

碩士學位請求論文

자가충전 센서노드 기반의 효율적인
데이터 전달 프로토콜 제안



濟州大學校 大學院

컴퓨터工學科

姜旻成

2007 年 12 月

자가충전 센서노드 기반의 효율적인 데이터 전달 프로토콜 제안

指導教授 金 度 縣

姜 旻 成

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2007 年 12 月

姜旻成의 工學 碩士學位 論文은 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2007 年 12 月

Effective Data Transfer Protocol based on Self-Chargable Sensor Network

Min-Sung Kang
(Supervised by professor Do-Hyeun Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Computer Engineering

2007. 12.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, _____

Thesis director, _____

Thesis director, _____

November 2007

Department of Computer Engineering
Graduate School
Cheju National University

목 차

그림목차	iii
표 목차	iv
국문초록	v
영문초록	vii
약어표	ix
I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적 및 방법	2
II. 관련연구	4
1. TTDD(Two-Tier Data Dissemination)	4
1) 그리드 구성	5
2) 질의 전달	6
3) 감지 정보의 전달	7
2. 센서 네트워크를 위한 평면 라우팅 프로토콜	9
1) DD	10
2) SPIN	11
3) SAR	12
4) MEF	12
3. 센서 네트워크를 위한 클러스터링 기반 계층적 라우팅 프로토콜	14
1) LEACH	15
2) TEEN	16
3) APTEEN	17
4. 데이터 전달 프로토콜 설계시 고려사항	18
III. 자가충전 센서노드 기반 데이터 전달 프로토콜	20
1. 개요	20

2. 메시지 및 라우팅 캐시 정의	21
1) 데이터 알림 메시지	21
2) 질의 메시지	22
3) 라우팅 캐시	22
3. 주요 동작 알고리즘	23
1) 감지대상 발견 및 데이터 알림	23
2) 질의 메시지 전달	25
3) 감지정보 전달	26
4) 싱크노드의 이동에 따른 동작 방법	27
5) 감지대상의 이동에 따른 동작 방법	28
4. 제안할 방안과 TTDD의 기본 동작 비교	30
1) 기본 동작 비교	30
2) 싱크노드에 이동시 동작 비교	31
3) 감지대상에 이동시 동작 비교	32
IV. 성능평가	34
1. 시뮬레이션 환경	34
1) 변수 선언	34
2. 시뮬레이션 결과	34
1) 메시지부하 비교	36
2) 에너지 소모량 비교	40
V. 결론	42
참고문헌	43

그림 목 차

그림 1. 소스노드의 감지대상 발견	5
그림 2. 소스노드를 중심으로 $\alpha \times \alpha$ 의 그리드 생성	6
그림 3. 싱크노드에서 소스노드까지 질의 전달	7
그림 4. 소스노드에서 싱크노드까지 감지정보 전달	7
그림 5. 싱크노드에 이동시 감지정보 전달 방법	8
그림 6. 소스 노드에 이동시 감지정보 전달 방법	9
그림 7. Directed Diffusion의 동작	10
그림 8. SPIN의 동작	11
그림 9. 최소 에너지 경로를 따른 데이터 전송	13
그림 10. 클러스터 기반의 계층적 무선 센서 네트워크	14
그림 11. LEACH의 프레임구조	15
그림 12. TEEN의 동작	16
그림 13. AOTEEN의 프레임구조	18
그림 14. 자가충전 센서노드 기반의 센서 네트워크 구조	20
그림 15. 감지대상 발견 및 경로 재사용 알고리즘	24
그림 16. 감지대상 발견 및 데이터 알림	25
그림 17. 싱크노드에서 소스노드까지 질의전달	26
그림 18. 소스노드에서 싱크노드까지 감지정보 전달	27
그림 19. 싱크노드에 이동시 감지정보 전달 방법	28
그림 20. 감지대상의 이동시 감지정보 전달 방법	29
그림 21. 제안된 프로토콜과 TTDD의 기본기능 비교	31
그림 22. 제안된 프로토콜과 TTDD의 싱크노드 이동시 비교	32
그림 23. 제안된 프로토콜과 TTDD의 감지대상 이동시 비교	33
그림 24. 감지 대상의 이동 횟수에 따른 메시지 부하	38
그림 25. 흡수에 따른 메시지 부하	39
그림 26. 감지 대상의 이동 횟수에 따른 에너지 소비량	41

표 목 차

표 1. ADV_MSG 제어 메시지	22
표 2. REQ_MSG 제어 메시지	22
표 3. 라우팅 캐시의 속성	23
표 4. 성능 분석을 위한 변수	38



국문초록

자가충전 센서노드 기반의 효율적인 데이터 전달 프로토콜 제안

컴퓨터공학과 강민성

지도교수 김도현

USN은 센서로부터 사물이나 환경정보를 감지하고 이러한 정보를 수집하여 상황인식정보나 다른 지식컨텐츠로 활용하기 위함이다. 이러한 USN은 최초 군사용 목적으로 개발되어 사람이 쉽게 접근할 수 없는 지역에 데이터를 수집하기 위해 초소형, 저비용, 저전력에 센서 노드를 필드에 뿌려 데이터를 수집하기 위한 목적으로 개발되었다. 그러나 센서 노드가 저전력을 구현하고 있지만 에너지 문제에 자유롭지 못하다. 에너지에 고갈은 센서 네트워크 망을 유지하는데 아주 중요하다. 센서 노드의 에너지 소비는 센싱, 통신, 데이터 처리로 분류되는데 그 중 통신이 에너지 소비가 가장 많다. 그래서 이러한 에너지 소비를 줄이기 위해 많은 라우팅 프로토콜이 제안되었다. 하지만 오늘날 USN을 공공, 개인용 등에 목적으로 활용되면서 센서 노드에 솔라셀, 풍력 등을 이용하여 자가충전이 가능한 센서노드들이 개발되었다. 하지만 자가 충전 센서 노드는 일반 센서 노드에 비해 가격이 높고 크기가 크기 때문에 모든 센서노드를 구성하기에는 현실적으로 어려움이 있으며 기존에 제안된 프로토콜을 적용하기에는 효율적이지 못하다.

본 논문에서는 이러한 자가충전 센서노드와 일반 센서노드를 혼용하여 일반 센서노드에 에너지 소비를 최소화하는 데이터 전달 프로토콜을 제안하였다. 또한 기존의 일반 센서 네트워크에서 그리드를 이용하여 감지 정보를 효율적으로 전송하고 싱크에 이동성을 고려한 TTDD 라우팅 프로토콜을 분석 및 비교하고 수학적 분석을 통해 TTDD와 제안한 자가충전 센서노드 기반의 센서 네트워크에 전체 비용을 비교 분석하였다.

ABSTRACT

Effective Data Transfer Protocol based on Self-Chargable Sensor Network

KANG, MIN-SUNG

Department of Computer Engineering

Graduate School

Cheju National University

USN is to sense the environmental information from its sensor, and collect information to utilize conditional recognizable information or other intelligent contents. USN was developed for the military purpose to collect information that humans can hardly reach by distributing sensor nodes at low cost, low electricity and minimized size.

Although the sensor node does save electricity, it is still not from energy issue. Energy exhaustion is a controversial issue to maintain sensor network. The energy consumption of sensor node is classified as sensing, communication and data processing, the communication is the most energy consuming element.

In order to reduce such energy consumption, various communication protocol is suggested. However, today's USN is being utilized as public and personal purpose. Due to the changes of this trend, self-chargable sensor node is developed, researched and utilized to supply power to sensor nodes by using solar cell and wind power. However, it is hard to generalize all sensor nodes as the self-sensor, because the self-sensor nodes is much more expensive and bigger than the existing sensor nodes. Also, it is not effective

to apply to the existing protocol.

In this paper, it will be discussed how much data transfer protocol, which is the mixture between self-chargable and normal sensor nodes, can minimize the energy consumption. In addition to that, we have compared and analyzed that the information is effectively transferred by utilizing grid on the existing normal sensor network, and researched TTDD, the communication protocol, and compared the total cost of the self-chargable sensor nodes and TTDD by analysing mathematical model.



약어표

USN	Ubiquitous Sensor Networks
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TTDD	Two-tier Data Dissemination in Large-scale Wireless Sensor Networks
MATLAB	Matrix Laboratory
SAR	Sequential Assignment Routing
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
AVG	Advertise
REQ	Request
QoS	Quality of Service
TDMA	Time Division Multiple Access
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
VMS	Virtual Memory System

1. 서론

1. 연구배경

USN(ubiquitous sensor network)은 센싱필드 또는 목적지에서 발생하는 현상을 감지하는 센서노드와 최종적으로 유용한 데이터 또는 정보를 추출하는 싱크노드로 구성된다.[1] 미래의 인간 실생활과 밀접한 USN은 교통, 기후, 환경 및 개인의 위치정보 등과 같은 상황인지 분야에 활용되고 있다.

USN은 무선 애드혹 네트워크의 동작과 유사하지만 네트워크의 규모, 에너지 효율, 노드 자원의 제약 등에서 무선 애드혹 네트워크와 기술적인 차이점을 가진다. 무선 애드혹 네트워크는 통신 인프라가 없는 환경에서도 이동 노드들간의 통신을 위해 사용되지만, USN은 센서노드를 통해 환경에 대한 정보를 수집하기 위한 목적으로 사용된다.[2]

USN을 구성하는 센서 노드들은 센서 노드(sensor node)와 싱크 노드(sink node)로 구성된다. 센서 노드가 주변 환경에서 발생한 정보를 센싱하게 되면, 센싱된 정보를 프로세싱한 후 싱크 노드로 전송한다. 싱크 노드는 센서 노드들로부터 정보를 수집하고, 인터넷을 통해 원격지의 사용자에게 수집된 정보를 전송하는 게이트웨이(gateway) 역할을 한다. 사용자는 싱크 노드를 통하여 센싱 필드에 질의를 보내거나 센싱필드(sensing field)에서 수집된 데이터를 전달 받을 수 있다.[3] 또한, USN을 구성하는 수많은 센서노드들은 사람의 접근이 용이하지 않은 환경에서 동작할 수 있어야 하며 배터리 교환 없이 오랜 시간동안 동작할 수 있어야 한다. 따라서, 센서노드는 초소형, 저비용, 저전력에 특징을 가지고 있다.

제한된 배터리 용량을 사용하는 센서노드는 오랜 기간 동작할 수 없기 때문에 각 노드의 수명은 네트워크의 수명에 영향을 준다.

센서노드의 동작은 크게 센싱, 통신, 데이터 처리로 분류된다. 그중에서도 망을

유지하고 데이터를 송수신하는 통신 분야가 가장 많은 에너지를 소모한다. 일반적으로 인접한 센서 노드들은 유사한 정보의 데이터를 수집하기 때문에 데이터의 중복 전달로 인한 에너지 소모가 가장 크다. 따라서, 센서 네트워크의 에너지 효율성을 향상시킬 수 있는 라우팅 프로토콜의 개발이 중요하다.

2. 연구 목적 및 방법

지금까지 센서 네트워크를 위한 수많은 라우팅 프로토콜들이 제안되었다. 기존 라우팅 프로토콜은 센싱 데이터를 인접한 센서노드로 반복적인 포워딩을 통해 싱크 노드까지 데이터를 전송하였다. 하지만 싱크노드 또는 센서노드의 이동성이 발생하는 USN에서는 센싱 데이터를 네트워크 전체에 포워딩해야 하기 때문에 에너지 소비가 매우 심각하다. 이와 같은 불필요한 에너지 소비를 줄이기 위해서는 센서 네트워크 전체에 데이터를 브로드 캐스팅하는 센서 노드를 선정하고 선정된 노드를 중심으로 데이터를 싱크노드까지 전송하는 라우팅 프로토콜 및 클러스터링 기법들이 제안되었다.[3][4][5] 하지만 이러한 기법들은 통신 부하를 줄이고 센서 네트워크의 수명을 향상시켰지만, 불필요한 에너지 소모에 대한 문제점을 가지고 있다.

센서 네트워크는 초기 통신 인프라를 구축하기 어려운 전투지역과 같은 위험 지역 등에 사용하기 위해 배터리를 가지고 있다. 그러나 최근에는 공공 및 개인 용도로도 활용되면서 센서노드에 솔라셀, 풍력 등을 이용하여 전력공급이 가능한 자가 충전형 센서노드들이 개발 되었다. 그러나 다수의 자가 충전형 센서노드들로 구성된 센서 네트워크의 에너지 소모량을 감소시키기 위해 기존의 라우팅 프로토콜들을 적용하기에는 부적합하다.

따라서, 본 논문에서는 자가충전이 가능한 센서노드를 적용한 센서 네트워크의 수명을 연장하기 위한 라우팅 프로토콜을 제안한다. 또한 싱크의 이동성을 고려한 라우팅 프로토콜인 TTDD(Two-tier Data Dissemination in Large-scale

Wireless Sensor Networks)[6]와의 성능비교를 통해 제안할 방안의 우수성을 입증한다. TTDD는 지역적인 플러딩과 그리드를 이용하여 기존의 프로토콜에서 고려되지 못한 싱크에 이동성을 제공하고 그리드를 이용하여 메시지 부하를 줄임으로써 에너지 효율을 높이는 프로토콜이다.

자가충전 센서노드는 아직 개발 초기 단계이고 일반적인 센서노드에 비해 가격이 비싸고 자가충전을 위한 부분이 추가되면서 크기 또한 크다. 그래서 센서 네트워크에 모든 센서노드를 자가충전 노드로 적용하기에는 현실적으로 많은 어려움이 있다.

제안하는 프로토콜은 일반 노드와 자가충전이 가능한 센서노드를 혼용하여 TTDD의 전파노드에 역할을 자가충전 센서노드로 대체하고 제안된 프로토콜을 적용함으로써 일반 센서노드에 메시지 부하를 줄여 USN의 에너지 소비를 최소화한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 센서 네트워크에 대한 개념과 싱크에 이동성을 제공하는 TTDD의 동작방식을 분석한다. 3장에서는 자가충전 센서노드를 적용한 프로토콜을 제안하고 4장에서는 TTDD와의 수학적 비용 분석을 통해 자가충전 센서노드에 성능을 분석하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련연구

본장에서는 TTDD, DD, SPIN 등과 같은 기존 라우팅 방안들에 대해 살펴본다. 무선 센서 네트워크의 라우팅 기법은 응용에 따른 센서 네트워크의 종류에 따라 그 효율성이 영향을 받게 된다. 무선 센서 네트워크는 크게 사전적 네트워크(proactive network)와 반응적 네트워크(reactive network) 두 종류로 나뉜다. 사전적 네트워크는 노드들이 주기적으로 센서와 송신부의 스위치를 켜서, 환경을 감시하고, 응용의 관심(interest)에 속하는 데이터를 전송한다. 그래서, 주기적인 간격으로 네트워크의 상태를 파악할 수 있도록 하므로, 주기적인 데이터 감시를 요하는 응용에 적합하다. 반응적 네트워크는 노드들이 연속적으로 환경을 감지하여 감지된 속성값의 갑작스런 변화에 즉시 반응한다. 그래서, 이는 침입 탐지나 폭발 탐지와 시간 임계적인 응용에 적합하다. 이러한 무선 센서 네트워크에 적용될 무선 ad-hoc 라우팅 기법은 크게 평면 라우팅(flat routing)과 계층적 라우팅(hierarchical routing) 프로토콜로 나뉘어 진다.

평면 라우팅은 네트워크 전체를 하나의 영역으로 간주하여 모든 노드들이 동등하게 라우팅에 참여할 수 있고 멀티홉 라우팅을 특징으로 한다. 반면에, 계층적 라우팅은 네트워크를 클러스터링을 기반으로 한 다수의 영역으로 분할하여 각각의 영역내 특정 노드에 헤드의 역할을 부여하여 라우팅을 수행하도록 한다.

