

무선 센서 망에서 주기적인 송수신 모듈 활성화를 위한 클락 동기

김승목[†], 박태근^{**}

요 약

제한된 전원으로 동작해야 하는 센서 노드의 수명 연장을 위하여, 에너지 효율적인 센서 노드의 동작에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그들 중에는 주기적으로 무선 송수신 모듈을 활성화 / 비활성화 하면서 정보 전달을 위하여 인접 노드가 깨어나는 시점에 대한 정보를 필요로 하는 기법들이 존재한다. 클락 동기는 이러한 기법들에서 무선 송수신 모듈의 활성화 / 비활성화 스케줄링을 위하여 필수적인 요소이다. 본 논문에서는 센서 망에서 전역 클락 동기를 위하여 제안된 비동기 평균 알고리즘을 기반으로 주기적인 무선 송수신 모듈 활성화 / 비활성화 기법에서의 클락 동기 방법을 제안한다. 구체적으로 본 논문은 (1) 초기 자율적인 망 구성 시점에 필요한 신속한 클락 동기 방법과 (2) 에너지 소모를 최소화한 주기적인 클락 동기 방법 및 (3) 두 가지 동기 방법들 간의 전환 시점 판단 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 클락 오차 범위와 교환되는 메시지 수를 분석한다.

Clock Synchronization for Periodic Wakeup in Wireless Sensor Networks

Seung-mok Kim[†], Tae-keun Park^{**}

ABSTRACT

One of the major issues in recent researches on wireless sensor networks is to reduce energy consumption of sensor nodes operating with limited battery power, in order to lengthen their lifespan. Among the researches, we are interested in the schemes in which a sensor node periodically turns on and off its radio and requires information on the time when its neighbors will wake up (or turn on). Clock synchronization is essential for wakeup scheduling in such schemes. This paper proposes three methods based on the asynchronous averaging algorithm for clock synchronization in sensor nodes which periodically wake up: (1) a fast clock synchronization method during an initial network construction period, (2) a periodic clock synchronization method for saving energy consumption, and (3) a decision method for switching the operation mode of sensor nodes between the two clock synchronization methods. Through simulation, we analyze maximum clock difference and the number of messages required for clock synchronization.

Key words: Sensor Networks(센서 망), Clock Synchronization(클락 동기), Radio Activation(무선 송수신 모듈 활성화), Power Management(전원 관리), Energy Consumption(에너지 소모)

※ 교신저자(Corresponding Author): 박태근, 주소: 충남 천안시 안서동 단국대학교 천안캠퍼스 제3과학관 419호 (330-714), 전화: 041)550-3486, FAX: 041)550-3486, E-mail: tkpark@dku.edu
접수일: 2006년 10월 11일, 완료일: 2007년 1월 23일

[†] 중신회원, 단국대학교 컴퓨터과학전공
(E-mail: pekim@dankook.ac.kr)

^{**} 중신회원, 단국대학교 멀티미디어공학전공

※ 본 연구는 2006학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 수행되었음

1. 서 론

기술의 발전에 따라, 정보의 수집이 필요한 지역에 센서 노드들을 공중에서 투하하거나 지정된 위치에 센서 노드들을 설치하면 각 노드들이 인접 노드들과 분산화된 방법으로 협동하여 자율적인 망을 구축한 후 수집된 정보를 목적지 노드로 전달하는 무선 센서 망의 개념이 등장하게 되었다[1]. 그러나 이러한 센서 망이 보편적으로 사용되기 위해서는 제한된 배터리 전원을 이용하여 정보를 수집하고 전달하는 센서 노드의 수명 연장이 필수적이다. 따라서, 센서 노드의 에너지 효율적인 동작 방법에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다.

센서 노드의 에너지 효율적인 동작에 대한 기존의 연구들은 무선 송수신 모듈을 활성화하였을 때 소비되는 에너지의 양이 무선 송수신 모듈을 비활성화 하였을 때 소비되는 에너지의 양보다 월등히 크다는 사실에 주목하였다. 이와 같이, 무선 송수신 모듈을 활성화시킨 센서 노드의 수를 최소화하는 것에 초점을 맞춘 대표적인 연구들로는 S-MAC(Sensor Medium Access Control)[2], STEM (Sparse Topology and Energy Management)[3] 및 GeRaF(Geographic Random Forwarding)[4]가 있다.

S-MAC에서는 에너지 소비를 줄이기 위하여 센서 노드들의 무선 송수신 모듈을 주기적으로 비활성화 시키는데, 인접 노드와의 통신을 위하여 각 노드는 인접 노드의 무선 송수신 모듈이 활성화되는 시점에 대한 정보를 관리하고 있다가 해당 시점에 자신의 무선 송수신 모듈도 활성화하는 방법으로 동작한다[2]. S-MAC은 주기적으로 무선 모듈을 활성화/비활성화하면서, 인접 노드가 깨어나는 시점(무선 모듈을 활성화하는 시점)에 대한 정보를 각 센서 노드가 관리하는 형태의 연구들을 대표하는 기법으로 볼 수 있다. GeRaF는 센서 노드들이 주기적으로 자신의 무선 송수신 모듈을 활성화/비활성화 하지만 인접 노드의 무선 모듈이 활성화되는 시점에 대한 정보를 필요로 하지 않고, 단지 자신이 데이터를 송신하고자 할 때 무선 모듈이 활성화되어 있는 인접 노드들 중에서 하나의 노드를 수신 노드로 선택하여 데이터를 전달하는 기법이다[3]. GeRaF는 주기적으로 무선 모듈을 활성화/비활성화 하기는 하지만, 인접 노드가 깨어나는 시점에 대한 정보를 필요로 하지 않는 연구

들을 대표하는 기법으로 볼 수 있다. STEM은 센서 노드들이 송수신할 데이터가 없는 경우 자신의 무선 송수신 모듈을 비활성화 하고 있다가, 송신할 데이터가 발생한 경우에 송신 노드가 수신 노드에게 무선 송수신 모듈의 활성화를 요청함으로써 데이터 전달에 필요한 노드들의 무선 송수신 모듈만 활성화하는 기법이다[4]. STEM은 필요에 따라 다른 센서 노드를 깨우는 연구들을 대표하는 기법으로 볼 수 있다.

