

# 무선 센서 네트워크에서의 GAF(Geographical Adaptive Fidelity)의 개선 방안에 관한 연구

정희원 정 원 수\*, 종신회원 윤 찬 영\*\*, 정희원 오 영 환\*

## A Research on Implement GAF(Geographical Adaptive Fidelity) for Wireless Sensor Networks

Won-Soo Jung\* *Regular Member*, Chan-Young Yun\*\* *Lifelong Member*,  
Young-Hwan Oh\* *Regular Member*

### 요 약

무선 센서 네트워크는 에너지 제한적인 특성으로 인하여 에너지를 효율적으로 사용하는 것을 최우선으로 한다. 기존의 무선 센서 네트워크에서는 등방성의 안테나를 사용하나, 실질적으로 센서 노드의 각도 및 방향에 따라 안테나는 방향성을 가지게 되며, 방향에 따라 크기는 2배의 전송 거리의 차이를 나타내고 있다. 본 논문에서는 송신 전력인 1mW를 이용하는 Zigbee 기반의 센서 네트워크에서 각 센서 노드들의 방향성을 고려하여 센서 네트워크를 구성함으로써 에너지 효율적인 전송을 제공하도록 제안한다. 제안한 환경에서의 성능평가를 위해 센서 노드가 고정된 통신반경에서 멀티 홉 전송을 위해 가장 멀리 떨어진 센서 노드에게 전송하는 GAF 라우팅을 이용하여 보다 에너지 효율적인 전송이 가능하다. 즉, 센서 네트워크에서 통신에 참여하는 센서 노드의 수를 줄임으로서 결과적으로 에너지 효율적인 통신이 가능토록 하였으며, 보다 적은 수의 센서 노드로 네트워크의 구성이 가능함을 알 수 있다.

**Key Words** : Wireless sensor network, Zigbee, GAF

### ABSTRACT

The sensor node have restricted energy condition. The sensor node have a matter of the highest priority that using efficient energy. The existing WSN considered antenna as isotropic. But the sensor node have directional transmission range by an angle and direction of setting the sensor node. The sensor node have different transmission range by same transmission power. The directional transmission range is twice as long as nondirectional transmission range. In this paper, we proposed energy efficient sensor node deployment for WSN using the 1mW transmission power. GAF routing algorithm goal is that same transmission power is used to transmit the packet for node be located by maximum range. Because proposed sensor networks consist of less the sensor needs than exiting WSN, Proposed sensor networks provide energy efficiency for GAF routing algorithm.

### I. 서 론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)는

최근 대두되고 있는 유비쿼터스 컴퓨팅의 연구에 힘입어 이에 대한 관심이 커지고 있으며 유·무선 네트워크 인프라에 상황인지를 위한 다양한 센서

\* 광운대학교 전자통신공학과 통신망연구실 (sootan77@dreamwiz.com), \*\* 계원조형예술대학 임베디드소프트웨어과 (cksdud@kaywon.ac.kr)  
논문번호 : 08050-0724, 접수일자 : 2008년 7월 24일

노드와 결합하여 수집된 정보를 상위 노드 및 응용 시스템으로 전달하여 용도에 맞게 활용하는 기술로 재난방제, 환경감시, 물류관리, 보안, 의료 환경 등의 다양한 환경에 적용을 시도하고 있다<sup>[1][2]</sup>.

센서 노드는 배터리를 사용하는 저전력 저가의 시스템으로 에너지 사용에 제약을 받으며 배터리가 소모되어 노드의 동작이 멈추면 더 이상 네트워킹의 수단으로 사용될 수 없다. 따라서 무선 센서 네트워크는 노드에 사용되는 전력의 사용을 효율적으로 하여 네트워크의 생존시간(Lifetime)을 최우선으로 생각한다<sup>[3]</sup>.

Zigbee는 센서 네트워크의 기본 기술로 사용되고 있으며, 2.4GHz의 주파수 대역을 사용하고 있으며 Zigbee Alliance는 1mW(0dBm)의 송신전력을 이용하여 10~75m의 구간의 데이터 전송을 정의하고 있으나 실제 사용하는 센서 노드는 100m 이상까지 전송이 가능하다<sup>[4][5]</sup>.