1. TTDD(Two-Tier Data Dissemination)

TTDD[2][6]는 USN 환경에서 복수의 이동 싱크를 고려한 네트워크 프로토콜이다. 기존의 경로 설정을 기반으로 하는 센서 네트워크 프로토콜은 센서노드가 감지 대상을 발견하면 이웃하는 센서노드로 데이터 알림 메시지를 포워딩하고

데이터를 수신한 센서노드는 다시 이웃하는 센서노드로 데이터 알림 메시지를 포워딩한다. 이러한 과정을 반복하면서 센서 필드 전역에 데이터 보고를 위한 메시지를 전달한다. 데이터 메시지를 수신한 싱크노드는 알림 메시지를 보냈던 센서노드로 질의 메시지를 전송함으로써 데이터 전송 경로를 설정하게 된다. 하지만 이러한 방식은 싱크가 이동할 경우 싱크와의 경로를 재설정 해야하기 때문에 센서 필드 전역에 다시 데이터 알림 메시지를 포워딩 해야만 한다. 그래서 싱크의 빈번한 위치 정보의 갱신으로 인한 센서노드의 빠른 배터리 소모를 야기 한다. TTDD는 이러한 문제를 해결하기 위해 그리드와 지역적인 플러딩을 이용하여 싱크의 이동성을 제공한다. TTDD의 동작 과정은 그리드 구성, 질의 전달, 감지 정보 전달의 3단계로 수행된다.

1) 그리드 구성

TTDD에서 그림 1과 같이 센서노드중 감지 대상을 발견한 센서노드가 소스노드가 된다. 이러한 소스 노드는 그림 2처럼 감지 대상을 발견하자마자 센서 필드에서 자신을 중심으로 $\alpha \times \alpha$ 의 그리드를 구성한다.

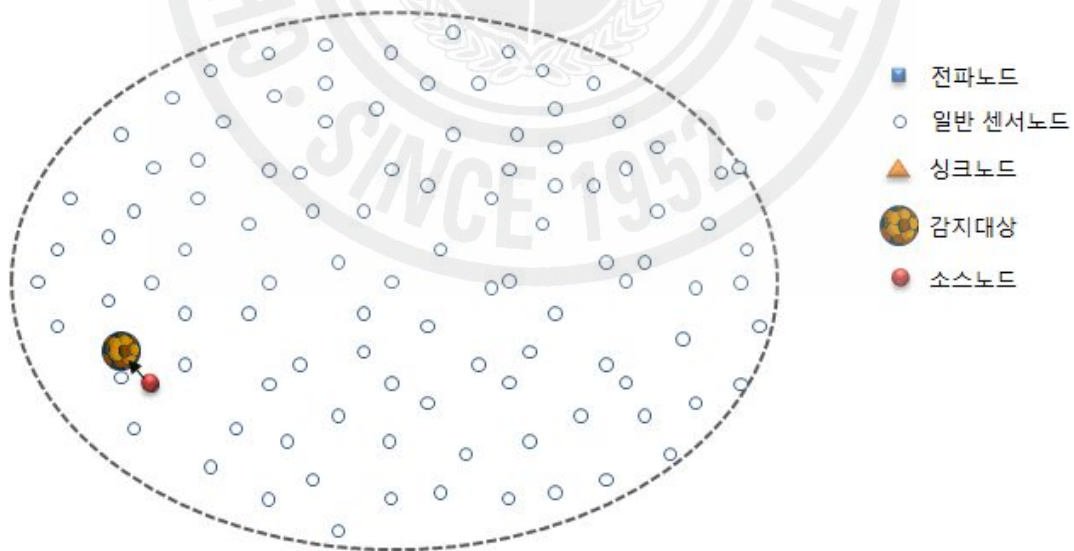


그림 1. 소스노드의 감지대상 발견

그리드는 소스노드가 감지대상을 발견하면 자신을 중심으로 4개의 전파 지점을 선택하고 이 지점으로 데이터 알람 메시지를 보낸다. 데이터 알람 메시지를 받은 전파 지점과 가장 가까운 위치의 센서노드는 전파 노드가 되고 데이터 알람 메시지를 보낸 업스트림의 이웃 전파 노드의 위치를 저장한다. 전파 노드는 소스 노드와 같은 방식으로 이웃 전파 노드를 선택하고 데이터 알람 메시지를 보낸다. 이러한 과정을 반복하여 센서 필드 전역에 그리드 구조로 구성된다.

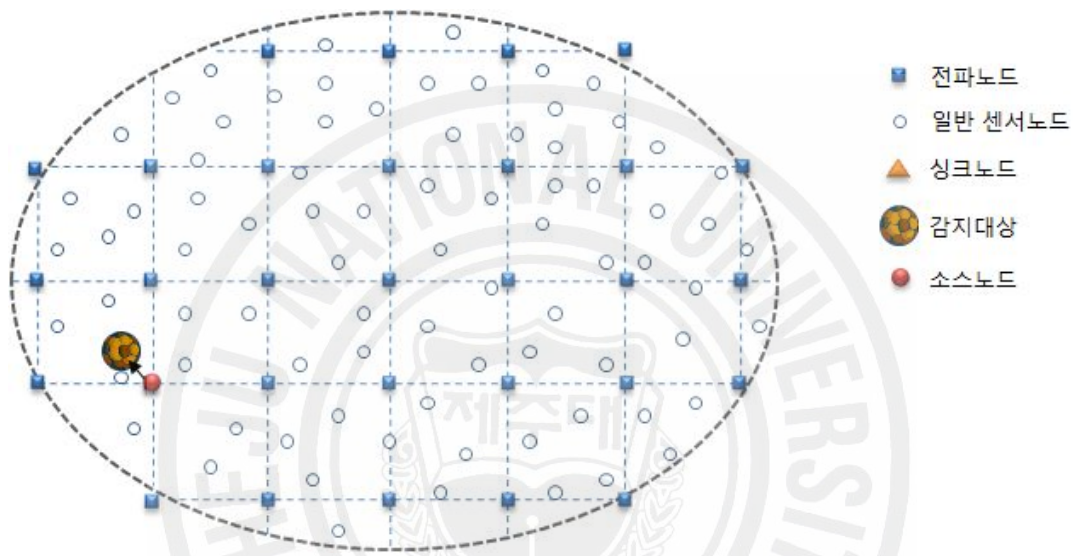


그림 2. 소스노드를 중심으로 $a \times a$ 의 그리드 생성

2) 질의 전달

감지 정보가 필요한 싱크 노드는 그림 3에서와 같이 이동시마다 자신을 중심으로 일정 반경내에 질의를 플러딩한다. 이러한 질의는 플러딩되는 최대 전송거리가 포함되어 있다. 싱크가 질의를 플러딩한 일정 거리내에 전파 노드가 질의를 받았을 때, 전파 노드는 데이터 알람 메시지를 받았던 이웃 전파 노드로 질의를 포워딩한다. 각 전파 노드는 질의를 보낸 다운스트림의 이웃 전파 노드의 위치를 저장한다. 질의 메시지를 소스 노드가 수신하면 데이터 알람 메시지를 보낼 때 저장한 업스트림의 위치 정보와 다운스트림의 위치 정보를 이용하여 소스 노드에서 싱크 노드까지 양방향 경로가 설정된다.

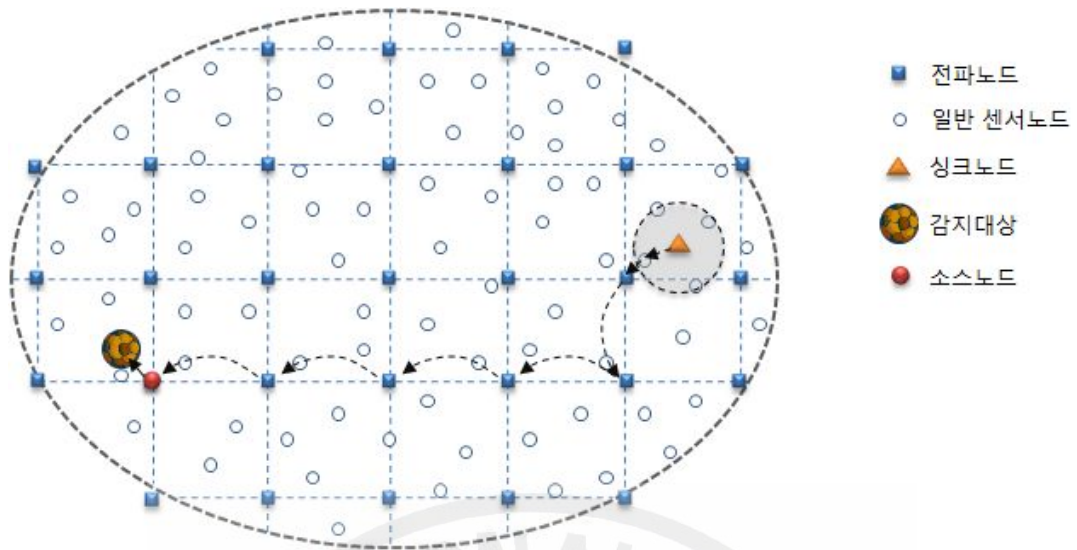


그림 3. 싱크노드에서 소스노드까지 질의 전달

3) 감지 정보의 전달

소스 노드가 질의 메시지를 받으면 질의를 보냈던 다운 스트림의 이웃 전파 노드로 감지 정보를 전달한다. 이를 받은 전파 노드는 자신에게 질의를 보냈던 이웃 전파노드로 감지 정보를 전달한다. 이러한 과정을 반복하여 그림 4와 같이 싱크 노드까지 감지 정보를 전달 할 수 있다.

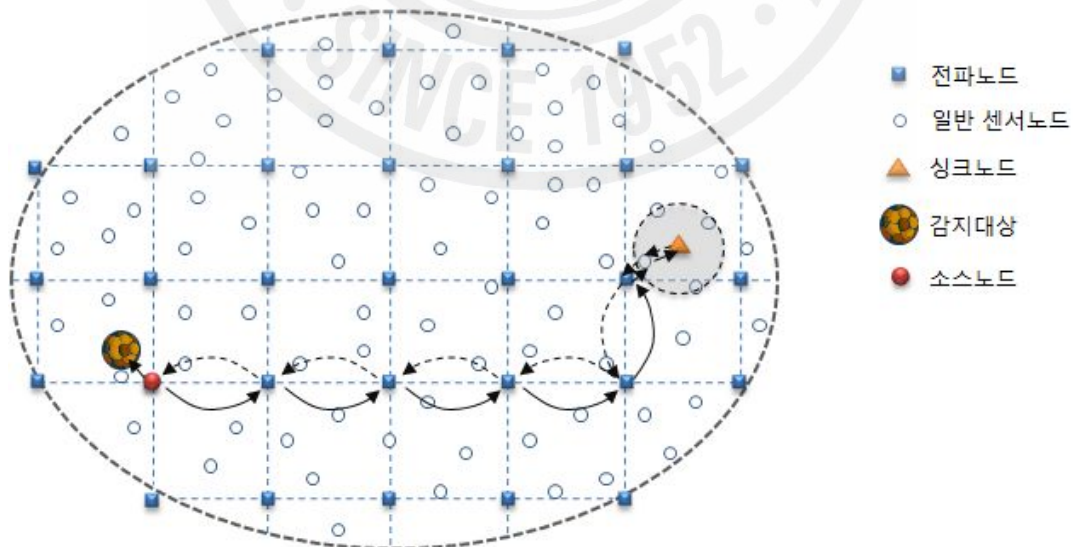


그림 4. 소스노드에서 싱크노드까지 감지정보 전달

싱크노드가 이동할 경우 그림 5와 같이 싱크 노드를 중심으로 일정 반경내에 질의 메시지를 플러딩하고 질의 메시지를 받은 전파 노드는 이웃 전파 노드로 질의 메시지를 전달한다. 과정을 반복하는 동안 질의 메시지를 받은 전파 노드가 소스 노드까지에 경로가 이미 생성되었다면 생성된 경로를 재사용한다. 따라서, 질의 메시지를 소스 노드까지 전송하지 않아도 된다. 하지만 싱크노드에 이동위치에 따라 최악의 경우엔 소스 노드까지 새로운 경로를 생성해야 한다.

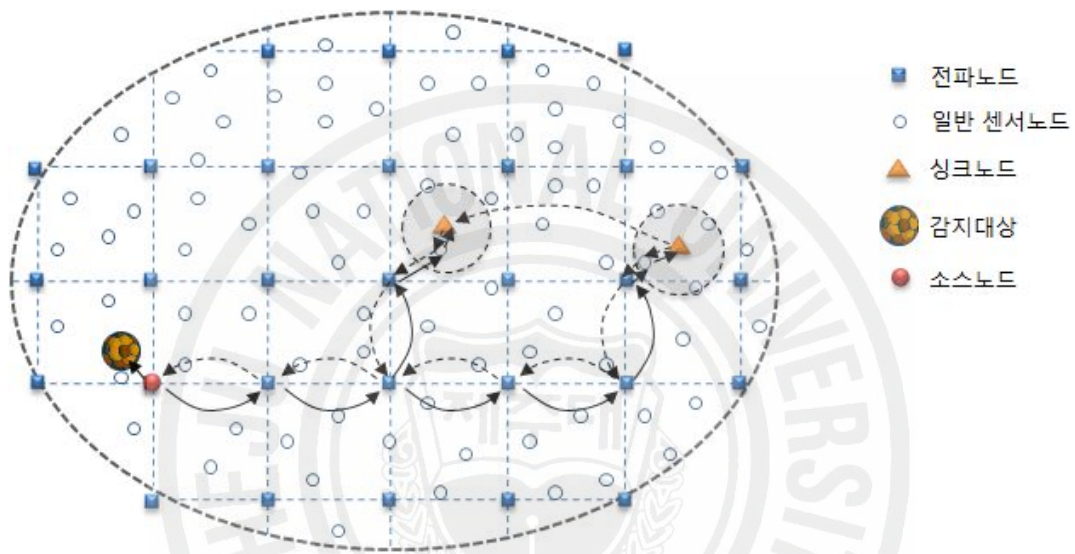


그림 5. 싱크노드에 이동시 감지정보 전달 방법

TTDD는 싱크의 이동성을 효율적으로 고려하고 있다. 하지만 그림 6에서와 같이 감지 대상이 이동시 소스 노드 역할을 하는 센서노드가 변하기 때문에 소스 노드 역할을 하는 센서노드를 중심으로 새로운 그리드를 구성해야 하며, 센싱 필드 내에 감지 대상이 복수일 경우에는 그리드 재구성을 위한 메시지 수가 증가하기 때문에 에너지 소모량이 증가한다.