이상과 같은 센서 노드의 에너지 효율적인 동작에 대한 연구들 중에서, 주기적으로 무선 모듈을 활성화/비활성화하지만 인접 노드가 깨어나는 시점에 대한 정보를 필요로 하지 않는 기법들과 송신 노드가 필요에 따라 수신 노드를 깨우는 기법들에서는 정밀한 수준의 클락 동기를 요구하지는 않는다. 그러나 주기적으로 무선 모듈을 활성화/비활성화하면서 인접 노드가 깨어나는 시점에 대한 정보를 필요로 하는 기법들에서는 센서 노드들 간의 정밀한 클락 동기가 필수적이다[5]. 일반적으로 센서 망에서의 클락 동기는, 첫째, 수집된 정보의 올바른 순서파악을 위하여 필요하고, 둘째, 센서 노드들의 동기화된 무선 모듈 활성화/비활성화를 위하여 필요하며, 셋째, TDMA와 같은 매체 접근 제어 프로토콜의 사용을 위하여 필요하다[5-8].

전통적인 클락 동기 모델로는 Event Ordering과 Relative Clock 및 Adjusted Clock이 있다. Event Ordering은 센서 망에서 수집된 정보의 올바른 발생 순서를 맞추기 위한 동기 모델이지만, 센서 노드간의 클락 차이 값을 유지한다거나 클락 값을 수정하는 등의 절차를 수행하지는 않는 모델이다. 이에 반하여, Relative Clock은 센서 노드들 간의 클락 차이 값을 유지하는 모델이며, Adjusted Clock은 센서 노드 내부 클락을 보정함으로써 동기를 이루는 모델이다. 그러나, 센서 망에서는 멀티 홉 클락 동기를 필요로 하고 있을 뿐만 아니라 상대적 클락 차이 값을 유지하는 것이 많은 메모리 공간과 통신 부하를 유발하기 때문에[9], 이상의 세가지 모델 중에서, 최근에는 센서 노드의 클락을 수정하는 Adjusted Clock 모델에 속하는 기법들[5-8]이 주로 제안되고 있다.

본 논문은 주기적으로 무선 모듈을 활성화/비활성화하면서 인접 노드가 깨어나는 시점에 대한 정보를 필요로 하는 기법들에서의 클락 동기를 위하여, 전역 클락 동기 알고리즘(Global Clock Synchronization

Algorithm)[5] 중에서 비동기 평균 알고리즘(Asynchronous Averaging Algorithm)을 적용하고자 한다. 비동기 평균 알고리즘은 각 센서 노드가 이웃 노드들에게 클락 값을 질의하여 응답으로 수집한 값들을 평균한 뒤, 그 평균 값을 이웃 노드들에게 돌려주어 이웃 노드들이 자신의 클락을 수정할 수 있도록 하는 매우 단순한 알고리즘이다[5]. 비동기 평균 알고리즘을 선택한 이유는, 이 알고리즘을 사용할 경우, 센서 망에서 클락 동기를 위하여 노드들이 트리나 링 형태의 토폴로지를 추가적으로 관리할 필요가 없을 뿐만 아니라 외부 클락 공급원이 없이도 센서 망을 구성하는 모든 노드들의 클락을 일정 수준 이하의 오차 범위 내에서 동기화시킬 수 있기 때문이다.

본 논문은 비동기 평균 알고리즘을 이용하여, 첫째, 초기 자율적인 망 구성 시점에 필요한 신속한 클락 동기 방법과, 둘째, 에너지 소모를 최소화한 주기적인 클락 동기 방법 및, 셋째, 두 가지 동기 방법들 간의 전환 시점을 결정하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법들은 시뮬레이션을 통하여 클락 오차 범위와 교환되는 메시지 수의 관점에서 성능 분석된다. 성능 분석 결과를 통하여, 본 논문에서 제안하는 방법을 적용할 경우, 센서 네트워크의 초기 구성 시점에 센서 노드들의 클락 오차를 신속하게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 일정 수준 이하로 클락 오차의 범위가 줄어든 이후, 작은 수의 메시지만으로도 목표로 하는 범위 이내로 클락 오차를 유지할 수 있음을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 해결하고자 하는 문제를 정의하고, III장에서는 비동기 평균 알고리즘에 기반을 둔 세 가지 문제 해결 방법을 제안한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통하여, 제안하는 방법들의 성능을 분석하고, 마지막으로 V장에서 결론과 향후 연구 방향에 대하여 서술한다.

2. 문제 정의

센서 노드가 일정 시간 동안 무선 송수신 모듈을 활성화하고 또 다른 일정 시간 동안 무선 송수신 모듈을 비활성화 하는 동작을 반복하면서, 정보 전달을 위하여 인접 노드의 무선 모듈이 활성화되는 시점에 자신의 무선 송수신 모듈을 활성화하는 것이 가능하려면, 두 개의 센서 노드의 클락 차이 값은 반드시 일정 수준의 오차 범위 이내로 유지되어야 한다. 그

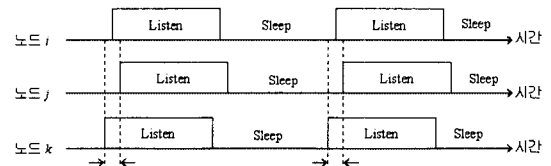
러나, 센서 노드는 일반적으로 저가의 수정 발진자를 사용하기 때문에 별도의 방법에 따라 클락 동기를 맞춰주지 않는 경우, 임의의 두 노드는 시간에 따라 상당히 큰 클락 차이 값을 가지게 된다.

본 장에서는 그림 1과 같이 주기적으로 무선 송수신 모듈의 활성화와 비활성화를 반복하는 센서 노드들이 인접 노드들과의 클락 차이 값을 일정 수준 이하로 유지하기 위하여 해결해야 할 세 가지 문제를 다음과 같이 정의한다.

