

# 클러스터 기반 센서 망에서 데이터 전달 방법들의 성능 분석

정희원 박 태 근\*

## An Evaluation of Data Delivery Mechanisms in Clustered Sensor Networks

Taekeun Park\* *Regular Member*

요 약

본 논문은 클러스터 기반 센서 망에 적합한 에너지 효율적인 토폴로지 관리 기법 개발을 위한 기반 연구로서, 세가지 종류의 데이터 전달 방법의 성능을 비교 분석한다. 첫 번째 방법에서는 각 클러스터의 헤더들만 무선 송수신 모듈을 활성화시켜 RTS/CTS/DATA/ACK 메시지 송수신에 참여하고, 두 번째 방법에서는 각 클러스터당 다수 노드들이 메시지 교환에 참여한다. 마지막 방법에서는 각 클러스터의 헤더들만 RTS/CTS 메시지 교환을 위하여 무선 송수신 모듈을 활성화하는데, 자신의 클러스터 ID가 목적지 클러스터로 지정되어 있는 RTS 메시지를 수신한 클러스터 헤더는 다수 노드들의 무선 송수신 모듈을 활성화시켜 DATA 메시지 수신과 ACK 메시지 송신에 참여하도록 한다. 시뮬레이션을 통하여, 클러스터당 활성화될 노드의 수와 부하 및 패킷 손실 확률에 따라 이상의 세 가지 방법의 에너지 소모량을 비교 분석한다.

Key Words : Data Delivery Mechanism, Clustered Sensor Networks, Performance Evaluation, Energy Consumption, Retransmission

ABSTRACT

This paper evaluates the performance of three types of data delivery mechanisms in clustered sensor networks, as a basic research to develop an energy efficient topology management scheme. In the first mechanism, one node per cluster(clusterhead) turns on its radio(or wakes up) to transmit and receive RTS/CTS/DATA/ACK messages, but in the second one, k nodes per cluster wake up and participate in the message exchange. In the last mechanism, clusterheads turn on the radio to exchange RTS/CTS messages, and if a clusterhead receives RTS containing its cluster ID as a destination, it makes k nodes in the cluster turn on the radio to receive DATA and transmit ACK. Through simulation, we show the energy consumption of the three types of data delivery mechanisms as functions of the number of active nodes per cluster, offered load, and packet loss probability.

### I. 서 론

무선 센서 망은 침입 탐지, 환경 감시, 구조물 및

지진 모니터링, 원격 건강 모니터링 등 다양한 분야에 적용 가능한 새로운 무선 통신망이다<sup>1)</sup>. 정보가 수집될 지역에 센서 노드들을 공중에서 투하하거나

\* 본 연구는 2005학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다.

\* 단국대학교 전자컴퓨터학부 멀티미디어학전공 (tkpark@dku.edu)

논문번호 : KICS2005-05-187, 접수일자 : 2005년 5월 4일, 최종논문접수일자 : 2005년 8월 23일

지정된 위치에 설치하면, 각 센서 노드는 인접 센서 노드와 분산화된 방법으로 협동하여 멀티-홉 무선 센서 망을 구축한 후 수집된 정보를 목적지 노드로 전달한다. 그러나 각각의 센서 노드는 제한된 배터리 전원과 패킷 손실이 발생하기 쉬운 무선 채널을 통하여 수집된 정보를 송수신하기 때문에, 에너지 효율적인 데이터 전달 방법과 오류에 강한 데이터 전달 방법에 대한 연구들이 지난 수년간 수행되어 왔다.

일반적으로 무선 송수신 모듈이 활성화되었을 때 노드가 소비하는 에너지의 양은 무선 송수신 모듈이 비활성화되었을 때 노드가 소비하는 에너지의 양에 비하여 월등히 크다<sup>[2]</sup>. 따라서 무선 센서 망에서 에너지 효율적인 데이터 전달 방법에 대한 기존 연구<sup>[2-6]</sup>들은 무선 송수신 모듈을 활성화시킨 센서 노드의 수를 최소화하는 것에 초점을 맞추었다. 이와 같은 연구들은 크게 두 가지 부류로 나누어진다. 첫 번째 부류에서는, 센서 망을 여러 개의 클러스터로 나눈 뒤 각 클러스터에서 클러스터 헤더로 선출된 노드의 무선 송수신 모듈만 활성화시킨다. 이는 목적지 노드로의 데이터 전달에 참여하는 노드의 수를 최소화하기 위함이다. 이러한 부류에는 GAF (Geographical Adaptive Fidelity)<sup>[2]</sup>와 SPAN<sup>[3]</sup>이 속한다. 두 번째 부류에서는, Duty Cycle 개념을 이용하여 센서 노드가 지정된 기간(Listen Interval) 동안 무선 송수신 모듈을 활성화시켜 데이터 전달에 참여할 지 여부를 검사한다. 송수신할 정보가 존재하는 경우에는 무선 모듈의 활성화 상태를 유지하지만 그렇지 않은 경우에는 지정된 기간(Sleep Interval) 동안 무선 송수신 모듈을 비활성화한다. 이러한 부류에는 S-MAC(Sensor Medium Access Control)<sup>[4]</sup>, STEM(Sparse Topology and Energy Management)<sup>[5]</sup> 및 GeRaF(Geographic Random Forwarding)<sup>[6]</sup>이 속한다.