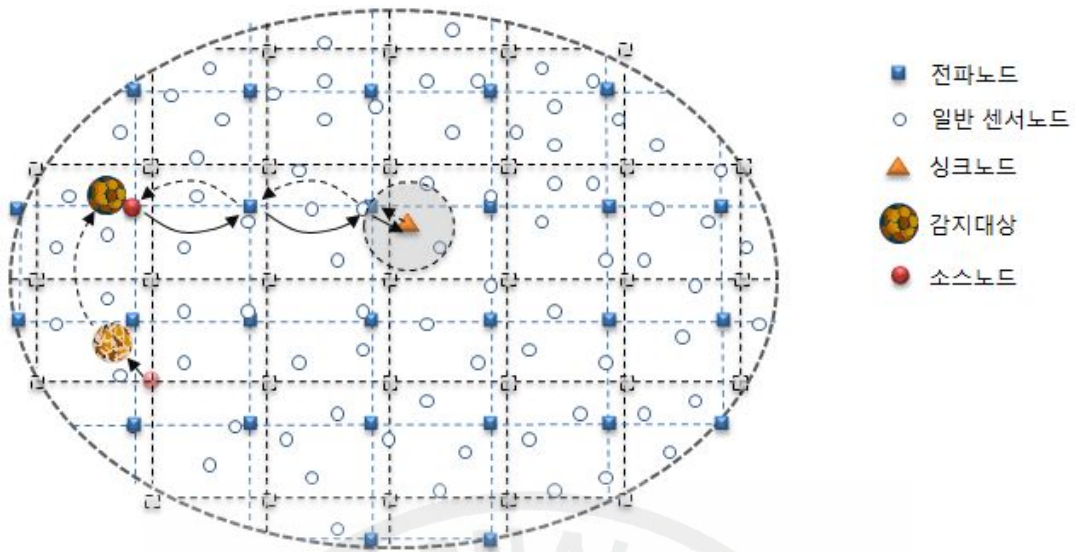


그림 6. 소스 노드에 이동시 감지정보 전달 방법

2. 센서 네트워크를 위한 평면 라우팅 프로토콜

센서네트워크에 기존 무선 애드혹 평면 라우팅 프로토콜을 사용할 경우, 다음과 같은 문제점을 가진다. 요구 기반(on-demand) 방식을 적용할 경우, 수백에서 수천개의 노드들이 경로를 찾기 위한 경로 요청 메시지들이 발생하게 되어 많은 에너지가 소비되고, 많은 지연이 발생하게 된다. 테이블 기반(table-driven) 방식에서는 센서 노드가 네트워크내 수많은 노드까지의 경로를 유지하는데 한계가 존재한다. 즉, 센서 노드의 메모리 용량이 수백 Kbytes 정도이므로, 수백 개에서 수천 개에 이르는 노드들에 대한 정보를 가진 라우팅 테이블을 유지하고 관리하는 것은 사실상 힘들다. 그러므로, 속성 기반 어드레싱, 에너지 소비의 분산, 수집 정보의 전달 과정에서 인접한 노드간의 유사한 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비를 줄이기 위한 “데이터 모음(data aggregation)” 등을 수용한 간단한 평면 라우팅 알고리즘이 필요하다.

1) DD(Directed Diffusion)[8]

Directed diffusion은 싱크의 질의 방송에 기반을 둔 데이터 중심적 라우팅 기법으로 질의 유포 및 처리 응용에 적합한 특성을 가진다. 그림 7은 Directed Diffusion의 동작을 나타낸 것이다.

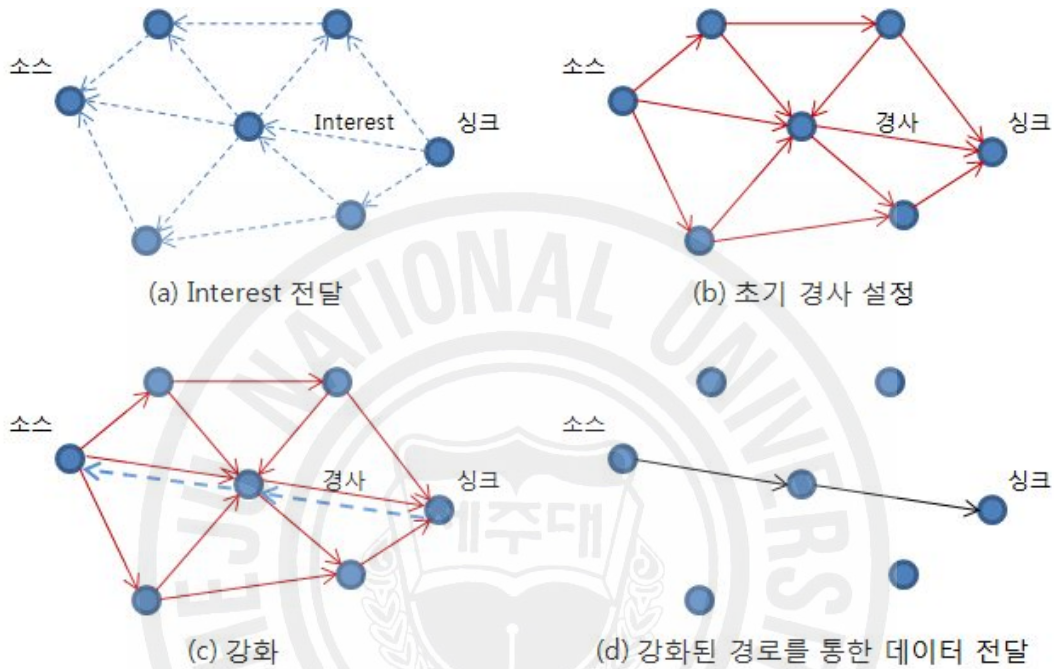


그림 7. Directed Diffusion의 동작

Directed diffusion에서 해당 응용에 대한 질의는 속성과 값의 쌍으로 구성되는 interest로 표현된다. Interest는 싱크에서 시작되어 네트워크 전체에 유포되고, 데이터 요청 노드로 질의에 부합하는 데이터를 전송하기 위한 경사(gradient)가 설정된다. 이때, 데이터는 다중 경로를 통해 요청 노드로 전송된다. 더 이상의 플러딩을 막기 위해 경로들 중 전송 품질이 좋은 몇 개의 경로들이 강화(reinforcement)되어, 강화된 경로를 통해 데이터 전송이 이루어진다. Directed diffusion의 이러한 정보 검색 방법은 요청 노드가 일정 기간 동안 질의에 부합하는 데이터를 요구하는 지속성 질의(persistent query)에 적합하다. 그러나, 경로를 단지 한번만 사용하는 형태의 질의에는 적합하지 않은 특성을 가진다. 또한, 이 프로토콜에서는 전송 경로의 중간 노드에서 데이터가 모아지므로 인접 노드

들이 유사한 데이터를 가지는 센서 네트워크의 특성을 완전하게 이용하지 못한다.

2) SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)[9]

SPIN은 협상과 자원 적응에 의해 플러딩의 결함을 처리하기 위해 설계된 것으로, 센서 노드가 데이터에 대해 광고하고, 싱크로부터 요청을 기다리는 형태의 데이터 중심점 라우팅 기법이다. 이는 센서 노드가 데이터를 방송하는 대신 센서 데이터를 기술하는 메타 데이터를 전송하여 보다 효율적으로 동작하고 에너지를 보존하도록 한다. 그림 8은 SPIN의 동작을 나타낸 것이다.

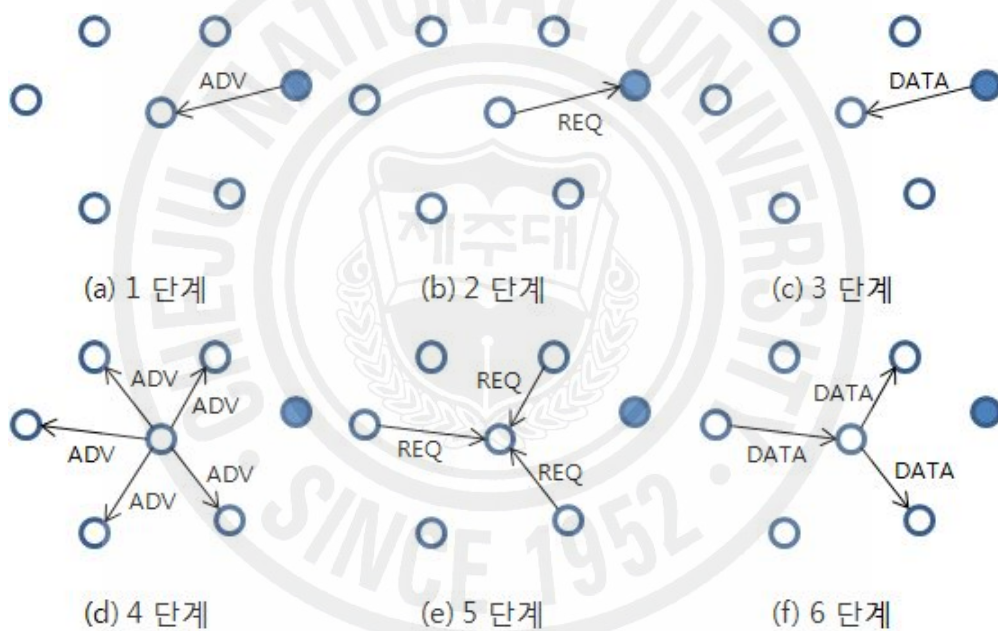


그림 8. SPIN의 동작

SPIN은 ADV(Advertisement), REQ(Request), DATA 등의 세가지 메시지를 가진다. 센서 노드는 메타 데이터를 가지는 ADV 메시지를 방송한다. ADV의 메시지를 수신한 이웃 노드가, 데이터에 대한 관심을 가지고 REQ 메시지를 전송하면, 해당 이웃 노드를 위한 DATA 메시지를 전송한다. 따라서, 전체 센서 네트워크에서 해당 데이터에 관심있는 센서 노드들은 데이터에 대한 사본을 얻게 된다.

SPIN은 가까이 있는 노드들이 유사한 데이터를 가지는 속성을 활용하여, 다른 노드가 가지지 않는 데이터만을 분배하도록 한다. 또한, 사전적으로 동작하여, 사용자가 데이터를 요청하지 않은 경우에도 네트워크 전체에 정보를 분산시킨다.

3) SAR(Sequential Assignment Routing)[10]

SAR에서는 라우팅 결정을 위해 각 경로에 있는 에너지 자원과 QoS, 그리고, 각 패킷의 우선 순위를 고려한다. 트리 구조의 다중 경로가 설정되어, 특정 경로가 실패하는 경우에도 경로 재계산을 위한 오버헤드가 없다. 각 노드에서 싱크까지의 다중 경로를 설정하기 위하여 싱크의 1홉 이웃들을 시작으로 낮은 QoS와 에너지 보유량을 가지는 노드들을 피하면서 구성된 다중 트리가 형성된다. 트리 설정 절차가 끝나면, 각 노드는 다중 경로에 속하게 되고, 각 노드는 싱크로 메시지를 전달할 트리를 선택할 수 있게 된다. 각 노드마다 다음 두 개의 파라미터가 싱크를 향한 각 경로(트리)와 연관된다.

- 에너지 자원(Energy resources): 해당 센서 노드가 경로를 독점하여 사용할 경우 전송할 수 있는 패킷 수
- 추가 QoS 메트릭(Addictive QoS metric): 해당 값이 높을수록 낮은 QoS를 의미

SAR에서는 addictive QoS metric과 패킷의 우선 순위와 관련된 가중치(weight) 계수의 곱인 weighted QoS metric을 계산하여 이의 평균값을 네트워크의 생존 기간 동안 최소화시키고자 한다. 위상 변화에 반응하기 위하여, 주기적인 경로 재계산이 싱크에 의해 시작된다. 실패에 대한 복구는 이웃 노드간의 핸드셰이킹 절차를 통해 이루어지고, 지역 경로 복구 기법도 사용된다. 또한, 지역적인 협력 정보 처리를 위한 Single Winner Election(SWR)과 Multi Winner Election (MWE) 기법이 사용된다.

4) MEF(Minimum Cost Forwarding Algorithm for Large Sensor Networks)[11]

MEF는 센서 네트워크에서 데이터 흐름이 항상 싱크를 향한 방향으로 이루어

지는 특성을 이용하였다. 이 기법에서 센서 노드는 유일한 ID나 메시지를 전송할 라우팅 테이블을 가질 필요 없이 싱크까지의 최소 비용 측정치만을 관리한다.

최소 비용 측정치를 관리하는 동작은 다음과 같다. 싱크에서 비용이 0으로 설정된 광고 메시지를 방송한다. 각 노드는 초기에 무한대로 설정된 측정 집합을 가진다. 노드가 광고 메시지를 수신하여 메시지의 측정치와 해당 메시지를 수신한 링크의 비용의 합이 현재 측정치보다 작다고 판단하면, 이 값으로 현재의 측정치와 ADV 메시지의 측정치를 갱신한다. 새로운 비용 측정치로 광고 메시지가 갱신된 경우에만, 해당 ADV 메시지를 전송하고, 그렇지 않은 경우에는 제거한다. 이러한 과정을 통하여 네트워크 전체에 비용 필드가 구성된다.

비용 필드를 기반으로 한 센서 노드의 데이터 전송은 그림 9와 같다. 비용 필드를 기반으로 각 노드는 전송될 각 데이터 메시지를 방송하고, 데이터 메시지를 수신한 노드는 자신이 소스 센서 노드와 싱크간의 최소 비용 경로에 있는지 체크하여, 해당하는 경우에만 메시지를 방송한다.

노드에서 여러 번의 갱신이 일어나거나 여러 번의 전송을 수행하고, 싱크에서 멀리 떨어진 노드들이 더 많은 갱신이 일어날 수 있는 점을 해결하기 위하여, 현재 비용 측정치를 갱신할 때 백오프 기법을 적용하여, 갱신 시간으로부터 광고 메시지를 수신한 링크 비용의 정수배의 시간이 경과한 후에 광고 메시지를 전송한다.

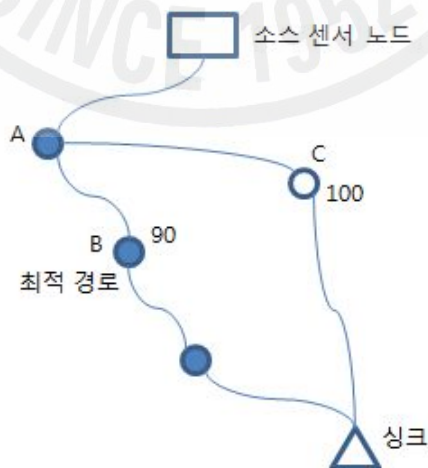


그림 9. 최소 에너지 경로를 따른 데이터 전송

3. 센서 네트워크를 위한 클러스터 기반 계층적 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크에서 인접한 노드간의 유사한 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비를 줄이기 위한 “데이터 병합(data aggregation)”이 필요하다는 특성을 고려할 때 클러스터링에 기반한 계층적 라우팅 기법이 많은 장점을 가진다. 즉, 로컬 클러스터를 형성함으로써 인접한 지역에서 발생한 사건에 대한 유사한 정보를 클러스터 헤드로 전송하고 클러스터 헤드가 데이터 모음을 수행하여 보다 에너지 효율적인 라우팅이 가능하며, 요청된 질의에 대한 클러스터 헤드에 의한 전달로 비효율적인 질의의 플러딩을 막을 수 있다. 클러스터링 기반의 계층적 라우팅 기법에서는 다음과 같이 가정한다.

- 지속적인 전력이 공급되는 싱크가 모든 센서 노드에 직접 데이터를 전달할 수 있고, 수집 데이터의 저장 및 데이터 가공 등의 에너지 집약적인 기능을 수행한다.
- 센싱 필드내의 센서 노드들은 같은 특성을 가지며, 초기에 같은 에너지가 부여된다.

클러스터 기반 라우팅 프로토콜에서 센서 네트워크는 그림 10과 같이 구성된다.