(1) 초기 클락 동기 문제: 초기 자율적인 망 구성 시점에서 각 센서 노드들의 클락 값은 절대 시간 값에 비하여 상당한 오차를 가질 수 있다. 왜냐하면, 전원이 켜진 시점에서부터 수정 발진자에 의해 발생 가능한 오차 값이 계속 누적되었기 때문이다. 따라서, 센서 망을 구성하는 모든 노드들이 자율적으로 망을 구성한 후, 그림 1과 같이 동작하도록 하기 위해서는, 최대한 빠른 시간 내에 센서 노드들의 전역 클락 동기가 이루어져야 한다. 이 문제를 본 논문에서는 초기 클락 동기 문제로 정의한다.

(2) 주기적인 클락 동기 문제: 초기 클락 동기 문제가 해결되면, 센서 망을 구성하는 모든 센서 노드들은 일정 수준 이하로 클락 차이 값을 유지하게 된다. 이러한 상태가 되면 센서 노드들은 초기 클락 동기 문제를 해결할 때와 같이 빈번하게 전역 클락 동기를 수행하지 않아도 된다. 본 논문에서는 최소한의 에너지 소모로 주어진 클락 차이 값을 유지할 수 있도록 하는 것을 주기적인 클락 동기 문제로 정의한다.

(3) 모드 전환 시점 결정 문제: 앞서 살펴본 바와 같이, 초기 클락 동기는 에너지 소모에 관계없이 최대한 빠른 시간 내에 모든 센서 노드들이 일정 수준 이하의 클락 오차 값을 가지도록 하는 것이 목표인데 반하여, 주기적인 클락 동기는 최소한의 에너지 소모로 일정 수준 이하의 클락 오차 값을 유지하는 것을



Listen: 무선 송수신 모듈을 활성화하여 전송 매체로부터 신호를 기다리고 있는 상태
Sleep: 에너지 절약을 위하여 무선 송수신 모듈을 비활성화한 상태

그림 1. 3개의 인접한 센서 노드들의 클락 차이에 의한 Listen 시작 시점 오차

목표로 하고 있다. 따라서, 센서 노드들은 일정한 조건이 만족되면 초기 클락 동기 모드에서 주기적인 클락 동기 모드로 전환을 해야 하는데, 그 시점을 결정하는 것을 본 논문에서는 모드 전환 시점 결정 문제로 정의한다.

본 논문에서 클락 동기에 참여하는 센서 노드들은 클러스터 기반 센서 망에서 클러스터 헤더들로 한정하며, 그림 2와 같이 각 클러스터는 육각형 모양으로 6개의 다른 클러스터와 인접하고 있다[10] 가정한다. 센서 노드가 자신의 클러스터를 인식하는 것과 클러스터 내에서 클러스터 헤더를 선출하는 것은 본 논문에서는 다루지 않는다.

3. 문제 해결 방법

본 장에서는, 클러스터 기반 센서 망에서 클러스터 헤더들의 클락 동기를 위하여, 비동기 평균 알고리즘에 기반을 둔 초기 및 주기적 클락 동기 모드와 모드 전환 방법을 제안한다.

3.1 초기 클락 동기 모드

센서 노드들이 최초로 설치되어 자율적인 망을 구성하는 시점에, 센서 노드들의 클락 차이는 상당 수준에 이를 수 있다. 예를 들어 버클리 모드의 경우, 내부 오실레이터의 오차에 의한 두 노드 간 최대 클락 차이 값은 4.75 $\mu\text{s/s}$ 로 알려져 있다[6]. 만일 이와 같은 클락 차이 값을 가지는 두 개의 센서 노드들의 전원이 켜진 후 12시간이 지났다면, 두 노드는 최대 0.2052초의 클락 차이 값을 가지게 된다.

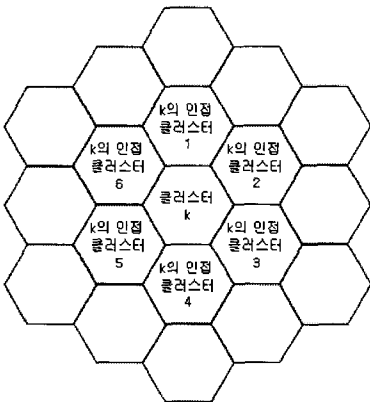


그림 2. 육각형 클러스터

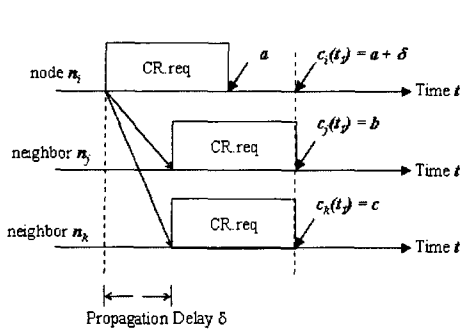
초기 클락 동기 모드는 이상과 같이 상당 수준의 클락 오차가 발생 한 시점에 각 센서 노드들이 전역 클락 동기를 위하여 동작하는 모드를 의미한다. 본 논문의 초기 클락 동기 모드는 외부 클락 공급원과 클락 동기를 위한 토폴로지 설정을 요구하지 않는 비동기 평균 알고리즘[5]에 기반한다. 비동기 평균 알고리즘은 그림 3과 같이, (1) 하나의 노드가 인접 노드들에게 클락 값을 질의하면, (2) 인접 노드들은 자신의 클락 값을 질의의 노드에게 돌려 주는데, (3) 이웃 노드들의 클락 값을 수집한 노드가 이들 값을 평균하여 다시 인접 노드에 알려주는 것을 반복하는 알고리즘이다. 이하 논문에서는 비동기 평균 알고리즘의 3단계 동작을 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업이라 부른다. 각 센서 노드가 이러한 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업을 반복하면서 자신의 클락 값을 수정하면, 전체 센서 망의 최대 클락 오차는 점차 줄어들고, 결과적으로 전역 클락 동기를 획득할 수 있게 된다. 단, 비동기 평균 알고리즘에서 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업은 Atomic하게 수행되어야 한다[5]. 즉, 동일 센서 노드가 두 개 이상의 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업에 동시에 참여하지 않아야 한다.