센서 노드는 소형화, 저비용, 높은 에너지 효율을 요구하며 시스템 구성은 센서 제어 회로, CPU, 무선 통신 모듈, 안테나, 전원 장치 그리고 다양한 센서로 구성된다. 센서 노드는 소형화를 위해 외부 안테나가 아닌 센서 노드와 일체형의 PCB안테나를 사용한다. 이로 인해 실질적으로 센서 노드는 등방성의 통신 반경을 가지지 못하고 센서 노드의 위치에 따라 다양한 통신 반경을 가지게 되어 의도하지 못한 방향성을 가지게 된다. 하지만, 센서 노드의 이러한 특성을 고려하지 않고 등방성의 통신 반경을 이용하여 MAC과 Network 계층에서의 에너지 소모를 줄이기 위한 많은 연구가 진행 중이다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 기존에 에너지 효율적인 프로토콜로서 많은 연구가 진행 중인 MAC과 Network 계층에서의 에너지 효율적인 프로토콜이 아닌 센서 네트워크의 기본적인 통신환경을 제공하는 PHY 계층에서의 에너지 효율적인 방안을 제안한다.

제안한 PHY 계층에서의 에너지 효율적인 방안은 1mW라는 고정된 송신전력을 이용한 멀티 홉 환경의 무선 센서 네트워크에서 센서 노드가 가지는 방향성을 고려하여 동일 규격의 필드 내에서 실제 통신에 참여하는 노드의 수를 등방성 안테나의 센서 노드보다 적게 사용함으로써 실질적으로 전체 네트워크의 구현 및 운영에 있어서 기존의 등방성 안테나의 센서 노드보다 더 적은 수의 센서 노드로 네트워크 구성이 가능하다.

제안한 알고리즘의 성능평가는 기존의 등방성 안테나를 가진 센서 노드와 센서 노드의 각도 및 위

치에 따른 방향성을 갖는 센서 노드와 최대 에너지 효율을 보일 수 있도록 격자형의 노드 배치 구조에서 통신 반경을 고려한 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜인 GAF(Geographical adaptive fidelity)을 이용하여 에너지 소모율을 비교하였으며, 실측된 데이터와 비교하기 위해 실제 통신 환경과 유사하게 간섭원의 존재 상황에서의 시뮬레이션이 가능하도록 유럽 전파 통신 위원회인 ERO (European Radio-communication Office)에서 개발한 Seamcat 시뮬레이터를 사용하여 성능 비교하였다<sup>[7][8][9][10]</sup>.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무선 센서네트워크와 GAF프로토콜에 대해 알아본다. 3장에서는 제안한 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 센서 노드의 배치를 소개한다. 4장에서는 제안한 네트워크의 PHY 프로토콜의 성능평가를 수행하고 결과에 따른 비교 및 고찰을 기술한다. 마지막으 로 제 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 관계이론

### 2.1. 무선 센서 네트워크

센서 네트워크란, 컴퓨팅 능력을 가진 매우 작은 크기의 독립된 무선 센서 노드들을 건물, 도로, 산악, 의류, 인체 등 물리적 공간인 센서 필드에 임의 배치하여 독립된 네트워크를 구성하고 주위의 온도, 빛, 진동, 생체신호 등의 정보 수집을 목적으로 하는 네트워크 기술을 의미한다. 센서 노드들은 센서 필드에 조밀하게 임의 배치되며 AP와 같은 고정된 기반 없이 센서 노드 간 자율적이고 독립적인 네트워크 토폴로지를 구성한다. 또한 센서 노드의 이동성을 고려하여 제한된 에너지를 갖기 때문에 센서 노드는 에너지 의존적인 다양한 기술들을 사용한다.

센서 노드는 위치한 센싱 영역내의 정보 수집을 목적으로 하며 인접한 센서 노드 및 싱크(Sink) 노드와 연결된다. 싱크 노드는 인터넷과 같은 외부 네트워크 및 시스템과 연결되어 있으며, 사용자 및 시

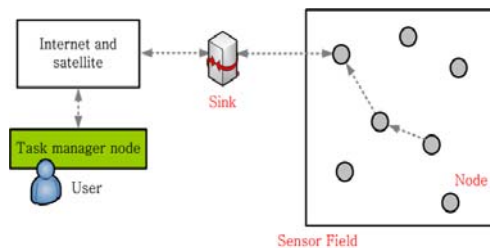


그림 1. 무선 센서 네트워크 구조

시스템은 센서 필드에 질의(Query) 메시지를 보내거나 센서 노드로부터 수집된 센서 필드의 정보를 전달 받게 된다. 센서 노드는 소형화, 저비용, 높은 에너지 효율을 요구하며 시스템 구성은 센서 제어 회로, CPU, 무선 통신 모듈, 안테나, 전원 장치 그리고 다양한 센서로 구성된다.