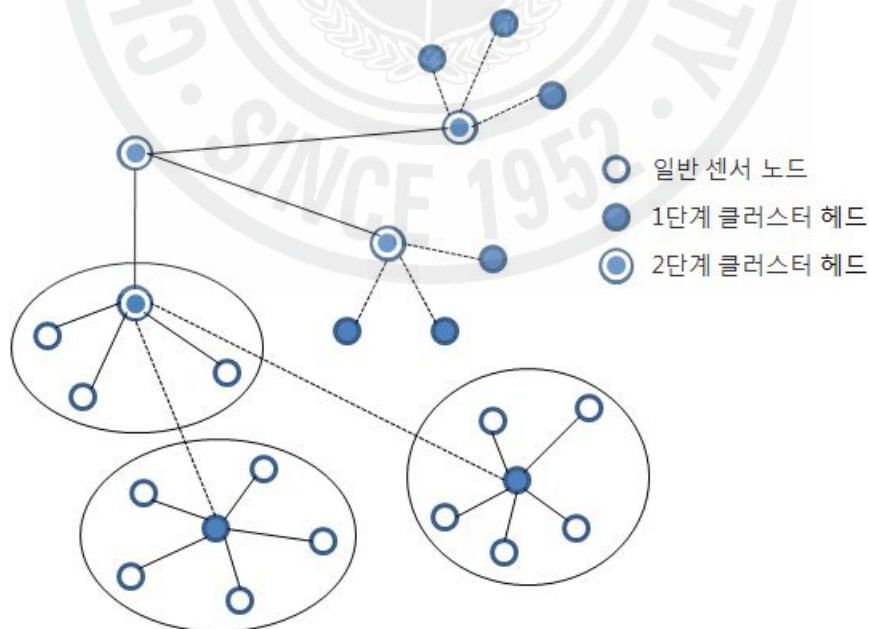


그림 10. 클러스터 기반의 계층적 무선 센서 네트워크

즉, 클러스터라는 작은 영역들로 센서 네트워크가 분할되고, 각 클러스터에는 클러스터 헤더가 존재하여 클러스터 멤버로부터 데이터를 수집하고 이를 모아서 싱크로 전달하거나, 상위 계층 클러스터 헤드로 전달하는 역할을 한다.

1) LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[12]

LEACH는 클러스터링 기반 라우팅 기법으로, 클러스터 헤드가 클러스터의 멤버 노드들로부터 데이터를 수집하여 “데이터 퓨전”을 통해 데이터를 모아서 직접 싱크로 전달한다. 이 기법의 특징은 네트워크에 있는 모든 센서 노드들에 에너지 소비를 공정하게 분산시키기 위해, 에너지 집약적인 기능을 하는 클러스터 헤드를 무작위로 순환시키고, 전체적인 통신 비용을 줄이기 위해 클러스터 헤드에서 클러스터내의 데이터를 모아 지역적으로 퓨전하는 것이다. 이를 위해, LEACH의 동작은 그림 11과 같이 라운드라는 시간 단위로 이루어진다.

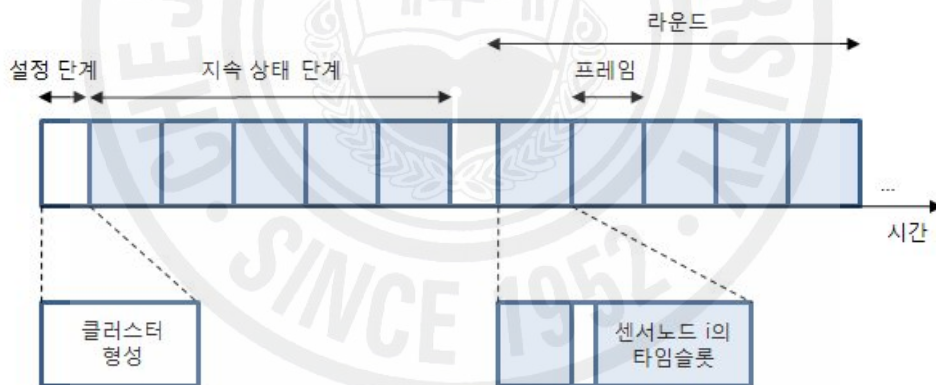


그림 11. LEACH의 프레임구조

각 라운드는 크게 클러스터가 구성되는 Setup 단계와 여러 개의 TDMA 프레임으로 구성되는 steady-state 단계로 이루어진다. 설정 단계의 시작에서 모든 노드는 자신이 현재 라운드 동안 클러스터 헤드가 될 수 있을지에 대해 이전 라운드들동안 클러스터 헤드였는지의 여부와 이상적 클러스터 헤드 수에 기반을 두고 결정한다. 현 라운드동안, 클러스터 헤드가 되기로 결정한 경우, 이를 이웃

센서 노드들에 알린다. 이를 수신한 비클러스터 헤드 노드들은 수신 강도 등의 파라미터를 기반으로 클러스터 헤드를 결정하며, 이를 클러스터 헤드로 전송하여 클러스터가 구성된다. 클러스터가 형성되면, 클러스터 헤드는 클러스터 멤버들의 데이터 전송 순서를 지시하는 TDMA 스케줄을 방송하고, 지속 상태 단계로 간다. 지속 상태 단계에서 각 클러스터 멤버 노드들은 자신의 전송 슬롯에서만 데이터를 전송하고 나머지 슬롯들에서는 sleep 모드로 가서 전력 소모를 줄인다. LEACH에서는 클러스터 내부에서는 TDMA를 사용하여 노드간 간섭을 피하고, 클러스터간의 간섭을 피하기 위하여 각 클러스터들이 서로 다른 확산 코드를 사용하는 방법을 채택한다.

2) TEEN(Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)[13]

TEEN은 센서 노드들이 주기적으로 전송할 데이터를 가지지 않는다는 점을 제외하고, LEACH와 유사하게 동작한다. LEACH가 사전적 센서 네트워크에 적합한 특성을 가지지만, TEEN은 시간 임계적인 데이터를 처리한다는 점에서 반응적 센서 네트워크에 적합하다. TEEN은 LEACH의 클러스터 형성 기법을 사용하나, 데이터 전송 단계에서 그림 12와 같이 다른 방법을 사용한다.

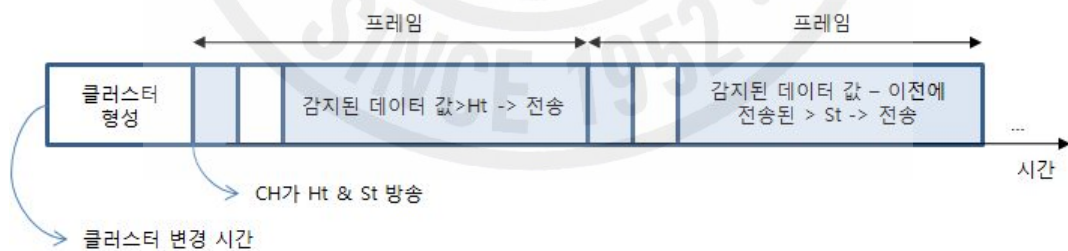


그림 12. TEEN의 동작

TEEN에서 센서 노드들은 클러스터 결정시간에 클러스터 헤드가 방송한 임계값인 Ht와 St에 기반을 두고 현재 감지된 데이터를 전송할지를 결정한다. 즉, 감지된 데이터의 값이 처음으로 Ht 를 초과하면, 이를 저장하여, 해당 시간 슬롯에 전송한다. 이후에는 감지된 데이터의 값이 저장된 값보다 St이상 큰 경우에 저장

하고, 해당 시간 슬롯에 전송한다.

TEEN은 지진, 폭발 등과 같은 응용에서 요구되는 시간 임계적인 데이터가 실시간적으로 전달되고, 임계값이 클러스터 형성 결정 시간에 방송되므로 응용에 따라 사용자가 에너지 소비와 센서 네트워크 상태 판단의 정확성을 조절할 수 있다는 특징을 가진다. 반면에, 감지된 데이터의 값이 임계치에 도달하지 않는 경우 네트워크로부터 데이터를 얻어낼 수가 없어 모든 노드가 수명을 다한 경우에도 네트워크의 상태를 판단할 수 없고, 클러스터내에서 TDMA 스케줄링을 사용하여 시계 임계적 데이터의 보고에 지연을 가지며 모든 노드들이 해당 슬롯에 전송할 데이터를 가지는 것이 아니므로 자원이 낭비될 수 있다.

3) APTEEN(Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol)[14]

APTEEN은 사전적 센서 네트워크와 반응적 센서 네트워크의 한계점을 최소화 하면서 둘의 장점을 통합하는 하이브리드 네트워크를 제공한다. APTEEN을 채택한 하이브리드 네트워크에서, 센서 노드들은 데이터를 주기적으로 전송할 뿐만 아니라, 측정된 데이터의 속성 값의 갑작스런 변화에도 반응한다. APTEEN은 TEEN과 유사한 모델을 사용하지만, 다음과 같은 동작의 차이가 있다.

클러스터가 결정되면, 클러스터 헤드는 다음과 같은 파라미터를 전송한다.

- 속성(A): 사용자가 획득하고자 하는 데이터의 물리적 파라미터
- 임계값: H_t , S_t
- TDMA 스케줄
- 카운트 시간(C_t): 두개의 연속적인 보고간 최대 시간 간격

APTEEN은 TEEN과 같은 형태로 시간 임계적 데이터를 처리하고, 사전적 동작을 위해서, 센서 노드가 카운트 시간동안 데이터를 전송하지 않은 경우 데이터를 감지해서 클러스터 헤드로 전송하도록 하여 TEEN의 단점을 개선하였다.

APTEEN에서는 인접한 노드들이 유사한 데이터를 감지하는 특성을 활용하여 인접한 두 노드의 쌍을 지어, 각 쌍에 대해 한 노드만이 질의에 응답하고, 다른 노드는 “sleep” 모드에서 전력 소비를 줄일 수 있도록 한다.

APTEEN은 LEACH와 마찬가지로 클러스터 내부에서는 TDMA를 사용하여 노드간 간섭을 피하고, 클러스터간의 간섭을 피하기 위하여 CDMA를 사용한다. 그러므로, 클러스터 헤드와 싱크간의 전송 충돌을 막기 위해 그림 13과 같이 TDMA 스케줄에 싱크를 위한 별도의 슬롯이 할당된다.

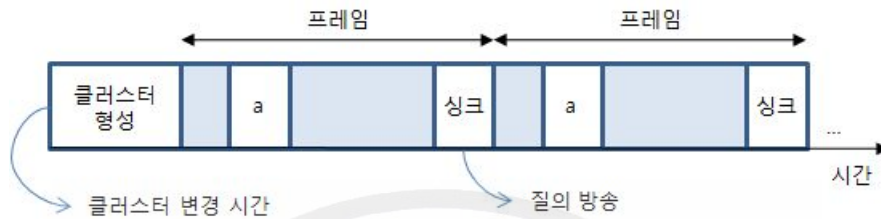


그림 13. APTEEN의 프레임구조

APTEEN은 주기적인 데이터를 전송해서 사용자에게 네트워크의 전반적 상황을 제공하고, 갑작스런 네트워크 상태의 변경에 즉각적으로 반응하여 시간 임계적 상황에 대응하도록 한다. 그리고, 사용자가 카운트 시간과 속성에 대한 임계값을 설정하여 에너지 소비를 제어할 수 있도록 한다. 그러나, APTEEN에서는 임계치 기능과 카운트 시간을 구현하는데 부가적인 비용이 요구되는 단점을 가진다.

4. 데이터 전달 프로토콜 설계시 고려사항

센서 기술, MEMS 기술, 저전력 전자공학 기술, 저전력 RF 설계 기술 등의 발달로 무선 네트워크를 통하여 연결될 수 있는 소형, 저비용, 저전력의 센서 노드들이 개발되었다.[15] 이러한 센서 노드들은 센싱, 데이터 처리, 통신 컴포넌트들로 구성된다. 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 위치는 미리 결정될 필요가 없으므로, 접근이 어려운 영역이나 재난 구조를 위한 응용을 위해 임의로 배치될 수 있다. 그러므로 센서 네트워크 프로토콜은 자가 구성(self-organizing)[16] 능

력을 가지며, 센서 노드들이 서로 협력하여 동작한다. 이러한 특성으로 임의의 센서 노드의 동작이 실패하거나 기능이 소멸되는 경우에도 네트워크의 전체적인 동작에는 영향을 미치지 않는 장점을 가진다. 그러나, 무선 매체의 저속, 오류가 심한 전송 특성 및 제한된 전원 공급, 센서 노드의 임의 배치로 인한 교체 불가능 등의 문제점을 가진다. 그러므로, 이러한 무선 센서 네트워크를 위한 프로토콜은 에너지 소비를 네트워크 전체에 분산시켜 전체적 시스템의 수명을 증가시키는 방향으로 설계되어야 한다.[4] 그래서 센서 네트워크를 위한 라우팅 프로토콜의 설계 시 에너지 제약, 유기적인 네트워크 시스템, 네트워크 존속 시간을 반드시 고려해야 한다.

가장 이상적인 프로토콜은 트래픽이 모든 노드들에게 골고루 분배되어 모든 노드들이 동시에 에너지를 소모하는 시스템이다. 따라서, 홉 수뿐만 아니라 각 센서노드들의 에너지 잔량을 고려하는 라우팅 프로토콜이 필요하다. 만약, 센서 노드들의 에너지 잔량을 고려하지 않는다면 네트워크 분할(Network partitioning)[17]이나 센싱 홀(Sensing hole)[17]과 같은 문제가 발생하기 쉽다. 네트워크 분리란 네트워크 내에 많은 센서노드들이 배치되어 있다 하더라도 중간 일부 노드들이 에너지를 모두 소모하거나 소실되어 메시지 전송이 발생하지 않게 되는 현상을 말하며, 센싱 홀은 특정 지역의 노드들이 에너지를 모두 소모하여 해당 지역을 센싱할 수 있는 노드들이 없게 되는 현상을 말한다.[18] 이러한 현상을 방지하기 위해서는 모든 노드들이 고르게 에너지를 소모하는 것이 중요하다.

III. 자가충전 센서노드기반 효율적인 라우팅 프로토콜

1. 개요

본 논문의 자가충전 센서노드기반 데이터 전달 프로토콜은 TTDD나 클러스터 라우팅 프로토콜 등의 전파노드 혹은 클러스터 노드의 역할을 자가충전 센서노드가 처리함으로써 자가충전이 가능한 센서노드를 기반으로 배터리에 의존하는 센서노드들에 에너지 소비를 최소화 할 수 있도록 한다. 하지만 기존에 제안된 프로토콜은 모든 센서 노드를 동등하게 처리함으로써 전파노드를 선정하거나 헤더 노드를 선출하는 등에 부가적인 처리과정이 필요하기 때문에 자가충전 센서노드기반으로 동작하기에는 적합하지 않다. 그래서 본 논문에서는 자가충전 센서노드기반으로 배터리에 의존하는 일반 센서노드들이 데이터를 전송할 수 있도록 방법을 제시하고 알고리즘을 제안한다. 자가충전 센서노드 기반의 센서 네트워크 구조는 그림 14와 같다.