센서 노드는 제한적인 양의 배터리 전원으로 동작한다는 특징과 더불어, 상당 수준의 패킷 손실과 노드 고장이 발생 가능한 열악한 환경에서 동작한다는 특성을 가지고 있다. 따라서 오류에 강한 데이터 전달 기법으로 GRAB(Gradient Broadcasting)<sup>[7]</sup>이 제안되었다. GRAB의 핵심 아이디어는 단일 센서 노드에게 데이터를 전달하는 대신에 복수의 센서 노드에게 데이터를 전달함으로써 목적지 노드에서의 데이터 도착 확률을 높이는 것이다. 일반적인 무선 통신에서 하나의 노드가 데이터를 송신하면 그 노드의 전송 영역(Transmission Range)에 속한 모든 노드는 송신된 데이터를 수신할 수 있다.

그럼에도 불구하고, 전통적인 데이터 포워딩 방법들은 송신 노드가 수신 노드를 지정하여 데이터를 전송하도록 한다. 그러나, 패킷 손실과 노드 고장이 빈번하게 발생할 수 있는 센서 망에서는 수신 노드를 지정하여 전달하는 것보다 송신 노드는 데이터를 브로드캐스트하고 수신 노드가 수신 데이터의 전달 여부를 판단하는 것이 보다 안정적이다. GRAB에서 이와 같이 여러 개의 경로로 목적지 노드에 데이터를 전달하는 방법을 인터리빙 경로를 이용한 전달 방법(Forwarding using Interleaving Paths)이라 부른다.

이러한 연구 결과들을 바탕으로, 신뢰성있고 에너지 효율적인 데이터 전달 기법인 C-GeF(Cluster-based Geographic Forwarding)<sup>[8]</sup>와 REEF(Reliable and Energy Efficient Forwarding)<sup>[9]</sup>가 제안되었다. C-GeF는 보고할 데이터의 발생 확률이 극히 낮은 무선 센서 망 동작 환경에서 에너지 효율적인 데이터 전달을 위하여 센서 망을 클러스터로 구분한다. 그리고 각 클러스터에 속한 노드들이 무선 송수신 모듈을 활성화시킬 타임 슬롯을  $k$ -홉 이웃한 클러스터들로 구성되는 클러스터 군 내에서 유일한 값으로 지정한다. 이는 송신 노드의 전송 영역에 속한 클러스터들 중에서 수신 클러스터가 아닌 다른 클러스터의 센서 노드들이 불필요하게 정보를 수신하는 것(Overhearing)을 방지하여 에너지를 절감하기 위함이다. C-GeF에서 송신 노드는 수신 클러스터를 결정한 뒤 수신 클러스터의 노드들이 무선 송수신 모듈을 활성화시킬 타임 슬롯에 자신의 무선 송수신 모듈을 활성화시켜 데이터를 송신한다. 수신 클러스터의 선택은 송신 클러스터와 목적지 노드의 위치 정보를 이용하여 결정된다. 수신 클러스터에 속한 어떤 노드가 데이터를 수신해야 하는지를 송신 노드가 지정하지는 않는다. REEF는, C-GeF와 같이 동작하는 클러스터 기반 센서 망에서 GRAB의 인터리빙 경로를 이용한 전달 방법과 유사하게, 수신 클러스터에 속한 여러 센서 노드가 지정된 타임 슬롯에 무선 송수신 모듈을 활성화하여 데이터 전달에 참여하는 기법이다. 그러나, GRAB과는 달리, REEF에서는 데이터를 수신한 노드들이 Binary Exponential Backoff 알고리즘<sup>[10]</sup>을 통하여 데이터 수신에 대한 ACK 메시지 전송을 경쟁하여 오직 하나의 수신 노드만이 ACK 메시지를 송신하도록 한다. ACK를 송신한 수신 노드는 수신한 데이터를 다음 클러스터로 전송할 수 있지만, ACK를 송신하지 못한 수신 노드들은 불필요한 데이터 송신을 막

기 위하여 수신한 데이터를 버퍼로부터 삭제한다. 이와 같은 동작하는 REEF는 GRAB의 인터리빙 경로를 이용한 전달 방법보다 안정적이고 에너지 효율적으로 목적지 노드까지 데이터를 전달한다.

