식은 노드간의 거리 계산을 통해서 CH와 GW간의 거리를 최대화하므로 본 논문에서 목표로 하는 CH, GW, CN의 개수를 최소화하고자 하는 목표와 근원적으로 일치한다. 따라서 제안 방식에 따라서 선출된 CH, GW, TN, CN의 개수는 TopDisc 알고리즘에 의하여 선출된 개수와 유사한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 비록 TopDisc 방식에서 CH와 CH간의

거리가 최대가 될지라도 네트워크상에 센서 노드들의 불균일한 분포로 인하여 CH간 중첩된 전송 영역에 다수의 노드가 존재할 수 있으며, 이들은 CN으로 분류된다. 반면 NND 알고리즘은 GW 및 CH 선출시 노드의 개수를 세는 것을 기준으로 하기 때문에 CH와 CH간의 거리가 최대화될 뿐만 아니라 CN의 개수 또한 최대 8% 감소, 그리고 그에 해당하는 이득이 TN의 개수 증가로 전환됨을 확인할 수 있다. 또한 실제 무선 채널환경에서는 TopDisc 방식은 페이딩 현상으로 인하여 수신 신호 강도를 이용한 거리 계산의 정확도가 떨어질 수 있기 때문에 실제 적용에는 한계가 있을 수 있다. 마지막으로 NND+SMP는 SMP에 의하여 CH의 개수가 감소하므로, 따라서 TN의 개수는 각각 NND 기법 대비 32% 증가를 보였으며, 이는 해당 CN의 감소를 의미한다 결국 제안된 NND 알고리즘은 기존 알고리즘보다 CH와 GW의 개수를 감소시킬 수 있으며, 또한 TN 및 CN의 개수를 각각 증가 및 감소시킴으로써 HiPERMAC 프로토콜에서 적합한 클러스터링 성능의 확보하는 것을 확인할 수 있다.

나. 매체접근제어 프로토콜의 성능 분석

HiPERMAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위하여 1,000개의 센서 노드들을 50m x 50m 크기의 영역에 임의로 배치한 후 NND 알고리즘을 적용한다. 이를 통해 65개의 CH, 344개의 TN, 527개의 CN, 그리고 64개의 GW으로 구성된 클러스터 구조를 도출하였다. 각 노드는 336 비트 크기의 데이터 패킷을 Poisson 분포에 따라서

발생하며, 100 kbps의 전송률을 가정한다. 한편 HiPERMAC 프로토콜의 매체접근제어 성능을 비교하기 위하여 단일 주파수 채널을 전제로한 센서 네트워크의 전형적인 예로서 S-MAC [3]의 성능을 함께 살펴본다. 두 프로토콜 모두 NND 알고리즘에 의해 설정된 경로를 적용한다. HiPERMAC 및 S-MAC에 대해 모두 160ms의 프레임 길이를 가정하고, BTP 및 BRP를 각각 12.8ms로 설정하였다. 그리고 S-MAC의 SYNC 구간을 25.6ms으로 설정하고, 잉여구간을 3.36ms으로 정의된 40개의 슬롯으로 구분하였다. 이 40개의 슬롯을 S-MAC에서는 LISTEN과 SLEEP 구간으로 분할하였고, HiPERMAC에서는 CP와 TP로 각각 분할하였다. 이때 S-MAC의 LISTEN 구간과 HiPERMAC의 CP 길이를 동일하도록 설정하였다. 마지막으로 HiPERMAC에서는 각 CH가 데이터 축약과정(data aggregation)을 수행하며, 축약 주기는 한 프레임으로 가정하였다. 먼저 (그림 4-5)는 S-MAC과 HiPERMAC이 트래픽 부하의 변동 및 CP:TP (LISTEN:SLEEP) 구간의 비율 변동에 대해 패킷의 평균 도착률에 따른 에너지 소모량을 비교한 것이다. HiPERMAC의 CP 및 S-MAC의 LISTEN 구간이 길어짐에 따라서 S-MAC과 HiPERMAC 모두 에너지 소모량이 증가하는 형태를 확인할 수 있었다. 즉, S-MAC 및 HiPERMAC의 에너지 효율성은 각각 Listen/CP의 길이에 반비례한다. 반면 S-MAC은 트래픽 부하가 커짐에 따라서 활성 상태에 존재하는 노드의 수가 증가하고 빈번한 데이터