초기 클락 동기 모드에서 클락 질의 및 평균값 알림 메시지 교환과 메시지 교환에 의해 클락 값이 기억되고 수정되는 관리 절차는 그림 4와 같다. 먼저 그림 4의 (a)는 하나의 센서 노드가 클락 질의 메시지 (CR.req)를 송신하였을 때, 이를 수신한 인접 노드들이 클락 응답 메시지 (CR.rep)를 이용하여 응답할 때 사용할 클락 값을 기억하는 시점 $c_i(t_i)$ 에 대하여 보여준다. 클락 질의 메시지를 송신한 노드로부터 인접 노드까지의 거리에 따라 메시지의 Propagation Delay는 달라지겠지만, 본 논문에서는 센서 노드의 전송 반경이 크지 않고 센서 노드들이 가까운 지역에 위치하고 있다고 가정하여 메시지의 Propagation Delay는 모든 노드에 대하여 동일하다고 가정한다.

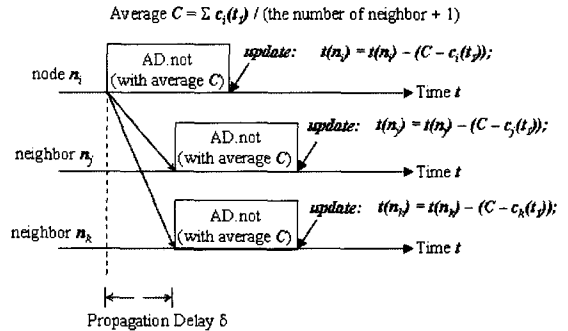
Algorithm: Asynchronous Averaging Algorithm in a Sensor Network

- 1: for each node n_i , with uniform probability do
- 2: Ask its neighbors the clock readings (read values from n_i , and its neighbors)
- 3: Average the readings (compute)
- 4: Send back to the neighbors the new value (write values to n_i , and its neighbors)

그림 3. 비동기 평균 알고리즘



(a) 클락 질의 메시지 교환 및 클럭 기억 시점



(b) 평균값 알림 메시지 교환 및 클럭 교정 시점

그림 4. 클락 질의 및 평균값 알림 메시지와 클락 관리

따라서, 클락 질의 메시지를 수신한 노드들은 클락 응답 메시지를 이용하여 통지할 클락 값으로 클락 질의 메시지 수신 완료 시점의 클락 값을 사용하며, 클락 질의 메시지를 송신한 노드는 클락 질의 메시지 송신 시점에 Propagation Delay를 더한 값을 사용한다. 클락 응답 메시지를 통하여 인접 노드들의 클락 값을 모두 수집한 노드는 자신의 클락과 인접 노드의 클락 값을 평균한 후, 그림 4의 (b)에서와 같이 평균값 알림 메시지 (AD.not)를 이용하여 인접 노드들에게 방송한다. 평균값 알림 메시지를 송신한 노드와 수신한 노드는 평균값 C 와 평균값 계산에 사용된 자신의 클락 값 $c_i(t_j)$ 의 차이를 이용하여 자신의 클락을 수정한다.

그런데 그림 4와 같은 동작의 반복으로 전역 클락 동기를 획득하기 위해서는, 앞서 언급한 바와 같이, 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업이 Atomic하게 진행되어야 한다. 초기 클락 동기 모드에서는 이를 위하여, 그림 5와 같이 두 가지 종류의 프레임간 간격 (Inter-frame Time Interval)과 전송 거리가 서로 다른 3가지 종류의 메시지를 사용한다. LIFCS (Long Inter-frame for Clock Synchronization)는 Atomic한 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업을 시작하기 전에, 즉 각 센서 노드가 클락 질의 메시지를 송신하기 전에 기다리는 시간을 의미하고, SIFCS (Short Inter-frame for Clock Synchronization)는 Atomic한 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업 내에서 메시지들을 송신하기 전에 센서 노드들이 기다리는 시간을 의미한다. T_M 은 메시지 전송 시간을 의미한다.

클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업에서 클락 질

의 메시지의 전송 범위는, 그림 5와 같이, 클락 응답 및 평균값 알림 메시지 전송 범위의 두 배에 해당하도록 설계되었다. 이러한 클락 질의 메시지의 전송 범위 확대는 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업의 Atomic한 수행에 도움을 줄 수 있다. 클락 응답 메시지와 평균값 통지 메시지의 전송 범위를 1-hop 거리고 클락 질의 메시지의 전송 범위가 다른 메시지의 전송 범위와 동일할 경우, 2-hop 거리에 존재하는 다른 노드가 전송하는 클락 질의 메시지에 의하여 현재 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업의 Atomic한 동작이 불가능해질 수 있다. 그러나, 그림 5와 같이 클락 질의 메시지의 전송 범위를 다른 메시지 전송 범위의 두 배가 되도록 전송하면, 동일한 노드가 두 개 이상의 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업에 참가하는 것을 방지할 수 있다.

또한, 클락 질의 메시지를 받은 노드는, 클락 응답 메시지의 충돌을 막기 위하여 자신이 속한 클러스터와 클락 질의 메시지를 송신한 클러스터의 위치적 관계를 파악한 뒤, 그림 5와 같이 순차적으로 클락 응답 메시지를 전송하도록 설계되었다. 하나의 클러스터에 대한 인접 클러스터들의 위치에 따른 순차적

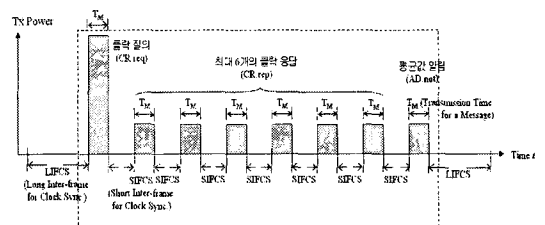


그림 5. 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업

관계를 그림 2와 같은 형태로 지정하여, 인접 클러스터 1에 속하는 노드가 클락 응답 메시지를 가장 먼저 전송하고, 다음으로 인접 클러스터 2에 속하는 노드가 클락 응답 메시지를 전송하는 형태로 동작하도록 할 수 있다. 센서 망의 가장자리에 위치한 클러스터는 6보다 작은 수의 인접 클러스터를 가질 수도 있는데, 이 경우, 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업에 소요되는 시간은 6개의 인접 클러스터가 존재하는 경우와 동일하지만, 전송되는 클락 응답 메시지의 수는 인접 클러스터의 수에 의하여 결정된다.