본 논문은, C-GeF의 목표 환경과는 달리 보고할 데이터 발생 확률이 낮은 값부터 높은 값까지 가변적인 환경에서, 클러스터 기반 센서 망에 적합한 에너지 효율적인 토폴로지 관리 방법을 개발하기 위한 기반 연구로 세가지 종류의 데이터 전달 방법의 성능을 비교 분석한다. 본 연구의 목표 응용으로 센서 노드들을 지정된 위치에 설치할 수 있는 원자력 발전소에서의 방사능 수치 감시, 유적 상태 감시, 공공 교통 상황 감시 등이 고려되고 있다. 분석될 첫 번째 방법은, GAF와 유사하게, 각 클러스터의 헤더들만 무선 송수신 모듈을 활성화시켜 RTS(Request To Send), CTS(Clear To Send), DATA, ACK(Acknowledgement) 메시지 송수신에 참여하는 방법이다. 두 번째 방법은 각 클러스터당 다수 노드들이 이상의 메시지 교환에 참여하는 방법으로, DATA 메시지 수신과 ACK 메시지 전송 경쟁은 REEF의 방법을 따른다. 마지막 방법은 첫 번째 방법과 두 번째 방법을 혼합한 방법이다. 세 번째 방법에서는, RTS/CTS와 같은 제어 메시지 교환에 참여하기 위하여 각 클러스터 당 하나의 노드만 무선 송수신 모듈을 활성화하지만, RTS 메시지에 자신의 ID가 포함되어 있는 수신 클러스터에서는 다수 노드들이 무선 송수신 모듈을 활성화하여 DATA 메시지(또는 데이터 패킷) 수신과 ACK 메시지 송신에 참여하는 방법이다. 시뮬레이션을 통하여, 세 번째 데이터 전달 방법이 패킷 손실이 발생하는 대부분의 조건에서 다른 방법들에 비하여 에너지 효율적이라는 것을 확인한다. 또한 패킷 손실 확률이 0인 환경에서는 최소한의 노드만 데이터 전달에 참여하는 첫 번째 방법이 가장 효율적이지만 세 번째 방법과 큰 차이가 없다는 것도 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 성능 분석 대상인 세가지 데이터 전달 방법의 동작을 설명하고, 3장에서는 시뮬레이션을 통하여, 클러스터당 활성화될 노드의 수와 부하 및 패킷 손실 확률에 따라 세 가지 방법들의 에너지 소모량을 비교 분석한다. 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 분석될 데이터 전달 방법들

센서망의 동작 환경은 목표 응용에 따라 현저히

달라질 수 있다. 본 논문에서는 사용자가 원하는 곳에 센서 노드들을 위치시킬 수 있는 원자력 발전소에서의 방사능 수치 감시와 유적 상태 감시 및 공공 교통 상황 감시 등을 목표 응용으로 정한다. 이러한 응용에서는 센서 노드들의 위치에 근거한 클러스터 구성이 용이할 뿐만 아니라, 송신 노드가 송신 클러스터의 중심으로부터 목적지 노드로의 벡터를 이용하여 수신 클러스터를 손쉽게 구할 수 있어서 인접 클러스터와의 상태 정보 교환 부담이 없어진다<sup>8)</sup>. 본 장에서는 이와 같은 클러스터 기반 센서 망에 적용 가능한 세가지 데이터 전달 방법에 대하여 서술한다.