충돌 현상으로 인하여 에너지 소모량이 증가한다. 반면, HiPERMAC은 CSMA-CA 통신에 참여하는 노드의 수가 줄어들 뿐만 아니라, TP 구간의 TDMA 프레임 운용으로 인하여 S-MAC에 비해 에너지 효율성이 최대 38%까지 증대됨을 확인할 수 있었다. 한편 (그림 4-6)은 트래픽 부하에 따라서 수집 노드(SN)까지 도달한 데이터의 평균 수율 변화를 관찰한 것이다. (그림 4-6)에서 평균 패킷 도착률이 약 0.2 packet/sec 이상이면 S-MAC의 수율이 더 이상 증가하지 않고 포화상태로 하락하는 것을 알 수 있다. 반면 HiPERMAC의 경우, CP 구간에 참가하는 통신의 개체 수가 S-MAC에 비해 매우 적기 때문에 수율이 최대 120%까지 향상되는 것을 확인할 수 있다. 한편, HiPERMAC에서는 CP가 증가하면서 수율 성능이 증대되는 것을 확인할 수 있다.

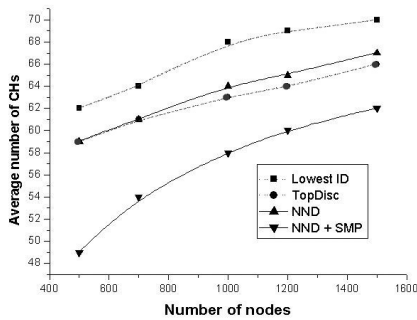
이는 결국 inter-cluster 통신이 HiPERMAC의 수율 성능에 주로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, (그림 4-5)와 (그림 4-6)에서 확인할 수 있듯이, 에너지 효율성과 수율간에는 상호 득실 관계(trade off)에 있음을 알 수 있다. (그림 4-7), (그림 4-8), 및 (그림 4-9)는 HiPERMAC에서 각각 CP:TP 비율이 각각 28:12, 20:20, 12:28일 때 수집 노드(SN)에 도착한 데이터 패킷의 지연시간 분포를 보인 것이다. 세 가지 경우에 공통적으로 트래픽 부하가 0.01일 경우 소량의 패킷들이 매우 짧은 시간에 SN에 도착한 것을 확인할 수 있다. 한편 트래픽 부하가 1일 경우 SN에 도달한 다수 패킷들의

지연시간이 증가한 것을 알 수 있으며, 이는 CP 구간에서의 수율 성능 저하를 의미한다. 반면 트래픽 부하가 크어도 불구하고 상대적으로 적은 지연 시간을 갖는 데이터 패킷들이 상당수 SN에 수집된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 SN으로부터 근거리 내에 존재하는 TN들로부터 수집된 데이터의 지연 시간으로서, (그림 4-6)에서 HiPERMAC의 경우 트래픽 부하가 큰 상황에서도 수율 성능이 향상되는 이유를 반증해 준다. 즉, HiPERMAC은 주어진 트래픽 부하에 대해 지연 및 에너지 효율성의 요구사항에 따라서 TP:CP 구간의 비율 제어함으로써 성능을 최적화할 수 있는 일반적인 구조를 제공한다.