클락 질의 메시지를 전송하고자 하는 노드가 다른 노드의 클락 질의 메시지를 수신한 후, 자신이 시작하고자 하는 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업의 시작 시점을 지연시키는 절차는 그림 6과 같다. 센서 노드는 클락 질의 메시지를 전송하기 이전에 최소한 LIFCS 만큼의 시간 동안 전송 매체가 사용 중이 아님을 확인하여야 하는데, 만일 다른 노드의 클락 질의 메시지 전송을 확인하게 되면 수식 (1)에 의하여 계산되는 D_a 시간만큼 전송 매체를 사용할 수 없게 된다.

$$D_a = (n + 1) \times SIFCS + (n + 2) \times T_M \quad \text{where } n \text{ is the number of neighbor nodes} \quad (1)$$

따라서, 그림 6에서 클락 질의 메시지 CR.req3를 전송하고자 하는 센서 노드는 CR.req2에 의하여 시작된 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업이 완료된 시점으로부터 수식 (2)에 의하여 계산되는 D_b 시간 후에 클락 질의 메시지 전송을 시도하여야 한다.

$$D_b = LIFCS + \delta \quad \text{where } \delta = k \times s \text{ for } 0 \leq k \leq 16, s \text{ is a time unit} \quad (2)$$

3.2 모드 전환

센서 노드들이 일정 시간 초기 클락 동기 모드로

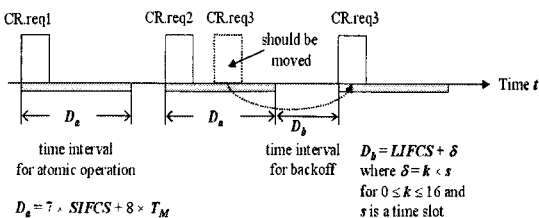


그림 6. 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업의 Backoff

동작하면, 초기에 클락 동기가 이루어지지 않았던 센서 노드들의 클락 오차 값도 주어진 범위 이내로 줄어들 수 있다. 이 시점에 센서 노드들은 에너지 절감을 위하여 클락 동기를 계속 유지하면서도 교환되는 메시지 수를 최소화하는 방향으로 동작 모드를 전환할 필요가 있다. 이를 위해서는, 첫째, 모드 전환 여부를 판단하는 노드의 선택과, 둘째, 모드 전환을 결정한 시점으로부터 모든 센서 노드가 동시에 모드를 전환하는 시점까지의 시간 간격 결정이 필요하다.

모드 전환 여부를 판단하는 노드의 선택 문제에 대해서는, 센서 노드들을 공중에서 투하하는 경우에는 센서 네트워크를 외부 망과 연결해 주는 싱크(Sink) 노드를 모드 전환 여부를 판단하는 노드로 선택하고, 센서 노드들을 지정한 위치에 설치하는 경우에는 센서 망의 중앙에 위치한 센서 노드를 모드 전환 여부를 판단하는 노드로 선택하는 방법을 간단한 해결책으로 사용할 수 있다.

이에 비하여, 모드 전환 시점까지의 시간 간격 결정은 단순하지 않다. 왜냐하면, 모드 전환을 결정한 노드가 인접 노드에게 모드 전환 결정을 통지하는 시점으로부터 전체 센서 노드들이 모드 전환 결정을 알게 되는 시점까지의 시간 간격을 정확하게 알 수 없기 때문이다. 이 시간 간격은 센서 망의 크기와 모드 전환을 결정한 노드의 위치 및 데이터 전달 방법에 따라 달라질 수 있다. 가장 간단한 해결책은 설치할 센서 망의 크기에 따라 미리 결정된 시간 값을 모드 전환 여부를 판단하는 노드의 메모리에 미리 저장하는 것이다.

이상의 내용을 바탕으로 모드 전환은 다음의 4 단계 동작에 따라 수행된다.

단계 1: 모드 전환 여부를 판단하는 노드는 자신과 인접 노드들의 클락 오차가 클락 오차 임계치(Clock Difference Threshold) 이하로 줄어들었을 때, 모드 전환을 결정한다.

단계 2: 모드 전환 여부를 판단하는 노드는 현재로부터 모드 전환 시점까지의 시간 간격을 초기 클락 동기 모드의 클락 질의 메시지에 포함시켜 전송한다.

단계 3: 모드 전환 시점까지 남은 시간을 수신한 노드들은 초기 클락 동기 모드의 클락 질의 메시지를 송신하기 이전에, 그 시점으로부터 모드 전환 시점까지의 시간 간격을 재계산하여 클락 질의 메시지에 포함시킨다.

단계 4: 모드 전환 시점이 되면, 센서 망의 모든 노드들은 주기적 클락 동기 모드로 전환한다.

3.3 주기적 클락 동기 모드

주기적 클락 동기 모드의 목적은 최소의 메시지 교환으로 소모 에너지를 절감하면서도 초기 클락 동기 모드에서 획득한 전역 클락 동기를 지속적으로 유지하는 것이다. 초기 클락 동기 모드의 결과로 얻어지는 최대 클락 오차를 ϵ 라 하고, 센서 네트워크에서 허용 가능한 최대 클락 오차를 E 라 하자. 센서 노드의 최대 Clock Drift를 C_d 라고 할 때, 클락 동기를 수행하지 않아도 될 시간 크기 T_p 는 수식 (3)과 같다.

$$T_p \leq \frac{(E - \epsilon)}{C_d} \quad (3)$$

그러나, 모든 센서 노드가 T_p 시간 간격마다 동시에 클락 동기를 시도한다면, 클락 동기 메시지들의 충돌로 인한 비효율성이 발생할 수 있다. 따라서, 주기적 클락 동기 모드에서는[11]에서 제안된 클러스터 기반 센서 네트워크에서의 타임 슬롯 할당 방법을 이용하여 각 센서 노드가 클락 동기를 수행할 시점을 결정하도록 한다.