본 논문에서 비교 분석할 세가지 데이터 전달 방법들의 클러스터간 기본적인 데이터 전달 형태는 그림 1과 같다. 이하에서 분석될 세가지 데이터 전달 방법을 각각 DDM1(Data Delivery Mechanism 1), DDM2 및 DDM3라 표기한다. 그림 1의 a)는 각 클러스터의 헤더들만 데이터 전달에 참여하는 DDM1의 동작을 보여준다. 송신 클러스터에서 무선 송수신 모듈이 활성화되어 있는 노드가 RTS 또는 DATA 메시지에 수신 클러스터의 ID를 첨부하여 송신하면, 수신 클러스터에서 무선 송수신 모듈이 활성화되어 있는 노드가 해당 메시지를 수신하고 그에 대한 응답으로 CTS 또는 ACK 메시지를 송신한다. 그림 1의 b)는 분석될 두 번째 데이터 전달 방법인 DDM2의 동작을 보여준다. 송신 클러스터에서 무선 송수신 모듈이 활성화되어 있는 노드가 수신 클러스터의 ID를 RTS 또는 DATA 메시지에 첨부하여 송신하면, 수신 클러스터에서 무선 송수신 모듈이 활성화되어 있는 노드들이 해당 메시지를 수신한다. 그리고 Binary Exponential Backoff 알고리즘에 따라 수신 노드들 중 하나의 노드만 CTS 또는 ACK 메시지를 송신한다. ACK 메시지를 송신하지 못한 수신 노드들은 수신 버퍼에서 DATA 메시지를 삭제함으로써, 향후 DATA 메시지의 전달이 오직 하나의 노드에 의해 수행되도록 한다. 분석될 세 번째 데이터 전달 방법인 DDM3에서는, RTS/CTS 메시지를 DDM1과 같은 방법으로 송수신하고, DATA/ACK 메시지 교환을 DDM2와 동일한 방법으로 교환한다. 분석될 세 가지 방법의 구체적인 동작은 다음과 같다.

본 논문은 DDM1, DDM2 및 DDM3의 MAC 프로토콜이 S-MAC과 유사하게 동작한다고 가정한다. S-MAC에서는 Listen Interval과 Sleep Interval이 그림 2와 같이 반복된다. 센서 노드들은 Listen

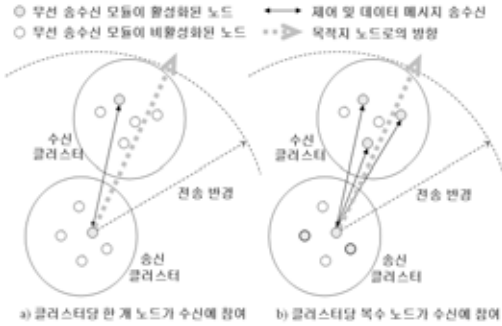


그림 1. 비교 분석될 데이터 전달 방법들의 기본 동작



그림 2. S-MAC의 기본 동작: 주기적인 Listen / Sleep Interval 반복

Interval 동안 RTS/CTS 교환으로 송수신할 데이터의 존재 여부를 판단하고, 송수신할 데이터가 없는 경우 Sleep Interval 동안 무선 송수신 모듈을 비활성화하여 에너지를 절감한다. 이와 유사하게 DDM1, DDM2 및 DDM3에서는 Listen Interval 동안 RTS/CTS 메시지를 교환하고, 송수신할 데이터가 있는 경우 무선 송수신 모듈의 활성화 상태를 유지하여 DATA/ACK 메시지를 송수신하지만, 송수신할 데이터가 없는 경우에는 Sleep Interval 동안 무선 송수신 모듈을 비활성화한다.

그림 3은 S-MAC에 기반한 DDM1, DDM2 및 DDM3에서의 타임 슬롯을 보여준다. 하나의 타임 슬롯은 Listen Interval  $T_L$ , Wake-Up Interval  $T_W$  및 Data Forwarding Interval  $T_F$  로 구성되는데, 그림 3의 a)는  $T_W$  가 0인 경우의 타임 슬롯을 보여준다. 센서 노드들의 RTS/CTS 메시지 교환은  $T_L$  동안 이루어지며, DATA/ACK 메시지 교환은  $T_F$  동안 이루어진다. 송수신할 데이터가 없는 경우에 센서 노드는  $T_F$  동안 무선 송수신 모듈을 비활성화한다. 비교 대상인 세가지 데이터 전달 방법 중에서 클러스터당 한 개 혹은 다수의 노드가 고정적으로 RTS/CTS/DATA/ACK 송수신에 참여하는 DDM1 및 DDM2는 그림 3의 a)와 같이 구성된 타임 슬롯에 따라 제어 메시지 및 DATA 메시지를 송수신한다.