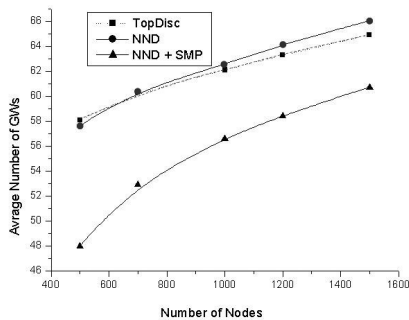
V. 결론

무선 센서 네트워크(WSN)에서는 상하향 스트림의 트래픽 특성과 네트워크 수명을 극대화하기 위한 전력 요구사항을 만족하기 위해서는 계층구조 망에 적합한 것으로 판단되며, 본 논문에서는 이와 같은 구조에 최적화된 매체접근제어 및 네트워크 프로토콜을 제안하였다. 이는 WSN의 다양한 응용 환경과 품질 요구사항에 따라 유연하게 적용할 수 있는 계층간 상호 최적화를 고려한 통합 기반의 프로토콜이다. 제안된 HiPERMAC 프로토콜은 각 계층을 이중화하여 intra-cluster간 통신을 위해 주파수 재사용이 가능하도록 하면서, 단일의 주파수 채널로도 효율적인 inter-cluster간 통신까지 지원할 수 있도록 설계되었다.

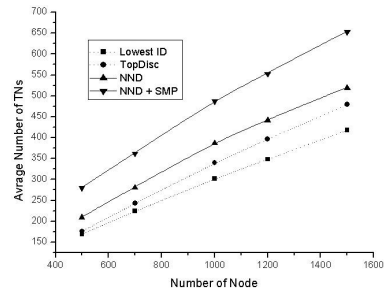
IEEE 802.15 계열 WPAN 표준 기술 및 각종 무선 센서 네트워크에서 고려된 기존 기술들은 특정 환경 및 응용 서비스에 따라 개별적으로 최적화된 반면, HiPERMAC은 어떠한 환경과 응용 서비스에 대해서도 자원의 효율성을 최적화할 수 있는 통합적인 구조를 제공함으로써 하나의 표준 규격으로 기존 서비스를 수용할 수 있을 뿐만 아니라 기존 표준 기술들이 제공할 수 없는 광범위한 환경에서 적용 가능한 표준으로서의 후보 기술이 될 수 있다. 한편, 다양한 응용 환경에서 HiPERMAC 프로토콜의 성능을 극대화하기 위한 최적화와 구체적인 구현 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다.



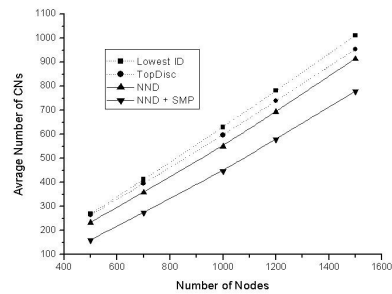
(그림 4-1) 생성된 CH의 평균 개수



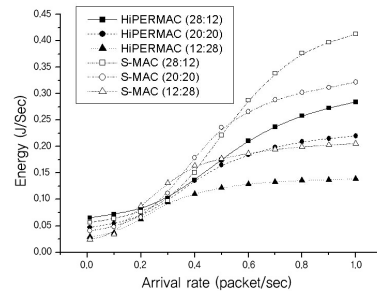
(그림 4-2) 생성된 GW의 평균 개수



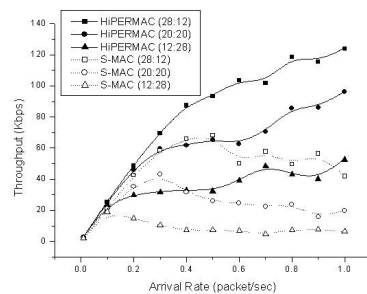
(그림 4-3) 생성된 TN의 평균 개수



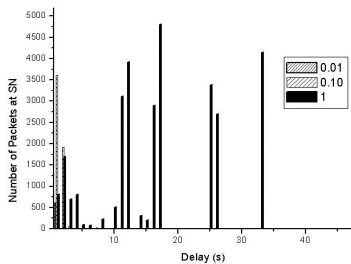
(그림 4-4) 생성된 CN의 평균 개수



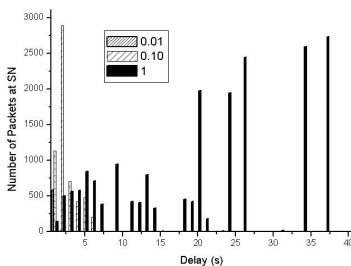
(그림 4-5) 노드별 평균 에너지 소모량



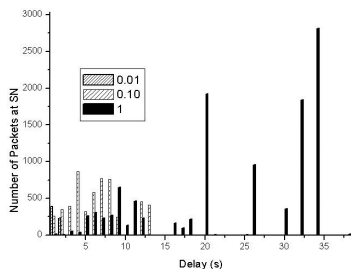
(그림 4-6) SN이 수집한 데이터의 평균 수



(그림 4-7) SN이 수집한 데이터의 지연 시간 분포
(CP:TP=28:12)