클러스터 기반 센서 네트워크에서의 타임 슬롯 할당 방법 및 할당 예는 그림 7과 같다. 그림 7의 (a)와 같이 육각형 형태의 클러스터들로 센서 네트워크가 구성될 때, 두 개의 좌표 축인 i, j 를 사용하여 각 클러스터에 인덱스 (i, j) 를 할당한다. 이 때, 자신을 포함하여 N 홉 이내로 인접한 클러스터의 수를 M 이라 하면, M 개의 클러스터에게 중첩되지 않는 타임 슬롯

$T(i, j)$ 를 수식 (4)와 같이 계산할 수 있다[11].

$$T(i, j) = (i + j \times a) \bmod M \quad \text{where } a = 3N + 2 \text{ or } 3N^2 \quad (4)$$

그림 7 (b)는 $N = 1, M = 7, a = 3$ 일 때, 수식 (4)에 의하여 할당된 클러스터 타임 슬롯 값을 보여 준다. 그림 7 (b)와 같이 클러스터에 타임 슬롯이 할당되면, 모든 클러스터가 할당된 타임 슬롯마다 N -hop ($N = 1$)까지 도달 가능하도록 메시지를 동시에 전송하더라도 메시지 충돌은 발생하지 않는다.

주기적 클락 동기 모드에서는 각 클러스터의 센서 노드가 수식 (3)의 최대 값에 따라 클락 동기를 시도하는데, 주기적 클락 동기 모드가 시작되는 시점으로 부터 각 클러스터의 센서 노드가 클락 동기를 최초로 시도하는 시점의 오프셋 값을 수식 (5)에 따라 결정하도록 한다.

$$T_{offset}(i, j) = \frac{T_p}{M} \times T(i, j) \quad (5)$$

수식 (5)에 따라 클락 동기 시작 시점 오프셋 값을 결정하면, 초기 클락 동기 모드에서와는 달리 클락 질의 메시지 (CR.req)를 1-hop 인접한 클러스터까지만 도달하도록 전송하여도, 클락 질의/응답 및 평균 값 통지 작업의 Atomic한 수행에 문제가 발생하지 않는다.

4. 성능 분석

성능 분석을 위하여 그림 2 및 그림 7과 같이 육각형 클러스터들로 구성되는 센서 네트워크에서 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션은 클러스터 기반 센

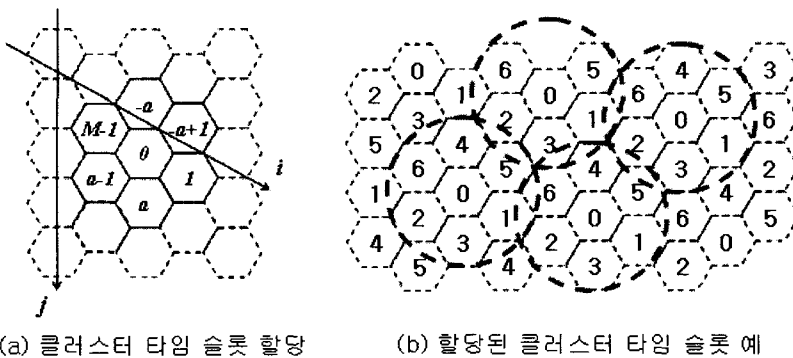


그림 7. 클러스터 기반 센서 네트워크에서의 타임 슬롯 할당 방법 및 할당 예

서 네트워크에서 포워딩 기법의 성능 분석용으로 작성된 시뮬레이터[10-12]를 수정하여 10 × 10, 14 × 14, 20 × 20 클러스터들로 구성되는 세 가지 크기의 센서 네트워크에서 수행하였으나, 결과 그래프가 유사하기 때문에 본 논문에서는 10 × 10 센서 네트워크 모델에서의 시뮬레이션 결과를 성능 분석에 사용한다. 시뮬레이션의 단순화를 위하여 센서 노드들은 각 클러스터의 중앙에 위치한다. 데이터 전송 속도는 8Kbps이며, 클락 질의/응답 메시지 및 클락 동기 메시지의 크기는 모두 10바이트로 고정한다. LIFCS와 SIFCS는 각각 2msec과 1msec으로 지정하였다. 클락 오차 임계치 값으로는 10^{-4} 과 5×10^{-5} 두 개의 값을 사용하며, 모드 전환 결정 시점으로부터 실제 모드 전환 시점까지의 시간 간격은 100초로 고정한다. 그리고, 각 센서노드들의 Clock Drift는 $[-2.375 \mu\text{s/s}, 2.375 \mu\text{s/s}]$ 사이의 값으로 지정하고, 센서 노드들이 초기 클락 동기 모드를 시작하기 이전에 약 12시간의 시간이 지났다고 가정한다.

그림 8은 각 센서 노드들이 클락 질의 메시지의 전송률 DR (Diffusion Rate)의 변화에 따른 센서 네트워크에서의 평균 클락 값에 대한 최대 클락 오차 값의 변화와 모드 전환 결정 시점 (MTDP: Mode Transition Decision Point)을 보여준다. DR이 0.1보다 작은 경우에 최대 클락 오차 값이 줄어드는 속도가 상당히 느림을 알 수 있다. 이에 반하여, DR이 0.5 이상인 경우 최대 클락 오차 값은 짧은 시간 내에 급격히 줄어들 뿐만 아니라, 모드 전환 결정 시점도 50초 이내임을 확인할 수 있다.