그러나, DDM3에서는 RTS를 수신한 수신 클러스터의 노드가 DATA 메시지 수신을 위하여 무선 송수신 모듈을 비활성화하고 있는 노드들 중에서 일정한 수의 노드를 깨우는 절차를 필요로 한다. 따

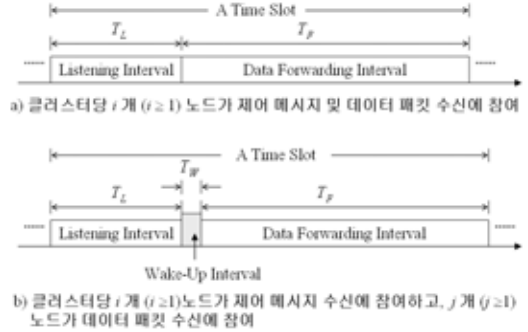


그림 3. 비교 분석될 데이터 전달 방법에서의 타임 슬롯

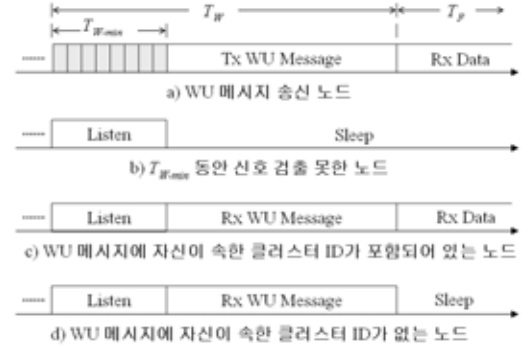


그림 4. WU 메시지 송수신 노드들의 무선 송수신 모듈 활성화/비활성화

라서 DDM3의 타임 슬롯에는, 그림 3의 b)와 같이, 값이 0이 아닌  $T_W$ 가 포함된다. DDM3에서 DATA 메시지 수신에는 참여하지만 RTS 수신에는 참여하지 않는 노드들은  $T_L$  동안 무선 송수신 모듈을 비활성화한다. 대신에, 그 노드들은 그림 4의 b), c), d)와 같이  $T_{W-min}$  동안에 무선 송수신 모듈을 활성화해야 한다. 이는 자신의 클러스터 ID를 목적지 클러스터로 지정한 RTS를 수신한 노드가 다른 노드들을 깨우기 위하여 송수신하는 프리앰블을 수신하기 위함이다. RTS 수신 노드는 그림 4의 a)와 같이  $T_{W-min}$  동안 프리앰블 신호를 송출하고( $T_W - T_{W-min}$ ) 동안 WU 메시지를 송수신한다. WU 메시지에는 메시지 송신 노드가 속한 클러스터의 ID가 포함되어 있다. DATA 메시지 수신에는 참여하지만 RTS 수신에는 참여하지 않은 노드들은  $T_{W-min}$  동안 신호의 존재를 확인하지 못하면 주변에 WU 메시지 송신 노드가 없다고 판단한다. 따라서, 그림 4의 b)와 같이( $T_W - T_{W-min}$ )과 다음  $T_F$  및  $T_L$  동안 무선 송수신 모듈을 비활성화 시킨다.  $T_{W-min}$  동안 신호의 존재를 확인한 노드들은 자신이 속한 클러스터가 수신 클러스터인지 확인하기 위하여( $T_W - T_{W-min}$ ) 동안 WU

메시지를 수신한다. 수신한 WU 메시지에 자신이 속한 클러스터의 ID가 포함되어 있으면 그림 4의 c)와 같이 DATA 메시지 수신을 위하여  $T_F$  동안 무선 송수신 모듈을 활성화한다. 그렇지 않으면 그림 4의 d)와 같이 다음  $T_F$  및  $T_L$  동안 무선 송수신 모듈을 비활성화한다.

### III. 성능 분석

성능 분석을 위하여 그림 5와 같이 6x5 클러스터들로 구성되는 센서 네트워크 모델에서 시뮬레이션을 수행한다. 그림 5에서 사각형 경계에 위치한 클러스터는 반대편 경계에 위치한 클러스터와 동일한 클러스터이다. 예를 들어, 사각형 모서리에 위치한 클러스터 (5,9)는 시계 방향으로 클러스터 (5,1), (0,0), (0,8), (5,7), (4,8), (4,0)를 인접 클러스터로 가진다. 시뮬레이션의 단순화를 위하여 센서 노드들은 각 클러스터의 중앙에 위치한다. 센서 노드의 송신 거리는 그림 6의 a)와 같이 인접 클러스터의 영역을 모두 포함할 수 있는 값으로 지정되며, 하나의 클러스터에서 인접 클러스터의 인덱스는 그림 6의 b)와 같이 계산된다.