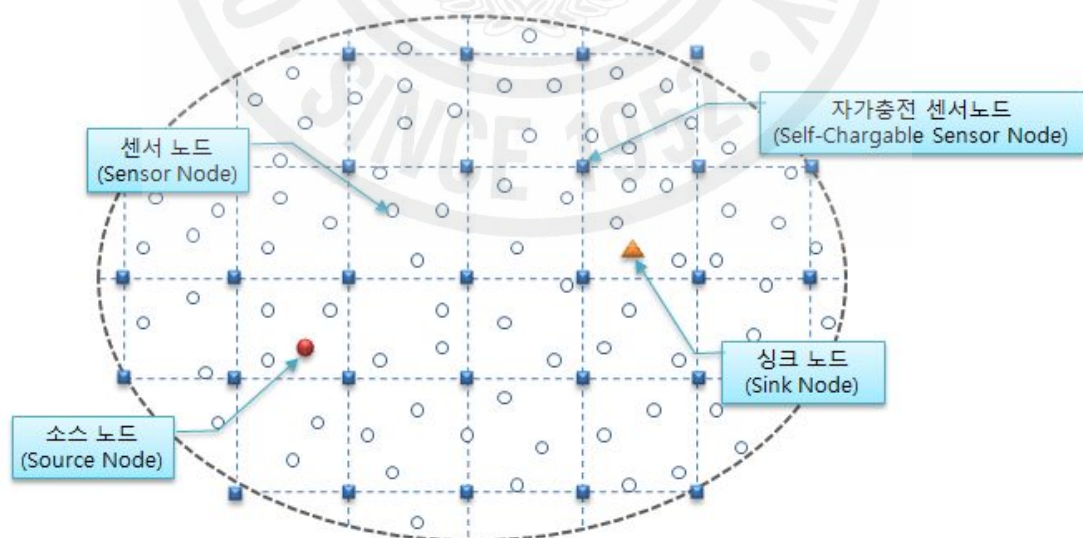


그림 14. 자가충전 센서노드 기반의 센서 네트워크 구조

센서 네트워크는 넓은 지역에 조밀하게 분포하는 센서노드와 자가충전이 가능한 자가충전 센서노드 그리고 복수의 싱크 노드로 구성된다. 각 센서노드는 센싱 기능과 소스의 기능을 가지는 동일한 노드이다. 소스 노드는 TTDD와 같이 로컬한 지역의 감지 정보를 통합한 한 개의 노드임을 가정하고 싱크는 센서 필드내에 위치하며 이동성을 가진다. 감지 대상은 현상 혹은 물체이며 이동성을 갖고 감지대상이 복수개일 경우 식별자에 의해 구분된다.

본 논문에서 제안된 센서 네트워크 구조는 실제 환경에서 이동하지 않는 구조물 가로등이나 건물처럼 전원 공급 및 태양열, 풍력 등에 자가충전이 용이한 곳에 자가충전 센서노드를 설치하고 주변에 배터리 기반에 일반 센서 노드들이 자가충전 센서노드를 기반으로 데이터를 전송할 수 있도록 한다.

자가충전 센서노드를 포함한 모든 센서노드는 라디오 주파수 등을 이용하여 각 노드가 이웃노드와 일정 거리내에서 통신이 가능하고 모든 노드는 가장 인접한 노드에 위치 정보를 알고 있으며 센서 필드상에 일정한 거리와 밀도로 자가충전 센서노드가 분포되어 있음을 가정한다. 자가충전 센서노드는 스스로 충전이 가능하며 TTDD의 그리드와 같이 일정 거리내에 그리드 모양으로 분포하는 것을 가정한다.

2. 메시지 및 라우팅 캐시 정의

1) 데이터 알림 메시지(ADV_MSG)

제안하는 데이터 전달 프로토콜은 2개의 제어 메시지를 사용한다. 감지 대상을 식별한 소스 노드는 일정 거리의 센서 노드 혹은 자가충전 센서노드들에게 표1과 같은 ADV_MSG 메시지를 일정 영역의 범위로 플러딩한다. ADV_MSG는 메시지를 보내는 자신의 센서노드 ID와 감지 대상을 식별한 식별자 정보 등을 가지고 있다.

표 1. ADV_MSG(Advertisement Message) 제어 메시지

필드값	메시지 내용
Node_ID	센서노드 ID
Node_Type	센서노드 구분자
Obj_ID	감지대상의 식별자

2) 질의 메시지(REQ_MSG)

ADV_MSG를 받은 싱크노드는 일정 거리의 센서 노드 혹은 자가충전 센서노드들에게 표2와 같은 REQ_MSG 메시지를 일정 영역의 범위로 플러딩한다. REQ_MSG 역시 메시지를 전송하는 자신의 센서노드 ID와 다수에 싱크노드를 식별하기 위한 식별자 정보 등을 가지고 있다.

표 2. REQ_MSG(Request Message) 제어 메시지

필드값	메시지 내용
Node_ID	센서노드 ID
Node_Type	센서노드 구분자
Hop_Cnt	감지대상의 이동 홉수
Sink_ID	싱크노드 ID

3) 라우팅 캐시

모든 센서 노드는 표3과 같이 설정된 경로를 저장하기 위한 라우팅 캐시를 가지고 있다. Node_Type 속성은 센서노드를 구분하기 위한 식별자 필드이며 감지 대상 및 싱크노드의 식별자 정보와 경로 정보를 가지고 있다. 또한 경로를 재설정하기 위한 홉수 필드를 가지고 있으며 감지 대상이 이동할 때마다 증가하는 감지대상 이동 홉수 필드가 있다.

표 3. 라우팅 캐시의 속성

속 성	내 용
Node_ID (Node ID)	센서 노드 식별자
Node_Type (Node Type ID)	0 : 일반노드, 1 : 자가충전 센서노드 2 : 싱크노드
Obj_ID (Object ID)	감지대상의 식별자
Sink_ID (Sink Node ID)	싱크노드의 식별자
Hop_Cnt (Hop Count)	감지대상 이동 홉수
Limit_Hop_Cnt (Limit Hop Count)	경로를 재생성하기 위한 제한된 홉수
PrevADV_N (Previous Node of ADV_MSG)	데이터 알림 메시지를 보낸 이전 노드
PrevREQ_N (Previous Node of REQ_MSG)	질의 메시지를 보낸 이전 노드

모든 센서노드는 제어 메시지를 수신하면 메시지의 정보를 라우팅 캐시에 저장하고 라우팅 캐시 정보를 제어 메시지에 포함하여 일정 영역 범위로 플러딩한다.

3. 주요 동작 알고리즘

1) 감지대상 발견 및 데이터 알림

감지대상을 발견한 소스 노드(S1)는 그림 15의 알고리즘과 그림 16에서처럼 자신이 자가충전 센서노드인지 라우팅 캐시를 통해 체크한다. 만약 일반 센서노드일 경우 인접한 자가충전 센서노드를 찾기 위해 지역적 플러딩을 한다. 이후 자가충전 센서노드의 REQ_MSG를 통해 검색된 자가충전 센서노드(C1)로 ADV_MSG를 전송한다.

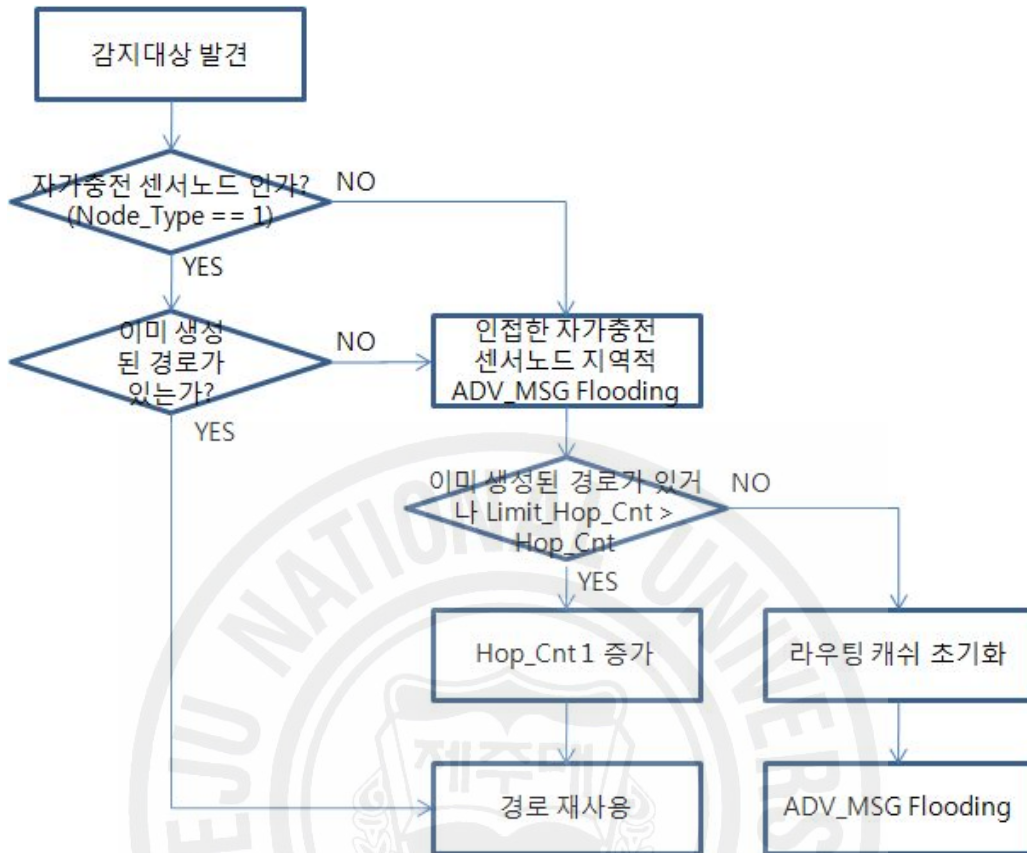


그림 15. 감지대상 발견 및 경로 재사용 알고리즘

만약, 감지대상을 발견한 소스노드가 자가충전 센서노드를 찾지 못하면 네트워크 분할(Network partitioning)이나 센싱 홀(Sensing hole)과 같은 문제가 발생할 수 있다. 그래서 소스노드가 지역적 플러딩을 통해 자가충전 센서노드를 탐색하고 일정 시간동안 응답이 없을 경우 기존 TTDD 방법으로 전환하여 동작할 수 있도록 하는 등에 방안이 필요하다.

ADV_MSG를 받은 자가충전 센서노드는 메시지를 받은 소스노드의 위치를 저장하고 자가충전 센서노드는 셀단위에 지역적 플러딩을 통해 인접한 자가충전 센서노드에 재사용 가능한 경로가 있는지 확인한다. 재사용 가능한 경로가 없다면, 인접한 자가충전 센서노드로 데이터 알림 메시지를 전송한다. 이러한 과정을 반복하여 자가충전 센서노드 전역에 데이터 알림 메시지를 설정한다. 이러한 과정은 싱크노드로부터 질의 메시지를 전송시 양방향 경로를 확립하기 위함이다.

그래서 감지대상 T1을 발견한 소스노드 S1이 ADV_MSG를 플러딩 하면 이를 수신한 자가충전 센서노드 C1은 라우팅 캐시를 구성한다.

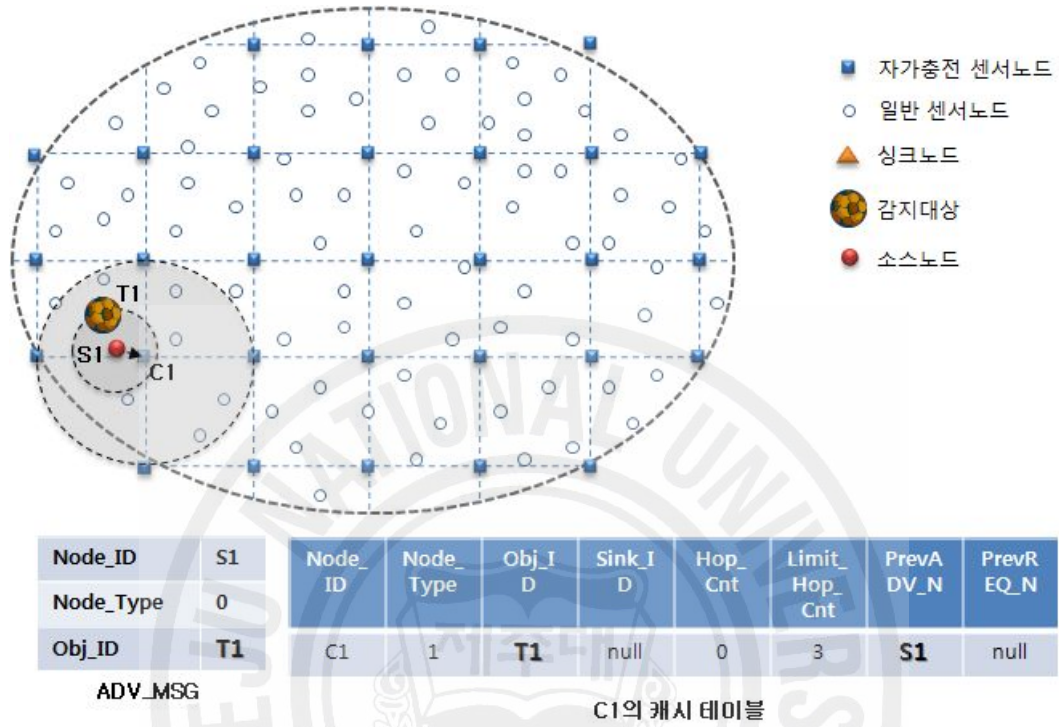
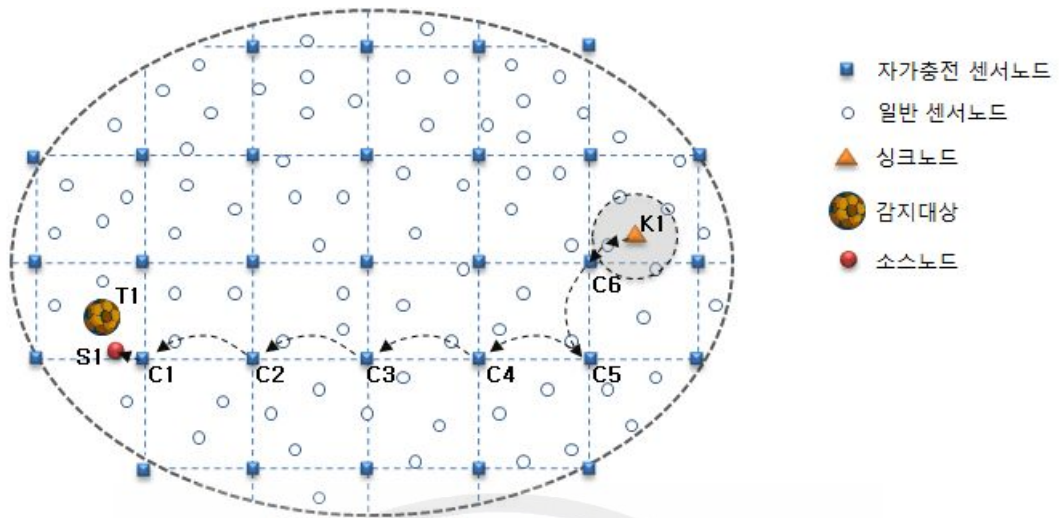


그림 16. 감지대상 발견 및 데이터 알림

2) 질의 메시지 전달

감지정보가 필요한 싱크노드는 주위 노드들에 정보를 알지 못하기 때문에 이 동시마다 현재 자신에서 가장 가까운 자가충전 센서노드를 포함하는 일정 거리 내의 센서노드로 REQ_MSG를 플러딩 한다. 싱크의 질의를 받은 센서노드는 가장 가까운 자가충전 센서노드로 질의 메시지를 전송한다. 질의를 받은 자가충전 센서노드는 그림 17과 같이 ADV_MSG를 받았던 이웃 자가충전 센서노드로 질의 메시지를 포워딩하고 질의를 받은 자가충전 센서노드는 질의 메시지를 받았던 자가충전 센서노드에 위치를 저장한다.



Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
C6	1	T1	K1	0	3	C5	K1

C6의 캐시 테이블

Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
C5	1	T1	K1	0	3	C4	C6

C5의 캐시 테이블

Node_ID	K1
Node_Type	2
Hop_Cnt	0
SinkID	K1

REQ_MSG

Node_ID	C6
Node_Type	1
Hop_Cnt	0
SinkID	K1

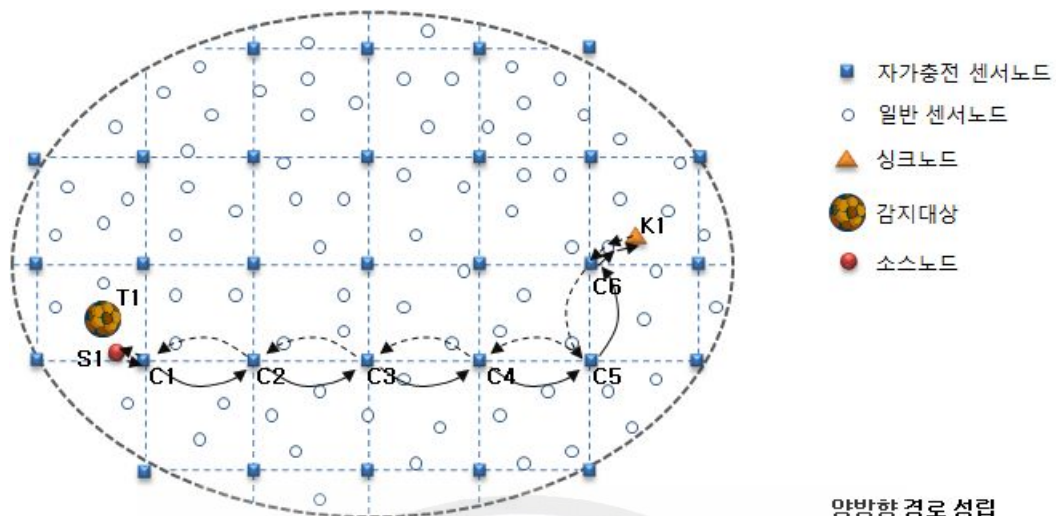
REQ_MSG

그림 17. 싱크노드에서 소스노드까지 질의전달

이를 반복하여 최초 데이터 알림 메시지를 보냈던 자가충전 센서노드까지 질의 메시지를 포워딩한다. 이로써 싱크노드에서 감지대상을 발견한 소스노드까지 양방향 경로가 확립된다.

3) 감지정보 전달

그림 18와 같이 소스노드가 질의 메시지를 받으면 질의 메시지를 받은 자가충전 센서노드로 감지 정보를 전달한다. 감지정보를 받은 자가충전 센서노드는 자신의 라우팅 캐시를 참조하여 질의를 보냈던 이웃 자가충전 센서노드로 감지정보를 전달한다. 따라서, 감지정보는 싱크 노드로 전송된다.



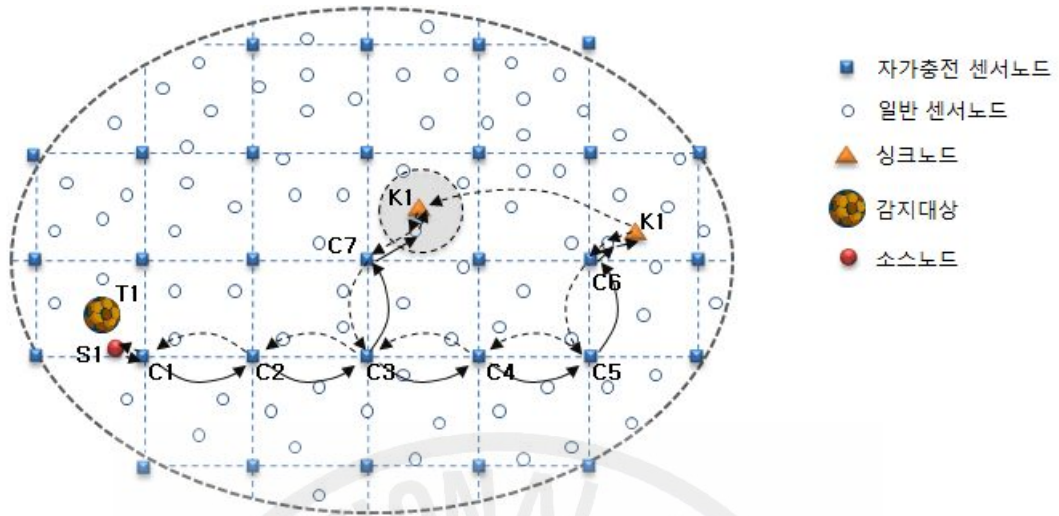
양방향경로 성립

	Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
S1의 캐시 테이블	S1	0	T1	K1	0	3	null	C1
C1의 캐시 테이블	C1	1	T1	K1	0	3	S1	C2
C2의 캐시 테이블	C2	1	T1	K1	0	3	C1	C3
C3의 캐시 테이블	C3	1	T1	K1	0	3	C2	C4
C4의 캐시 테이블	C4	1	T1	K1	0	3	C3	C5
C5의 캐시 테이블	C5	1	T1	K1	0	3	C4	C6
C6의 캐시 테이블	C6	1	T1	K1	0	3	C5	K1
K1의 캐시 테이블	K1	1	T1	K1	0	3	C6	null

그림 18. 소스노드에서 싱크노드까지 감지정보 전달

4) 싱크노드의 이동에 따른 동작 방법

싱크노드에 이동시 그림 19과 같이 TTDD와 같은 방법으로 동작한다. 일정 거리내의 센서노드로 REQ_MSG를 플러딩하고 질의 메시지를 받은 센서노드는 가장 가까운 자가충전 센서노드로 REQ_MSG를 포워딩한다. REQ_MSG를 받은 자가충전 센서노드는 ADV_MSG를 보냈던 자가충전 센서노드(C3)로 질의 메시지를 포워딩한다. 질의 메시지를 받은 자가충전 센서노드(C3)는 라우팅 캐시를 참조하여 기존에 설정되었던 경로 C4가 있어 이를 재사용 하기 위해 C4 경로를 삭제하고 새로운 C7 경로를 설정한다.



Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
C7	1	T1	K1	0	3	C3	K1

C7의 캐시 테이블

Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
C3	1	T1	K1	0	3	C2	C4, C7

C3의 캐시 테이블

Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
K1	2		K1	0			

REQ_MSG

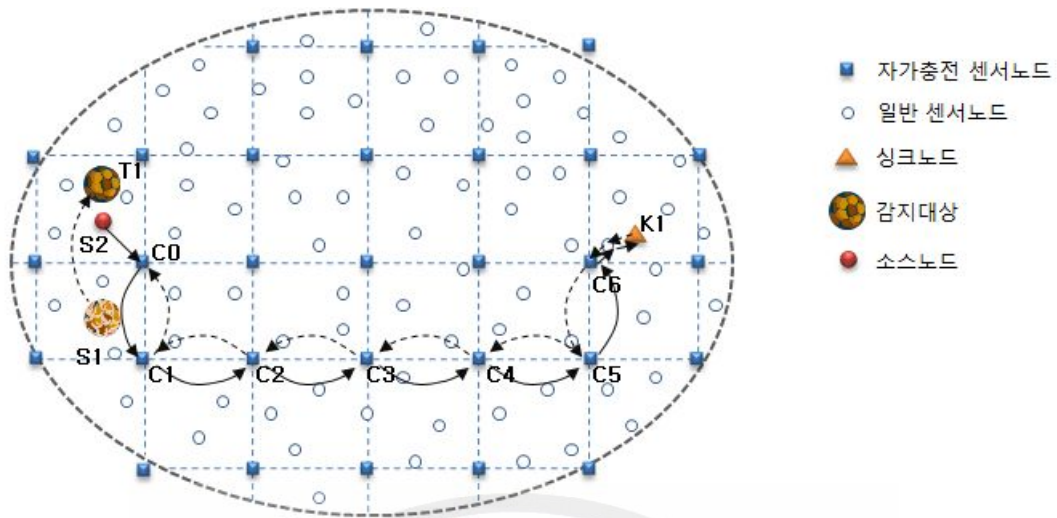
Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
C7	1		K1	0			

REQ_MSG

그림 19. 싱크노드에 이동시 감지정보 전달 방법

5) 감지대상의 이동에 따른 동작 방법

감지대상이 이동시 그림 20에서처럼 감지대상을 발견한 센서노드가 새로운 소스노드(S2)가 된다. 소스노드는 지역적 플러딩을 통해 가장 가까운 자가충전 센서노드(C0)로 AVG_MSG를 전송한다. 데이터 알림 메시지를 받은 자가충전 센서노드는 자신이 질의를 받았었는지 확인하고 질의를 받았던 자가충전 노드라면 자가충전 센서노드의 전파범위안에서 감지대상이 이동한 경우이다.



Node_ID	S2	Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
Node_Type	0	C0	1	T1	null	0/1	3	S2	C1

S2의 ADV_MSG 메시지

C0의 캐시 테이블

Node_ID	C1	Node_ID	Node_Type	Obj_ID	Sink_ID	Hop_Cnt	Limit_Hop_Cnt	PrevA_DV_N	PrevR_EQ_N
Node_Type	1	C1	1	T1	K1	0/1	3	S1/C0	C2
Hop_Cnt	1								
SinkID	K1								

C1의 REQ_MSG 메시지

C1의 캐시 테이블

그림 20. 감지대상의 이동시 감지정보 전달 방법

하지만 질의를 받았던 자가충전노드가 아니라면 이웃하는 자가충전 센서노드로 셀단위의 지역적 플러딩을 하여 질의를 받았던 센서노드인지 AVG_MSG를 전송한다. 확인 메시지를 받은 자가충전 센서노드는 자신이 질의를 받았었는지 확인하고 질의를 받았었으면 홉수를 1증가하고 확인 메시지를 보냈던 자가충전 센서노드(C0)로 응답 메시지(REQ_MSG)를 전송한다. 응답 메시지를 받은 자가충전 센서노드는 수신한 홉수를 라우팅 캐시에 기록한다.

감지대상이 이동시마다 이러한 과정을 반복하며 홉수는 계속 증가하며 최초 설정된 경로를 재사용할 수 있도록 한다. 하지만 홉수가 너무 커지면 경로가 복잡해지고 비효율적이다. 그래서 미리 설정된 홉수(Limit_Hop_Cnt)보다 커지면 자가충전 센서노드 전역에 데이터 알람 메시지를 전송함과 동시에 캐시 테이블을

초기화하여 새로운 경로를 설정할 수 있도록 한다. 이러한 경로에 설정은 경로가 효율적이지 못할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 하지만 자가충전 센서노드를 기반으로 배터리 기반의 일반 센서노드에 에너지 소모를 줄여 센서 네트워크에 수명을 연장하는데 그 목적이 있어 본 논문에서는 경로의 최적화 부분은 고려하지 않는다.

4. 제안할 방안과 TTDD의 기본 동작 비교

1) 기본 동작 비교

TTDD와 본 논문에서 제안한 자가충전 센서 네트워크 프로토콜에 기본적인 차이는 그림 21에서와 같이 감지정보를 전달하기 위한 그리드를 생성한다.

하지만 자가충전 센서 네트워크 프로토콜은 에너지 소비에 영향이 적은 자가충전 센서노드를 기반으로 통신함으로써 그리드를 생성하지 않아도 된다. 그러나 자가충전 센서노드를 식별하고 검색하기 위해 감지대상을 발견한 소스노드는 인접한 센서노드로 지역적 플러딩을 한다. 그래서 TTDD의 그리드 생성과 모든 자가충전 센서노드로 데이터 알림 메시지를 전송하기 위한 메시지 부하는 같다고 볼 수 있다.

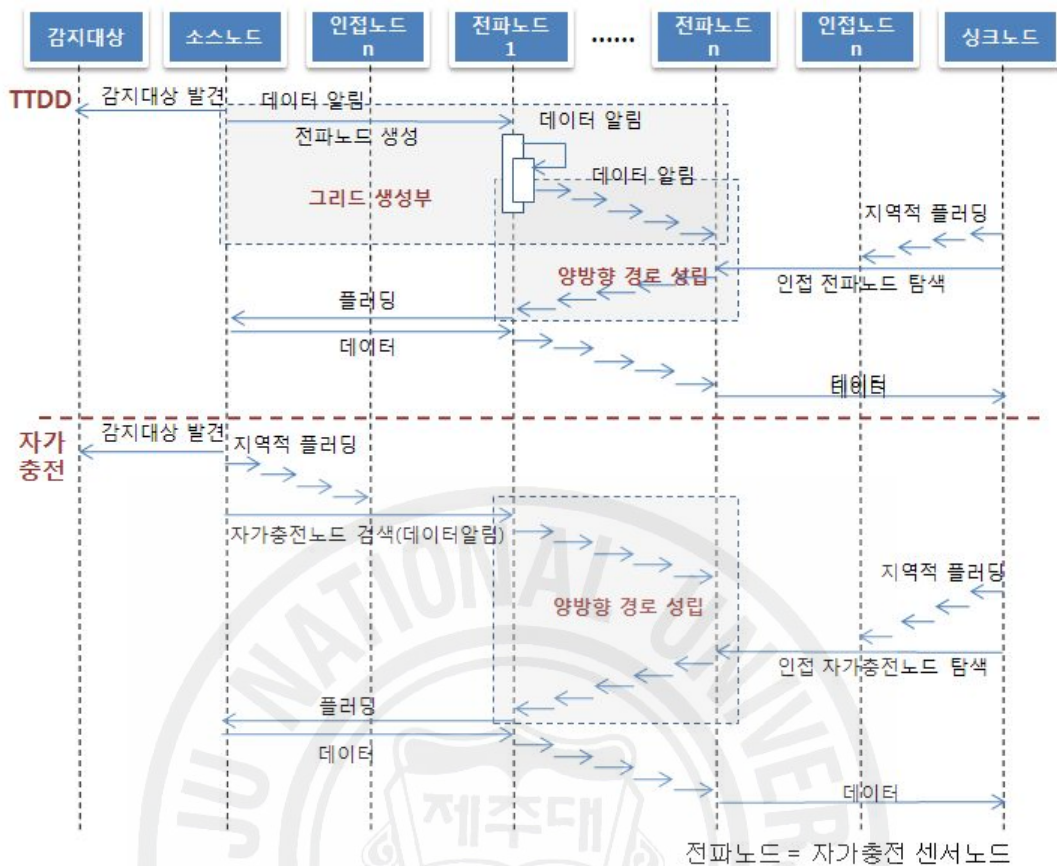


그림 21. 제안된 프로토콜과 TTDD의 기본기능 비교

2) 싱크노드에 이동시 동작 비교

또한 자가충전 센서 네트워크 프로토콜은 TTDD의 프로토콜을 기본으로 하고 있어 싱크노드에 이동시 그림 22와 같이 TTDD와 같은 방법으로 질의 메시지를 전달한다.