그림 9와 그림 10은 모드 전환 결정 시점 MTDP로

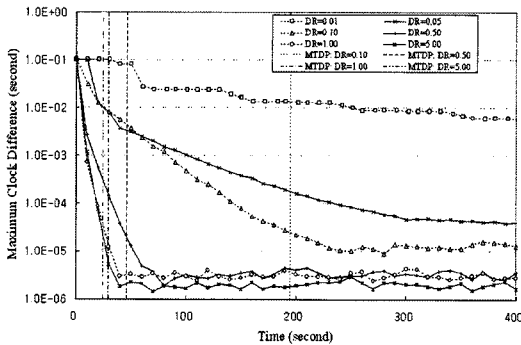


그림 8. DR 변화에 따른 초기 클락 동기 모드에서의 최대 클락 오차 및 모드 전환 결정 시점
부터 100초가 지난 시점인 모드 전환 시점 (MTP:

Mode Transition Point)에 초기 클락 동기 모드로부터 주기적인 클락 동기 모드로 전환한 경우에, 센서 네트워크에서의 평균 클락 값에 대한 최대 클락 오차 값의 변화를 보여준다. 그림 9는 센서 네트워크에서 허용 가능한 최대 클락 오차인 목표 클락 오차를 1×10^{-4} 으로 지정한 경우의 결과 그래프이며, 그림 10은 목표 클락 오차가 5×10^{-5} 으로 지정된 경우의 결과 그래프이다. 이상의 두 개의 그림으로부터 본 논문에서 제안하는 초기 클락 동기 모드와 주기적 클락 동기 모드가 설계 목적에 따라 정확하게 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

그러나, 제안하는 클락 동기 방법이 센서 네트워크에 적용 가능함을 확인하기 위해서는 적용될 기법들은 제한된 전원으로 동작해야 하는 센서 노드에서 에너지 효율적으로 동작할 수 있음을 검증하여야 한다. 표 1과 표 2는 각각 초기 클락 동기 모드와 주기적 클락 동기 모드에서 송신하는 메시지의 수와 메시지 충돌에 기인하여 저하되는 클락 갱신 성공 비율을

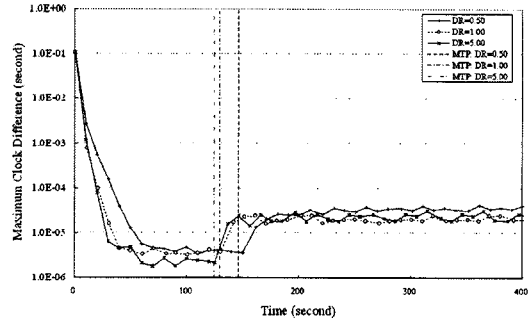


그림 9. 모드 전환 시점을 중심으로 초기 클락 동기 모드와 주기적 클락 동기 모드 (목표 클락 오차 = 5×10^{-5})에서의 최대 클락 오차

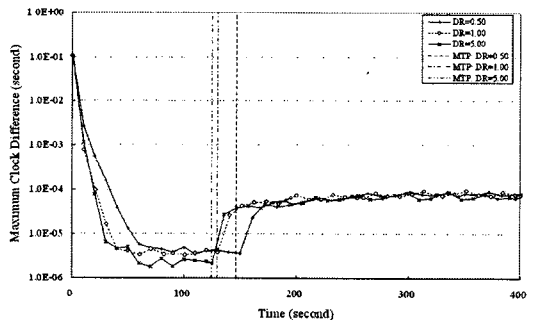


그림 10. 모드 전환 시점을 중심으로 초기 클락 동기 모드와 주기적 클락 동기 모드 (목표 클락 오차 = 1×10^{-4})에서의 최대 클락 오차

보여준다. 송신되는 메시지의 수는 각 클러스터에서 초당 송신하는 메시지의 수로 표시하였으며, 메시지가 도달 가능한 거리에 따라 1-hop 메시지와 2-hop 메시지로 구분하여 표시하였다. 1-hop 메시지와 2-hop 메시지는 각각 1-hop 또는 2-hop 거리의 클러스터에까지 도달 가능한 크기의 전력으로 송신되는 메시지를 의미한다.

표 2로부터 주기적 클락 동기 모드는 메시지 충돌로 인한 클락 갱신 성공 비율의 저하가 없을 뿐만 아니라, 목표 클락 오차를 만족하면서도 송신되는 메시지의 수가 상당히 작음을 확인할 수 있다. 주기적 클락 동기 모드의 우수성을 확인하기 위해서는 표 1에서 DR의 값이 0.05 및 0.10일 때의 메시지 수 및 클락 갱신 성공 비율 결과와 표 2의 결과를 비교할 필요가 있다. 표 1에서 DR 값으로 0.05와 0.10를 선택한 이유는, 해당 DR을 사용할 경우 최대 클락 오차 값이 각각 1×10^{-4} 과 1×10^{-5} 수준임을 그림 8에서 확인

표 1. 초기 클락 동기 모드에서 DR에 따른 메시지 수 및 클락 갱신 성공률 변화표

Diffusion Rate	2-hop Msg. Tx Num/Cluster/Sec	1-hop Msg. Tx Num/Cluster/Sec	Clock Update Success Percentage
0.01	0.010	0.062	100.0%
0.05	0.049	0.303	99.2%
0.10	0.095	0.592	98.4%
0.20	0.182	1.128	96.6%
0.30	0.260	1.614	95.4%
0.40	0.332	2.051	94.0%
0.50	0.396	2.444	93.0%
0.60	0.455	2.795	91.2%
0.70	0.508	3.115	89.7%
0.80	0.556	3.397	89.0%
0.90	0.600	3.663	88.2%
1.00	0.638	3.872	87.0%
2.00	0.883	5.211	79.8%
3.00	0.987	5.694	76.0%
4.00	1.040	5.895	73.7%
5.00	1.072	6.015	72.5%

표 2. 주기적 클락 동기 모드에서 Target Clock Difference에 따른 메시지 수 및 클락 갱신 성공률 변화표

Target Clock Diff.	2-hop Msg. Tx Num/Cluster/Sec	1-hop Msg. Tx Num/Cluster/Sec	Clock Update Success Percentage
1×10^{-4}	0.000	0.190	100.0%
5×10^{-5}	0.000	0.430	100.0%