DDM1, DDM2 및 DDM3을 동일한 환경에서 비교하기 위하여, 시뮬레이션에서는 각 클러스터당 3개의 센서 노드를 생성한다. 그리고, DDM1에서는 한 개의 노드만 무선 송수신 모듈을 활성화할 수 있고, 나머지 두 개 노드는 시뮬레이션이 끝날 때까지 무선 송수신 모듈을 비활성화하게 한다. DDM2에서는 클러스터당 3개의 노드가 무선 송수신 모듈을 활성화하여 RTS/CTS/DATA/ACK 송수신에 참여하도록 한다. DDM3에 대해서는 두 가지 환경에

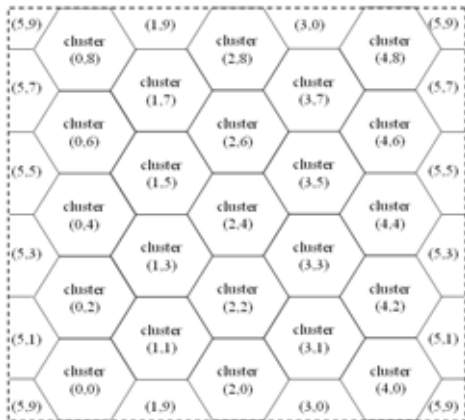


그림 5. 시뮬레이션될 클러스터 기반 센서 네트워크 모델

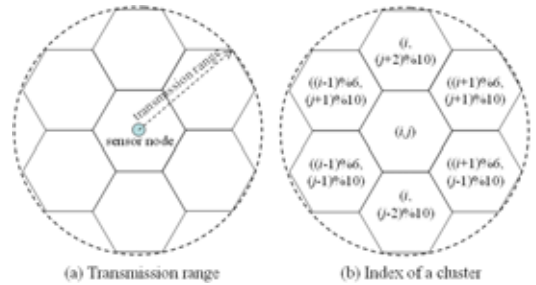


그림 6. WU 메시지 송수신 노드들의 무선 송수신 모듈 활성화/비활성화

서 시뮬레이션을 수행한다. 첫째는 RTS/CTS 교환을 위하여 한 개의 노드가 활성화될 수 있고, WU/DATA 수신 및 ACK 송신을 위하여 추가로 한 개의 노드가 활성화될 수 있으며, 나머지 한 개 노드는 시뮬레이션이 끝날 때까지 무선 송수신 모듈을 비활성화하는 환경으로, 본 시뮬레이션에서는 이를 DDM3(1)으로 표현한다. 둘째는 RTS/CTS 교환을 위하여 한 개의 노드가 활성화될 수 있고, WU/DATA 수신 및 ACK 송신을 위하여 추가로 두 개의 노드가 활성화될 수 있는 환경으로, 본 시뮬레이션에서는 이를 DDM3(2)로 표현한다.

시뮬레이션에서 센서 노드는 이웃 클러스터 중 하나를 목적으로 하여 데이터를 전송하거나, 이웃 클러스터 중 하나로부터 데이터를 수신하는데, 각각의 이웃 클러스터로 데이터를 송신할 확률은 동일하다. 각 클러스터에서 전송해야 할 데이터의 생성률(Arrival Rate)은  $\lambda$ 를 평균으로 하는 Poisson 분포를 따른다. 그리고, DATA 메시지 손실 확률을  $e$ 라고 할 때, RTS/CTS/WU/ACK 메시지 손실 확률을  $0.1 \times e$ 로 지정한다. 왜냐하면, 제어 메시지는 DATA 메시지에 비하여 크기가 작기 때문에 상대적으로 낮은 손실 확률을 가지며, 제어 메시지에 리던던시가 높은 FEC(Forward Error Control) 코드를 사용할 경우 제어 메시지 손실 확률을 0에 근접하도록 낮출 수 있기 때문이다<sup>12)</sup>.

본 시뮬레이션에서, 송신(Tx), 수신(Rx), 무선 모듈 활성화 대기(Idle), 무선 모듈 비활성화 대기(Sleep)에 소모되는 에너지는 각각 60mW, 12mW, 12mW, 2mW으로 지정한다<sup>7, 9)</sup>. 또한, 프리앰블의 전송 시간  $T_{w-min}$ 은 1msec, WU 메시지 전송 시간  $(T_w - T_{w-min})$ 은 2msec으로 지정하며, RTS/CTS/ACK와 같은 제어 메시지 전송 시간  $T_{ctrl}$ 와 DATA 메시지 전송 시간  $T_{data}$ 는 각각 20msec과 100msec으로 지정한다. 각 시간 값은 센서 노드의 데이터 전송 속도와 제어 메시지 및 DATA 메시지의 길이에 따