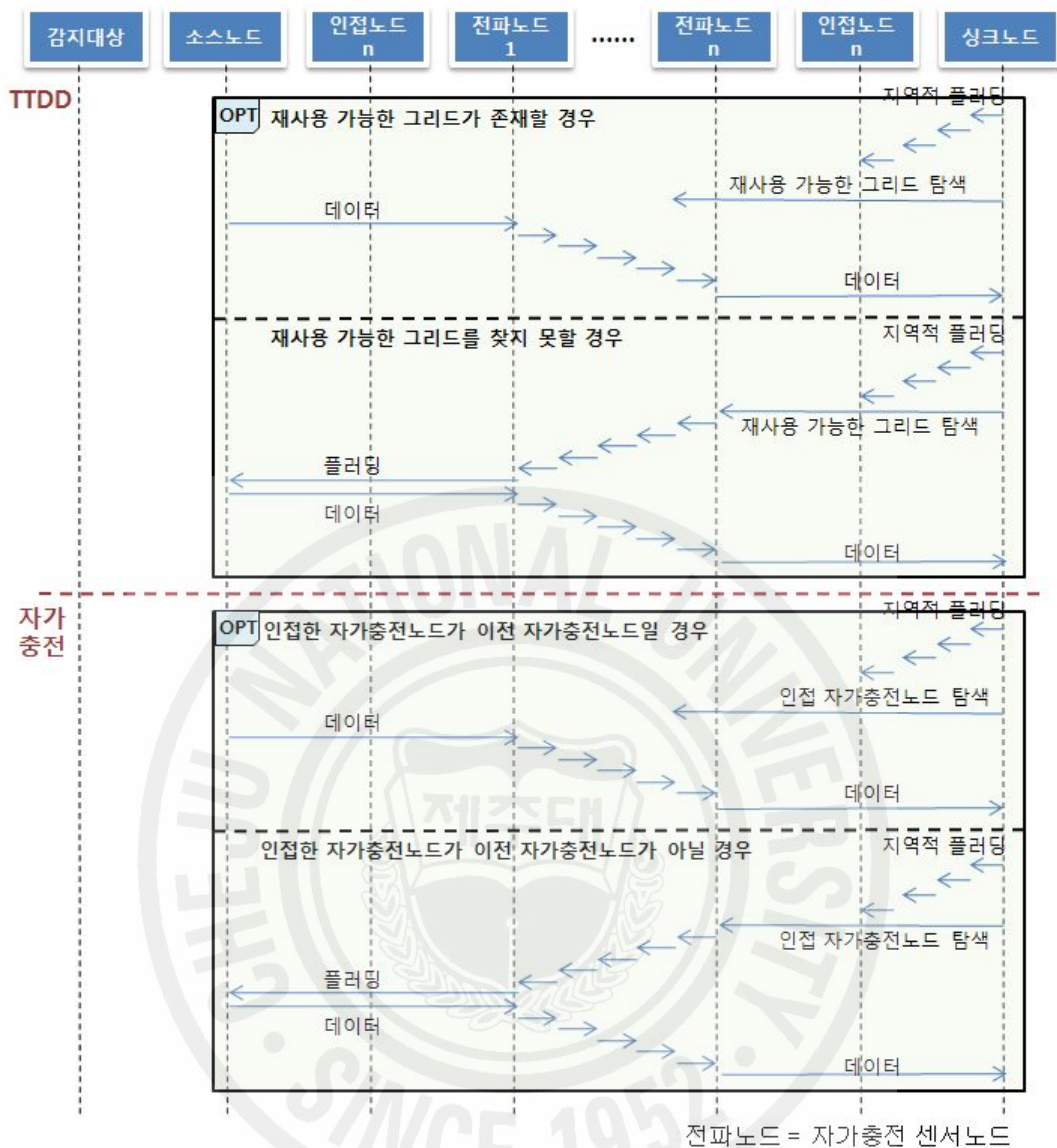


그림 22. 제안된 프로토콜과 TTDD의 싱크노드 이동시 비교

3) 감지대상에 이동시 동작 비교

감지대상이 이동시 TTDD는 매번 그리드를 재구성해야 하는 반면 그림 23에서와 같이 자가충전 센서 네트워크 프로토콜은 그리드를 재구성해야 하는 비용이 없으며 인접한 자가충전 노드가 이전 자가충전 노드일 경우 경로를 재설정하지 않더라도 기존에 설정된 경로를 재사용할 수가 있다. 최악의 경우, 인접한 자가충전 센서노드를 사용하기 때문에 그리드를 구성하기 위한 비용을 줄일 수 있다.

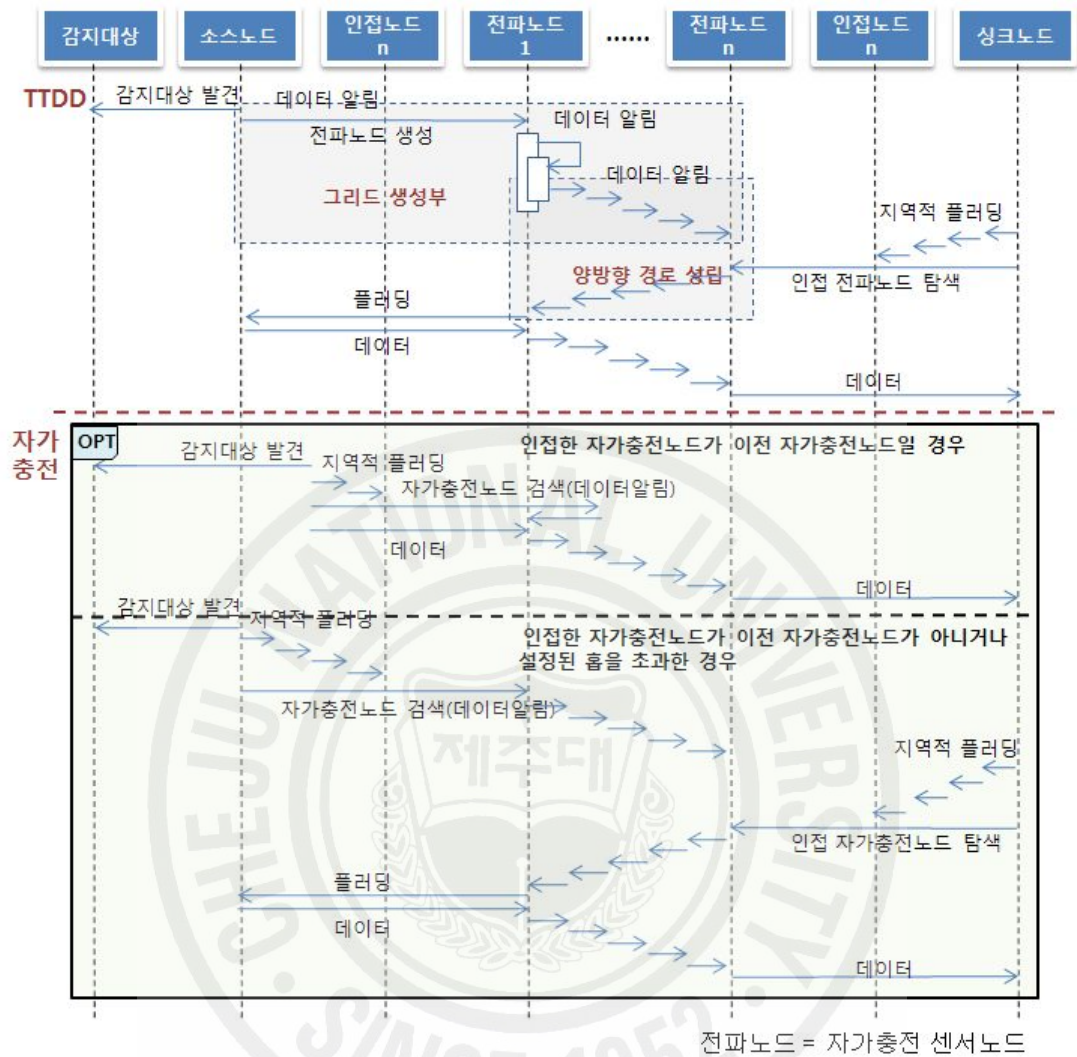


그림 23. 제안된 프로토콜과 TTDD의 감지대상 이동시 비교

이처럼 자가충전 센서 네트워크 프로토콜은 에너지 소비에 영향이 적은 자가충전 센서노드를 이용함으로써 TTDD에서 감지정보를 효율적으로 전달하기 위해 그리드를 구성하는 비용을 줄일 수 있고 감지대상에 이동시 매번 그리드를 재구성하기 위한 비용을 줄일 수 있다. 그래서 자가충전 센서 네트워크 프로토콜은 일반 센서노드에게는 통신을 하기 위한 비용을 최소화하고 에너지 문제에 영향이 적은 자가충전 센서노드를 기반으로 통신할 수 있다.

IV. 성능평가

1. 시뮬레이션 환경

제안된 프로토콜은 프로토콜의 설계에 모델이 되고 가장 동작 방법이 유사한 TTDD와의 성능을 비교하고 TTDD의 메시지 부하 및 에너지 소비에 대한 수식은 [2][6]에서 인용하였다. 또한, 평가 환경에 대한 변수도 TTDD에서 가장 우수한 성능을 보였던 환경에서 성능을 측정하여 비교하였다. 성능평가를 위한 도구로는 MATLAB 7을 사용하였다.

1) 변수 선언

본 논문에서는 감지 대상의 이동성 측면에서 TTDD와 자가충전 센서네트워크의 성능을 비교 평가한다. 비교 평가를 위한 변수들은 TTDD의 것을 이용하였다. 성능 분석을 위한 USN 환경은 정방형의 센서 필드에 센서노드가 균일하게 배포됨을 가정하고 소스 노드가 이동하는 감지 대상에 대한 정보를 싱크로 전달시 최악의 경우 발생하는 메시지 부하와 에너지 소비를 수학적으로 측정하였다. 이를 위해 TTDD가 기존의 프로토콜보다 우수한 성능을 보였던 환경인 $A=2000 \times 2000m^2$, $N=10000$, $n=100$, $k=4$, $c=1$, $d=100$, $l=1$, $m=1$, $e=10$, $k_t=1$ 인 환경에서 한 그리드 재활용 영역의 범위 내에서 성능을 측정한다.[2]

표 4. 성능 분석을 위한 변수

A	정방향의 센서 필드의 크기(m^2)
a^2	그리드의 한 셀의 크기 ($a \times a$) (m)
N	전체 센서노드 수
\sqrt{N}	센서 필드의 각 사이드의 센서노드 수
$\sqrt{2}(c\sqrt{N})$	소스에서 싱크간의 경로 상의 노드 수 ($0 < c \leq \sqrt{2}$)
$n = Na^2/A$	한 셀 내에 센서노드 수
\sqrt{n}	셀의 각 사이드의 센서노드 수
T	단위 시간(s)
h	그리드를 재구성하기 위한 흡수
d	T 시간동안 소스 노드가 보내는 데이터 패킷수(unit size)
l	질의와 데이터 알림 메시지의 데이터 메시지에 대한 상대적 크기
v_t	감지 대상의 이동 속도 (m/s)
k_t	감지 대상의 개수
e	평균 이웃 노드의 개수
$m = 1 + (vT/a)$	싱크의 이동 횟수 (고정될 경우 $m=1$)
k	싱크 수
v	싱크의 속도 (m/s)

2. 시뮬레이션 결과

1) 메시지부하 비교

TTDD는 싱크와 소스 노드 간에 데이터를 전달하기 위한 메시지 부하를 다음과 같이 정의한다. 수식 (1)은 싱크의 셀 사이즈를 a 로 가정할 때 싱크가 소스 노드로 질의를 전달하기 위한 메시지 부하이다.

$$enl + \sqrt{2}(c\sqrt{N})l \quad (0 < c \leq \sqrt{2}) [2][6] \quad (1)$$

수식 (1)에서 enl 은 싱크가 질의를 자신의 셀 내에 플러딩하는 메시지 부하이며 $c\sqrt{N}$ 은 싱크로부터 소스 노드까지의 직선 경로 상의 평균 노드 수이고 $\sqrt{2}$ 는 최악의 경우를 위해 경로를 증가시키기 위한 변수이다. 이와 유사하게 데이터 패킷의 부하는 수식 (2)와 같이 정의한다. 수식 (2)에서 d/m 은 싱크가 m 번 이동 시 한 셀에서 받는 데이터 패킷의 수이다.

$$\sqrt{2}(c\sqrt{N})\frac{d}{m} [2][6] \quad (2)$$

따라서 m 번 이동하는 k 개의 싱크로 소스 노드가 질의와 데이터를 보내기 위한 메시지 부하는 수식 (3)과 같으며 이때 그리드를 생성하는 메시지 부하를 더하여 감지 대상이 이동하지 않았을 경우 ($M=1$) 감지 정보를 전달하는데 발생하는 전체 메시지 부하는 수식 (4)와 같이 정의한다.

$$km \left\{ (enl + \sqrt{2}(c\sqrt{N})l + \sqrt{2}(c\sqrt{N})\frac{d}{m}) \right\} = kmenl + kc(ml + d)\sqrt{2N} [2][6] \quad (3)$$

$$U = \frac{4N}{\sqrt{n}} l + kmenl + kc(ml + d)\sqrt{2N} [2][6] \quad (4)$$

TTDD에서 정의한 수식 (4)에 따라 k_i 개의 감지 대상이 M 번 이동할 경우 소스 노드가 싱크까지 감지 정보를 전달하기 위한 전체 메시지 부하는 수식 (5)와 같이 정의 한다.[2]

$$CO_{TTDD} = k_i \left[\left\{ \frac{4N}{\sqrt{n}} l + kc(ml+d)\sqrt{2N} \right\} M + kmenl \right] [2][6] \quad (5)$$

감지 대상이 이동할 때 감지대상을 발견한 소스 노드는 자가충전 센서노드를 찾기 위해 지역적 플러딩하는 메시지 부하는 수식 (6)과 같으며 메시지를 수신한 자가충전 센서노드는 주위에 이전 경로가 있는지 확인하는 메시지를 전송하고 응답을 받는 수식 $(en+1)l$ 을 더하여 수식 (7)과 같다.

$$enl + kc(ml+d)\sqrt{2n} \quad (6)$$

$$enl + kc(ml+d)\sqrt{2n} + (en+1)l = 2enl + kc(ml+d)\sqrt{2n} + l \quad (7)$$

이때 응답 메시지에 홉수를 나타내는 변수 h 에 따라 감지 대상이 이동시 경로를 재생성하게 되는데 k_i 개의 감지대상이 M 번 이동할 때 변수 h 에 따라 경로 재생성하는 메시지 부하는 $U_{ceil}(\frac{M}{h})$ 이며 경로를 재생성하기전 감지대상에 이동에 따른 메시지 부하를 $ceil(\frac{M}{h})l$ 으로 정의 할 수 있다. 따라서 감지 대상에 이동에 따른 소스 노드가 싱크로 감지 정보를 전달하는데 발생하는 전체 메시지 부하는 수식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$CO_{SC} = k_i \left[U_{ceil}(\frac{M}{h}) + \{2enl + kc(ml+d)\sqrt{2n} + l\} M + ceil(\frac{M}{h})l \right] \quad (8)$$

TTDD와 자가충전 센서네트워크에 메시지 부하를 비교하면 수식(5)와 수식(8)에 따라 수식(9)와 같다.

$$\frac{CO_{sc}}{CO_{TTDD}} = \frac{k_t \left[U \operatorname{ceil}\left(\frac{M}{h}\right) + \{2enl + kc(ml + d)\sqrt{2n + l}\}M + \operatorname{ceil}\left(\frac{M}{h}\right)l \right]}{k_t \left[\left\{ \frac{4N}{\sqrt{n}} l + kc(ml + d)\sqrt{2N} \right\}M + kmnl \right]} \quad (9)$$

감지대상이 M번 이동할 경우 h가 3일 때 수식(9)을 적용하면 그림 24와 같은 그래프로 나타난다.