하였기 때문이다. 표 1에서 해당 DR에서의 결과 값과 표 2의 결과를 비교해 볼 때, 표 2에서는 에너지 소모가 큰 2-hop 메시지 수가 0일 뿐만 아니라, 1-hop 메시지의 수도 표 1의 70% 수준이며, 클락 갱신 성공 비율도 100%임을 확인할 수 있다. 여기서 표 2의 비교 대상인 표 1의 결과물도 메시지 충돌을 줄이고 클락 질의/응답 및 평균값 통지 작업의 Atomic한 동작을 보장하기 위하여, 기존의 비동기 평균 알고리즘에 몇 가지 기법들을 추가한 초기 클락 동기 모드의 성능 결과임에 주의하여야 한다. 표 1로부터 DR의 값이 급격히 증가하더라도, 전송되는 메시지 수의 증가는 완만할 뿐만 아니라 클락 갱신 성공 비율도 완만하게 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

따라서, 본 논문에서 제안하는 클락 동기 방법을 사용하면, 초기에 상당히 큰 클락 오차가 센서 노드들 사이에 존재하더라도, 짧은 시간 내에 초기 클락 동기 모드를 이용하여 모드 전환 결정을 위하여 설정된 클락 오차 임계치 이하로 클락 오차를 낮출 수 있고, 모드 전환 이후에는 작은 수의 메시지로 원하는 목표 클락 오차 수준으로 센서 노드들의 클락 오차를 유지할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는, 주기적으로 무선 모듈을 활성화/비활성화하면서 인접 노드가 깨어나는 시점에 대한 정보를 필요로 하는 기법들에서의 클락 동기를 위하여, 비동기 평균 알고리즘에 기반한 초기 클락 동기 모드, 주기적 클락 동기 모드 및 두 가지 모드 사이의 전환 방법을 설계하고 성능을 분석하였다. 초기 클락 동기 모드는 상당량의 에너지를 소모하더라도 센서 네트워크 구성 시점 초기 몇 십초 또는 수분 내에 신속하게 모드 전환 결정을 위하여 설정된 클락 차이 값 임계치 이하로 센서 노드의 클락 동기를 획득하도록 설계되었다. 이에 반하여 주기적 클락 동기 모드는 최대한 작은 수의 메시지를 이용하여 원하는 목표 값 수준으로 센서 노드들의 클락 차이 값을 유지하도록 설계되었다. 성능 분석을 통하여, 제안한 방법이 센서 네트워크에 적용되는 경우, 초기 클락 동기 모드로 동작하는 초기 짧은 시간 동안은 에너지 소모량이 크지만, 주기적 클락 동기 모드로 동작하는 긴 시간 동안 에너지 소모를 최소화하면서 목표 클락 오차를 유지할 수

있음을 확인하였다. 향후 연구 방향으로, 본 연구 결과를 클러스터 기반 센서 네트워크에서 메시지 전송 손실 확률 변화에 따라 클러스터 당 무선 송수신 모듈을 활성화하는 노드 수를 동적으로 변화시키는 적응적 토폴로지 관리 기법에 적용하려 한다.

참 고 문 헌

[1] I.F. Akyildiz, W.Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, August 2002.

[2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," *In Proc. IEEE INFOCOM 2002*, pp. 1567-1576, June 2002.

[3] M. Zorzi and R. R. Rao, "Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 2, No.4, pp. 337-348, Oct.-Dec. 2003.

[4] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space," *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol. 1, No. 1, pp. 70-80, January-March 2002.

[5] Q. Li and D. Rus, "Global Clock Synchronization in Sensor Networks," *IEEE INFOCOM*, pp. 564-574, 2004.

[6] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync Protocol for Sensor Networks," *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 138-149, 2003.

[7] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 39-49, 2004.

[8] H. Dai and R. Han, "TSync: A Lightweight Bidirectional Time Synchronization Service for Wireless Sensor Networks," *ACM Mobile*

Computing and Communications Review, Vol. 8, No. 1, pp. 125-139, 2004.

[9] 황소영, 정연수, 백윤주, "센서 네트워크에서 신뢰성있는 시각 동기 프로토콜," 한국통신학회논문지, 제31권, 제3A호, pp. 274-281, 2006.

[10] 박태근, "클러스터 기반 센서 망에서 데이터 전달 방법들의 성능 분석," 한국통신학회논문지, 제31권, 제3A호, pp. 304-310, 2006.

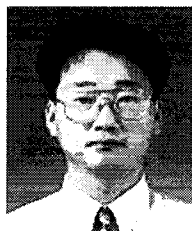
[11] J. Jung, "A Cluster-based Geographic Forwarding Scheme for Wireless Sensor Networks," *Ph.D Dissertation*, POSTECH, Pohang, 2005.

[12] Jongsik Jung, Taekeun Park, and Cheeha Kim, "A Forwarding Scheme for Reliable and Energy-Efficient Data Delivery in Cluster-based Sensor Networks," *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No. 2, pp. 112-114, Feb. 2005.



김 승 목

1988년 한양대학교 전자공학과 (학사)
 1998년 포항공과대학교 정보통신학과 (석사)
 2005년 3월~현재 단국대학교 컴퓨터과학과 박사 과정
 관심분야 : 인터넷 및 초고속망에서의 QoS(Quality of Service), 유무선망에서의 라우팅, 유무선망에서의 멀티미디어 통신



박 태 근

1991년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (학사)
 1993년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 2004년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (박사)
 1996년~2000년 SK Telecom 중앙연구원 선임 연구원
 2000년~2001년 3Com Korea 과장
 2001년~2002년 Ericsson Korea 차장
 2004년~현재 단국대학교 컴퓨터학부 멀티미디어공학 전공 조교수
 관심분야 : 이동 통신, QoS, 센서 네트워크, 콘텐츠 유통/서비스, 멀티미디어 통신망