라 다른 값으로 지정될 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 각 시간 값을 WU 메시지 전송 시간의 배수 값으로 지정하였다. 클러스터 ID를 포함하는 WU 메시지의 크기를 2 바이트라 하고 RTS/CTS 메시지의 크기를 IEEE 802.11에서의 크기와 동일하게 20 바이트라 하면<sup>[11]</sup>, 제어 메시지 전송 시간은 WU 메시지 전송 시간의 10배로 계산된다. Listen Interval  $T_L$ 과 Data Forwarding Interval  $T_F$ 는 제어 메시지 송수신과 DATA 메시지 송수신 시간에 각 센서 노드의 random backoff 시간을 위한 여분 시간을 더하여 각각 50msec과 130msec으로 지정한다.

그림 7, 8, 9는 각 클러스터에서 전송해야 할 데이터의 생성률  $\lambda$ 의 값이 각각 0.01, 0.1, 0.5일 때, 성능 분석될 3가지 데이터 전달 방법에서 전달에 성공한 데이터 당 센서 네트워크가 소모한 에너지 값을 보여준다. 그림 7은 데이터 생성률  $\lambda$ 가 아주 낮을 때 전달에 성공한 데이터 당 데이터 센서 네트워크가 소모한 에너지 값을 보여주며, 그림 7과 그림 8은 데이터 생성률  $\lambda$ 가 점차 커짐에 따라 DDM1, DDM2 및 DDM3에서의 에너지 소모량의 변화 형태를 보여준다.

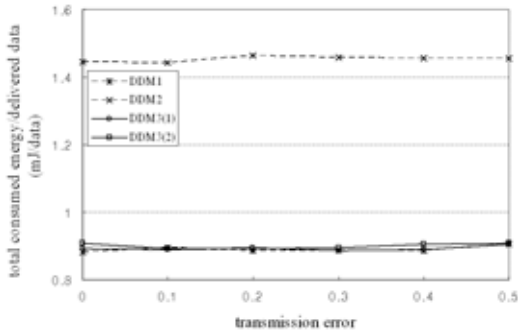


그림 7.  $\lambda=0.01$ 일 때, DATA 메시지 손실 확률 변화에 따른 전달 성공한 데이터 당 센서 네트워크가 소모한 에너지 값

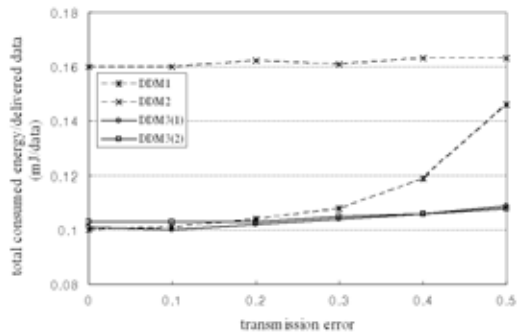


그림 8.  $\lambda=0.1$ 일 때, DATA 메시지 손실 확률 변화에 따른 전달 성공한 데이터 당 센서 네트워크가 소모한 에너지 값

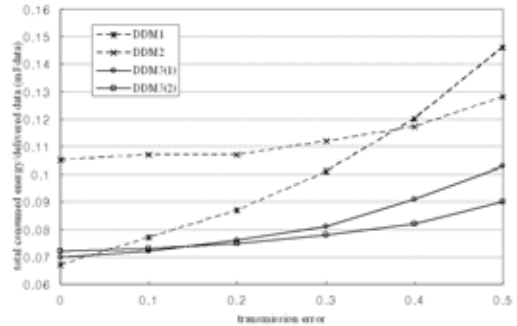


그림 9.  $\lambda=0.5$ 일 때, DATA 메시지 손실 확률 변화에 따른 전달 성공한 데이터 당 센서 네트워크가 소모한 에너지 값

그림 7의 결과를 살펴보면, 클러스터 당 하나의 노드만 데이터 송수신에 참여하는 DDM1과 제어 메시지 송수신에는 클러스터 당 하나의 노드만 참여하고 DATA 메시지 수신에는 클러스터 당 한 개 혹은 두 개의 노드가 참여하는 DDM3(1), DDM3(2)에서의 에너지 소모량은 거의 비슷하다. 반면에 클러스터 당 세 개의 노드가 항상 데이터 전달에 참여하는 DDM2에서 센서 노드의 에너지 소모량은 월등히 높다. 이와 같은 결과는 DDM2에서 세 개의 센서 노드가 송수신할 데이터가 없음에도 불구하고  $T_L$  동안 항상 깨어있기 때문에 발생한다. 이에 반하여 DDM3(1), DDM3(2)에서의 에너지 소모량이 DDM1에서의 에너지 소모량과 거의 대등한 이유는, 송수신할 데이터가 없는 경우,  $T_L$  동안은 클러스터 당 한 개의 노드만 깨어 있고 나머지 한 개 혹은 두 개의 노드가  $T_{W-min}$  동안만 짧게 깨어 있기 때문이다.