(그림 4-8) SN이 수집한 데이터의 지연 시간 분포
(CP:TP=20:20)



(그림 4-9) SN이 수집한 데이터의 지연 시간 분포
(CP:TP=12:28)

>> 참고문헌

- [1] 서창수, 고영배 “유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적 MAC 프로토콜” Telecommunication review 15권 2호 pp. 323~336, 2005.
- [2] C. Intanagonwiiwat, R. Govindan, and D.

Estrin, “Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor network,” In Proceedings of the MobiCOM 00, August 2000.

- [3] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, “MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a survey,” http://www.cmpe.boun.edu.tr/~ilker/IlkerDEMIRKOL_COMMAG.pdf
- [4] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “uAMPS ns Code Extension”. <Http://www.mtl.mit.edu/research/icsystem/uamps/leach>.
- [5] LAN/MAN Standards Committee for the IEEE Computer Society, Draft Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN), Draft P802.15.4/D18, February 2003.
- [6] LAN/MAN Standards Committee for the IEEE Computer Society, Draft Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN), P802.15.4-REVb/D1, January-2005.
- [7] ZigBee Document 02130r10, Dec. 2004.
- [8] M, Gerla and J, Tsai, “Multicluster mobile multimedia radio network,” ACM Baltzer Journal of Wireless Networks (1995).
- [9] B, Deb, S, Bhatnagar., B. Nath.: A Topology Discovery Algorithm for Sensor Networks with Applications to Network Management. Technical Report DCS-TR-441, Department of Computer Science, Rutgers University (2001)

>> 저자소개



김 일 환 (Il Whan Kim)

Email : atc01037@korea.ac.kr

Tel : +82-2-924-7515

Fax : +82-2-3290-3691

2002. 2 : 고려대학교 전파공학과 학사

2005. 2 : 고려대학교 전파공학과 석/박사 통합과정 수료

2005. 2 ~ 현재 : 고려대 전파공학과 석/박사 통합과정 재학 중

주관심분야 : Wireless MAC protocol, RRM, Next generation mobile communication, wireless, LAN/MAN/PAN



김 용 석 (Yongsuk Kim)

Email : yongsuk@samsung.com

Tel : +82-31-280-9576

Fax : +82-31-280-9587

1989. 2 : 고려대학교 전자전산공학 학사

2003. 2 : 고려대학교 통신공학 박사

2002.2 ~ 현재 : 삼성종합기술원 Communication Lab. 전문연구원

주관심분야 : UWB MAC, WUSB



강 충 구 (Chung Gu Kang)

E-mail: ccgkang@korea.ac.kr

Tel : +82-2-3290-3236

Fax : +82-2-3290-3691

1987. 6 : Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사

1989. 6 : Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터

공학과 석사 1993.03: Univ. of California

(Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 박사

1992.7 ~ 1993.6 : (미) Aerospace Corp. 연구원

1993.3 ~ 1994.2 : (미) Rockwell International 연구원

2000.9 ~ 2001.8 : (미) Center for Wireless

Communication, UCSD 방문 교수

1994.3 ~ 현재 : 고려대학교 전파통신공학과 교수

2003 ~ 현재 : TTA PG05 2.3GHz 휴대인터넷 프로젝트 그룹 부의장/서비스 및 네트워크 실무반 의장

2005 ~ 현재 : 한국통신학회 이동통신연구회 위원장

주관심분야: 광대역 무선 전송 기술 및 매체접근제어 프로토콜 설계/구현, 무선 네트워크(Wireless PAN/LAN/MAN) 제어 프로토콜 설계 및 성능 분석