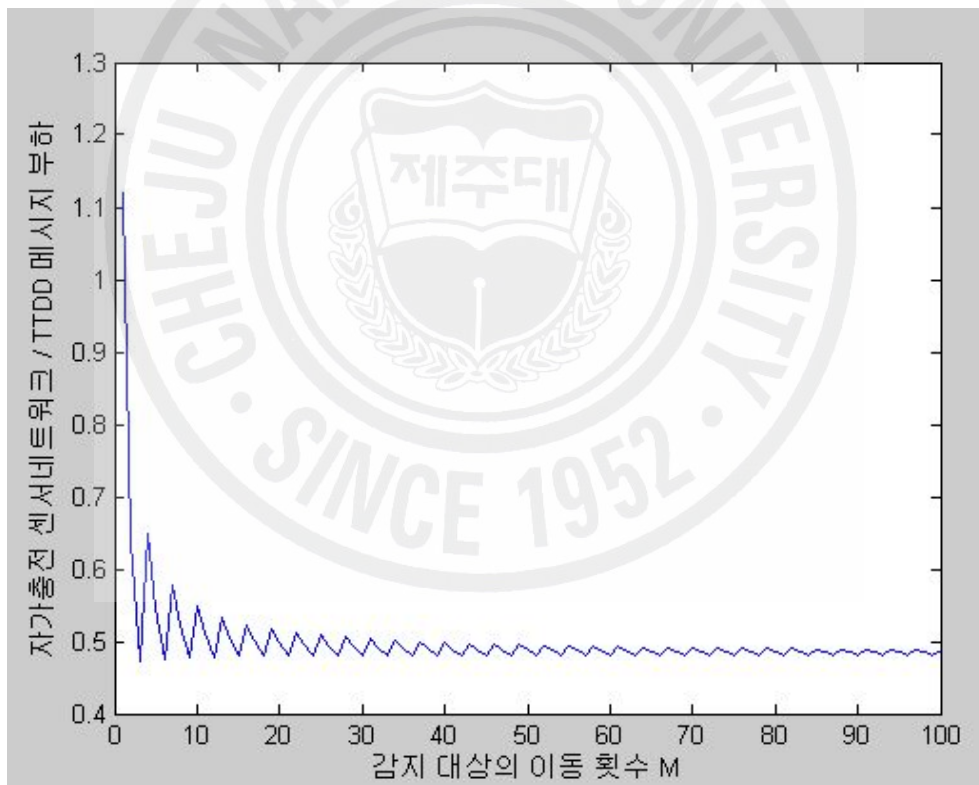


그림 24. 감지 대상의 이동 횟수에 따른 메시지 부하

그림 24의 그래프에서 경로를 재생성하기 위한 변수 h 에 따라 감지대상이 3번

이동했을 때까지 급격히 감소하고 경로를 재생성하면서 조금 상승하다 다시 경로가 재생성되기 전까지 감소한다. 이는 그만큼 TTDD가 그리드를 생성하기 위한 메시지 부하가 크다는 의미이다 하지만 감지 대상이 이동 횟수가 많아지면서 경로를 재생성하기 위한 메시지 부하 폭이 줄어들는데 이는 제안된 프로토콜의 자가충전 센서노드를 찾기 위한 지역적 플러딩에 메시지 부하도 점차 증가하기 때문이다. 그러나 감지대상에 이동이 많아져도 그래프에 감소가 일정수준을 유지하고 있는데 이는 자가충전 센서노드를 찾기 위한 지역적 플러딩에 비해 TTDD의 그리드를 생성하기 위한 메시지 부하에 비해 크지 않다는 것을 의미한다.

그러나 감지 대상이 이동이 없는 경우($M=1$) 자가충전 센서네트워크/TTDD의 값이 1보다 큰 값을 가진다. 이는 감지 대상이 이동이 없을 경우 자가충전 센서네트워크는 TTDD와 같은 동작 과정을 수행하는데 이때 자가충전 센서네트워크는 자가충전 센서노드를 찾기 위한 지역적 플러딩을 수행하기 때문이다.

그림 25의 그래프는 감지 대상이 이동시 경로를 재생성하기 위한 흡수에 따른 메시지 부하를 나타낸 그래프이다.

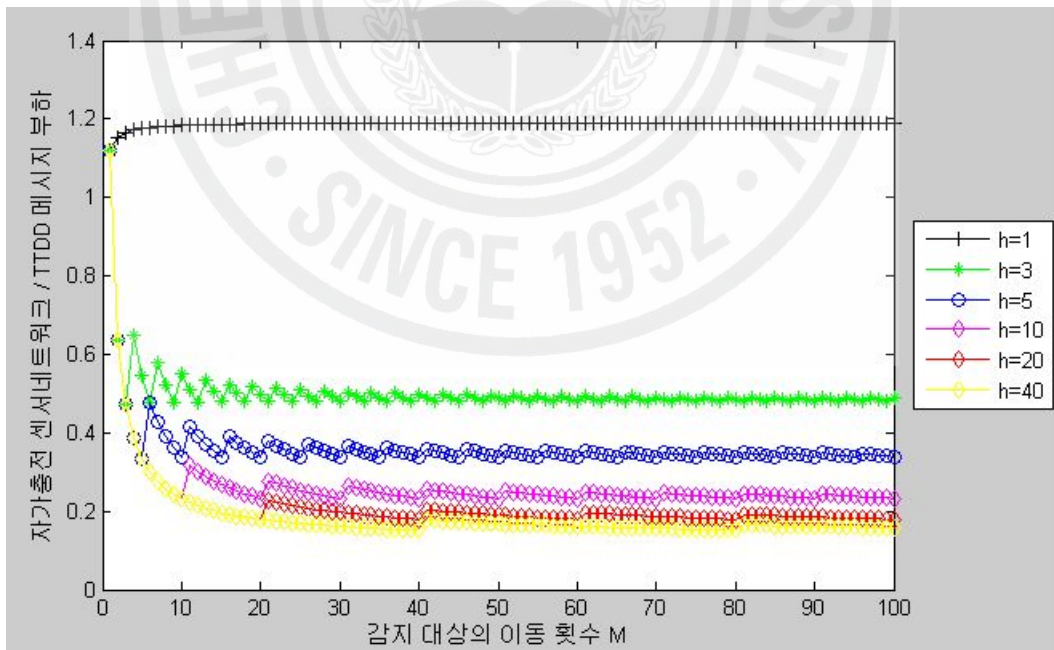


그림 25. 흡수에 따른 메시지 부하

그림에서 보는것과 같이 $h=1$ 일 경우 자가충전 센서노드를 찾기 위한 지역적 플러딩에 메시지 부하가 TTDD에 비해 크다는 것을 의미한다. 하지만 h 변수 값이 증가하면서 전체적인 메시지 부하도 줄어든다. 이는 h 변수에 따라 감지 대상이 이동시 경로를 재생성하기 위한 메시지 부하도 줄어들기 때문이다. 그러나 h 가 20일 때와 40일 때 메시지 부하에 차이가 거의 없다. 이는 h 변수를 높게 설정하였다고 하여도 메시지 부하가 줄지 않는다는 것을 의미하며 이유는 감지 대상이 이동하면서 경로가 복잡해지고 경로 재생성 유무를 확인하기 위한 메시지 부하가 커지기 때문이다.

2) 에너지 소모량 비교

감지 대상의 이동에 따른 제안된 프로토콜과 TTDD의 에너지 소비량을 비교하기 위해 $a=200m$ 인 USN 환경을 가정한다. 센서노드의 초기 에너지량은 $26kJ$ 로 가정하며 전송거리가 $20m$ 일 때 전송에 소비되는 에너지는 $E_t=0.47\mu J/bit$, 수신에 소비되는 에너지는 $0.31\mu J/bit$ 로 가정한다.[2] 질의 메시지와 그리드 생성을 위한 데이터 알림 메시지는 $l=36byte$, 데이터 메시지는 $D=64byte$ 로 가정한다.[6] 이때 감지대상이 이동시 소비되는 에너지량은 수식 (9)와 같으며 그림 25에서 가장 낮은 에너지 소비를 보인 $h=40$ 일 때 소비되는 에너지량은 그림 26와 같다.

$$E_U = \left\{ \frac{4N}{\sqrt{n}} l + kmnl + kc(ml + Dd)\sqrt{2N} \right\} (E_t + E_r)$$

$$E_{SC} = k_t \left[E_U \text{ceil}\left(\frac{M}{h}\right) + \{2enl + kc(ml + Dd)\sqrt{2n} + l\}M + \text{ceil}\left(\frac{M}{h}\right)l \right] (E_t + E_r) \quad (9)$$

$(h=40)$

$$E_{TTDD} = k_t \left[\left\{ \frac{4N}{\sqrt{n}} l + kc(ml + d)\sqrt{2N} \right\} M + kmnl \right] (E_t + E_r) \quad [2][6]$$

그래프에서처럼 감지 대상이 움직이지 않을 경우 에너지에 소비가 거의 없다가 감지 대상이 이동이 점점 많아지면서 TTDD는 그리드를 매번 재생성하면서 에너지 소비가 급격히 많아지고 있다. 하지만 제안된 프로토콜은 h 변수에 따라 기존에 설정된 경로를 재사용함으로써 감지 대상이 이동이 많아지더라도 TTDD에 비해 에너지 소비가 현저하게 줄어든다. 이는 센서 네트워크 망 전체에 수명 과도 직결된다.

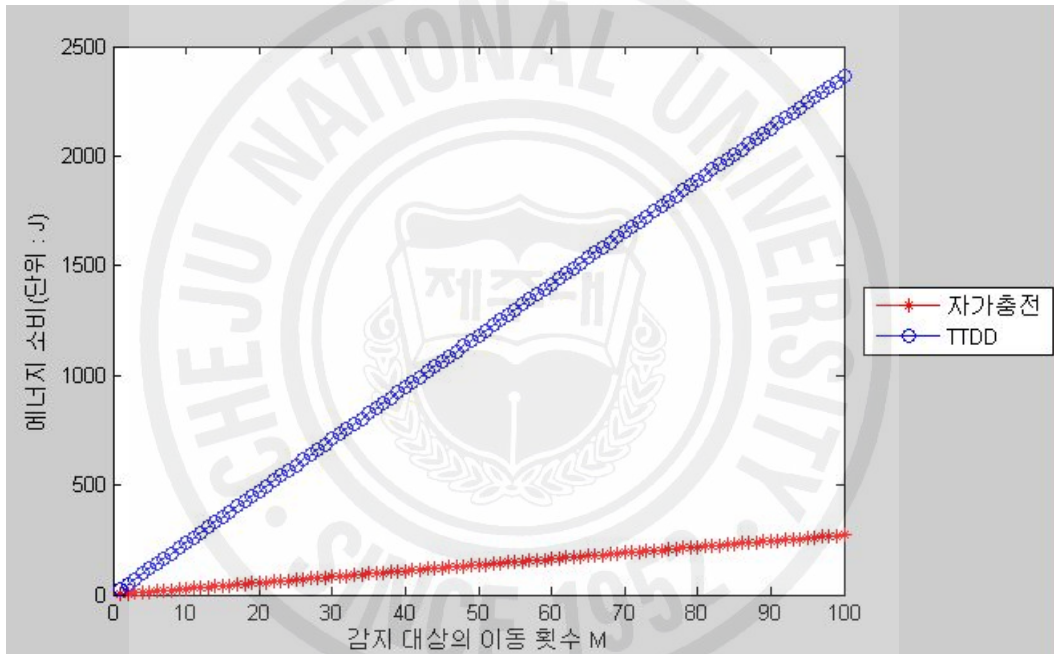


그림 26. 감지 대상의 이동 횟수에 따른 에너지 소비량

V. 결론

센서 네트워크를 구성하는 센서 노드는 초소형, 저비용, 저전력이란 특징을 가지고 있다. 그러나 센서 네트워크의 수명을 연장시키기 위해서는 센서 노드의 에너지 소모량을 최소화시켜야 한다. 따라서, 센서 네트워크에 메시지 부하를 줄임으로써 에너지 소비를 최소화하는 다양한 라우팅 프로토콜이 제안되었다.

본 논문에서는 일반 센서노드들의 메시지를 자가 충전노드들이 대신해서 전송함으로써 일반 센서노드의 에너지 소모량의 최소화를 통해 센서 네트워크의 수명을 향상시킨 에너지 효율적인 라우팅 방안을 제안하였다.

본 연구에서는 기존에 제안된 싱크노드에 이동성을 고려한 메시지 전달 프로토콜인 TTDD를 분석하여 제안된 프로토콜과 동작 방법을 비교 분석하였다. 또한 MATLAB 툴을 통해 TTDD와의 성능을 평가하였다. 그 결과 감지대상이 이동이 빈번한 경우 제안된 프로토콜에 성능이 우수함을 보였다. 감지대상이 이동하지 않을 경우 일반 센서노드가 자가충전 센서노드를 탐색하기 위한 메시지 부하로 인해 TTDD보다 메시지 부하가 증가하였지만 자가충전 센서노드를 탐색하기 위해 지역적 플러딩 때문에 그 차이는 크지 않았다. 이러한 메시지 부하가 줄어들면서 에너지 소비량 또한 TTDD에 비해 우수함을 보였다. 따라서 에너지 소비에 의존적이지 않은 자가충전 센서노드를 이용하여 일반 센서노드들에 메시지 부하를 줄임으로써 에너지 소비를 줄일 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] 장선호, 이민경, 김재준 “유비쿼터스 센서 응용서비스 및 개발동향” IT SoC Magazine
- [2] 서유화, 김기영, 신용태, “유비쿼터스 센서 네트워크 환경에서 감지대상의 이동성을 고려한 데이터 전달 프로토콜” 한국통신학회논문지 '06-3 Vol.31 No.3A
- [3] 최진철, 이채우 “클러스터 기반 다중 홉 센서 네트워크의 모델링 기법” 전자공학회 논문지 제 43권 TC편 제 1호 2006년 1월
- [4] 배정숙, 김성희 “무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜” ITFIND 주간 기술동향 1140호
- [5] 박형순, 홍상렬, 김시관 “센서 네트워크를 위한 클러스터 기반의 효율적인 데이터 전송 라우팅 프로토콜” 2006년도 한국정보과학회 가을 학술발표논문집 Vol33 No.2D
- [6] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "A Two-tier Data Dissemination Model for Large-scale Wireless Sensor Networks," in Proc. of the 8th Annual International Conf. on Mobile computing and networks, pp. 148-159, September 2002
- [7] Duane Hanselman, Bruce Littlefield "Mastering MATLAB 7" 대광서림
- [8] C. Intanagonwiwat et al., "Directed diffusion for wireless sensor networking," Ieee/Acm Transactions on Networking, Vol.11, No.1, Feb. 2003, pp.2-16.
- [9] W.R. Heizelman et al., "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proc. ACM Mobicom' 99, 1999, pp.174-185.
- [10] K. Sorabi et al., "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network," IEEE Personal Communication, Vol.7, No.5, 2000, pp.16-27.
- [11] Fan Ye, et al., "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks," Proc. Tenth International Conference on Computer Communications and Networks, 2001, pp.304-309.

- [12] Wendi B. Heinzelman et al., "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol.1, No.4, Oct. 2002, pp.660-670.
- [13] Arati Manjeshwar et al., "TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," Proc. Second Int'l Workshop Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001.
- [14] Arati Manjeshwar et al., "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," IEEE Proc. Of the Int'l. Parallel and Distributed Processing Symposium(IPDPS'02), Apr. 2002, pp.195-202.
- [15] 정보통신연구진흥원 "MEMS기술 및 시장동향" 주간기술동향 1322호
- [16] Sungyun Park, Kwangcheol Shin, Ajith Abraham, SangYong Han "Optimized Self Organized Sensor Networks" WSEAS TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Issue 8, Vol.5, ISSN 1109-2734, pp.1166-1172
- [17] Yongsub Nam, Taekyoung Kwon, Hojin Lee, Hakyung Jung, Yanghee Choi "Guaranteeing the network lifetime in wireless sensor networks : A MAC layer approach" ScienceDirect Computer Communications 21 June 2007
- [18] 남용섭, 정하경, 권태경, 최양희 "무선 센서 네트워크에서의 에너지 인지 라우팅 프로토콜" 한국통신학회 추계학술발표회, 서울대학교, November 2005