그러나, 메시지 생성률과 손실 확률이 커짐에 따라 DDM3(1), DDM3(2)에서의 에너지 소모량 변화의 폭이 DDM1에서의 에너지 소모량 변화폭보다 월등히 작아서, DDM3(1), DDM3(2)가 대부분 구간에서 DDM1보다 에너지 효율적임을 그림 8과 그림 9로부터 확인할 수 있다. 물론 DATA 메시지 손실 확률  $e$ 가 0인 경우에는 작은 차이이기는 하지만 여전히 DDM1이 DDM3(1), DDM3(2)보다 항상 에너지 효율적이다. 이러한 결과는 DATA 메시지 손실 확률이 증가함에 따라 DDM1에서의 DATA 메시지 재전송 확률이 DDM3(1), DDM3(2)에 비하여 급격히 증가하기 때문에 발생하며, 메시지 생성률  $\lambda$ 가 커짐에 따라 보다 명확하게 확인할 수 있다.

이상의 성능 분석 결과를 종합하면, 다음과 같다. DATA 메시지 손실 확률이 0일 때에는 메시지 생성률 값에 관계없이 DDM1이 가장 에너지 효율적이다. 그러나, 메시지 생성률과 DATA 메시지 손실

확률이 일정 값 이상으로 증가하면 DDM3이 가장 에너지 효율적이 된다. 이러한 결과로부터 우리는, 메시지 생성률과 손실 확률에 따라 각 클러스터당 데이터 전달에 참여하는 노드의 수를 동적으로 조절하는, 적응적 토폴로지 관리 기법의 필요성을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 클러스터 기반 센서 망에서 동작 가능한 세가지 종류의 데이터 전달 방법들인 DDM1, DDM2 및 DDM3의 성능을 비교 분석하였다. 성능 분석 결과, DATA 메시지 손실 확률이 0일 때에는 클러스터의 헤더들만 무선 송수신 모듈을 활성화시키는 DDM1이 가장 효율적이었지만, 무선 송수신 모듈이 활성화된 노드의 수를 동적으로 증가시키는 DDM3과 크게 차이 나지 않음을 확인하였다. 또한, 메시지 생성률과 손실 확률이 증가함에 따라, DDM3이 가장 에너지 효율적이 된다는 것도 확인하였다. 이러한 성능 결과는 메시지 생성률과 손실 확률에 따라 각 클러스터당 데이터 전달에 참여하는 노드의 수를 동적으로 조절하는, 적응적 토폴로지 관리 기법이 필요하다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구 결과를 기반으로 동작 환경에 적응적으로 동작하는 토폴로지 관리 기법을 개발하려 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] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", In Proc. ACM/IEEE MobiCom'01, July 16-21, 2001.

[3] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, "SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks", In Proc. ACM/IEEE MobiCom'01, pp.85-96, July 16-21, 2001.

[4] 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.

[5] 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.

[6] M. Zorzi, 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.

[7] F. Ye, G. Zhong, S. Lu and L. Zhang, "GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks", ACM Wireless Networks(WINET), vol.11, no.2, March 2005.

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

[9] J. Jung, T. Park and C. Kim, "A Forwarding Scheme for Reliable and Energy-Efficient Data Delivery in Cluster-based Sensor Networks", IEEE Communications Letters, vol.9, no.2, pp112-114, Feb. 2005.

[10] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications", 1999.

[11] Y. Chen, E. G. Sirer and S. B. Wicker, "On Selection of Optimal Transmission Power for Ad hoc Networks", Proceedings of the 36<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Science, pp. 300-309, 6-9 Jan. 2003.

[12] B. Deb, S. Bhatnagar and B. Nath, "Information Assurance in Sensor Networks", Second ACM international conference on Wireless sensor networks and applications, pp. 160-168, Sep. 19, 2003.

박 태 근 (Taekun Park)

정회원



1991년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 졸업

1993년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석사

2004년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사

2004년 9월~현재 단국대학교 전

자컴퓨터학부 전임강사

<관심분야> 이동 통신 프로토콜, 유/무선 망 QoS, IP 기반 통합망, 멀티미디어 통신망