센서 네트워크의 일반적인 구조는 그림 1과 같다.

### 2.2 Zigbee

Zigbee는 IEEE 802.15.4 기반으로 하는 WPAN 기술로 높은 에너지 효율을 보이며 적은 비용으로 센서 네트워크를 구현하기에 최적의 방안을 제공하는 기술의 하나로 다양한 센서 네트워크 응용 분야에 대한 기술 개발이 이루어지고 있다.

Zigbee에서는 PHY와 MAC은 IEEE 802.15.4 WPAN 기술의 PHY와 MAC을 사용하고 있으며, 네트워크 계층과 응용 계층과 같은 상위 계층에서의 프로토콜은 Zigbee Alliance에서 정의 하고 있으며, 그림 2는 정의된 Zigbee 시스템 구조를 보여주고 있다.

IEEE 802.15.4 표준규격에서는 868MHz(BPSK/1 채널/유럽), 902~928MHz(BPSK/10 채널/미국), 2.4GHz(OQPSK/16 채널/전 세계) 등 3개의 주파수 대역에서 DSSS 변조 방식으로 최대 100m까지 20~250Kbps의 전송 속도를 지원할 수 있도록 정의 하고 있다. 또한 주소에 64비트를 할당함으로써 최

ZA1	ZA2	...	ZAn	IA1	IAn
API				UDP	
ZigBee NWK				IP	
				802.2 LLC	
				MAC (SSCS)	
IEEE 802.15.4 MAC (CPS)					
IEEE 802.15.4 PHY					

그림 2. Zigbee 시스템 구조

대 65,000개의 노드를 사용할 수 있으며, 액세스 방법으로 CSMA/CA를 사용하며, QoS를 위해 GTS 메커니즘을 도입하고 있다. 또한 리피터를 사용해 네트워크를 수 km 이상으로 확장 가능함은 물론, Ad-Hoc, Star, Mash, Cluster 등의 다양한 토폴로지로 네트워크를 구성할 수 있다.

### 2.3 Geographical adaptive fidelity (GAF)

위치 기반의 라우팅 프로토콜인 GAF는 센서 네트워크 전체를 노드가 통신할 수 있는 범위를 기준으로 가상의 격자로 나누고, 격자의 구성에 따른 센서 네트워크의 위치 정보를 이용한다.

그림 3은 GAF에서의 센서 네트워크의 구조를 나타낸다.

A 격자 내부의 노드는 B, C 격자 내부의 어떤 노드와도 통신이 가능하도록 노드의 통신 반경에 맞는 격자의 크기 r을 선택해야 한다. 식 (1)은 통신반경을 고려한 격자의 크기를 구하기위한 수식이다.

$$r^2 + 2r^2 \leq R^2 \tag{1}$$

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}}$$

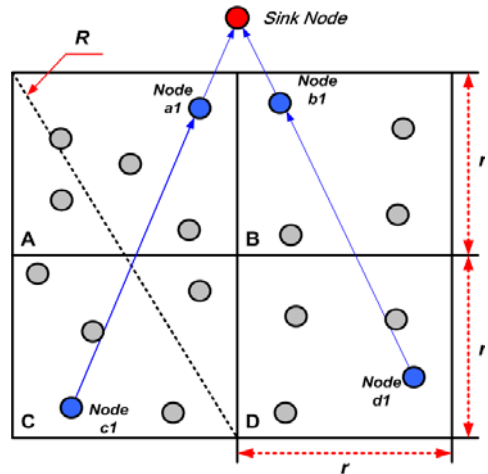


그림 3. GAF 알고리즘의 데이터 전달 방법

### Ⅲ. 제한한 센서 네트워크 모델

제안하는 모델은 등방성 안테나가 아닌 실제 센서 노드의 위치나 각도에 따라 달리 방향성을 갖는 성질에 따라 에너지 소모 및 통신 거리를 고려하고, 멀티 홉 전송 시 동일 전력에서의 통신에 사용하는 홉수를 줄이는 방법에 대해 기술한다.

그림 4는 Zigbee 무선 센서 네트워크에서의 1mW의 송신전력의 통신 반경에 대해서 나타낸다.

전파 손실에 L을 dB단위로 나타내고, 등방성 안테나의 사용을 가정으로 주파수의 단위를 MHz, 거리의 단위를 Km로 한다면 식 (2)을 유도할 수 있다.

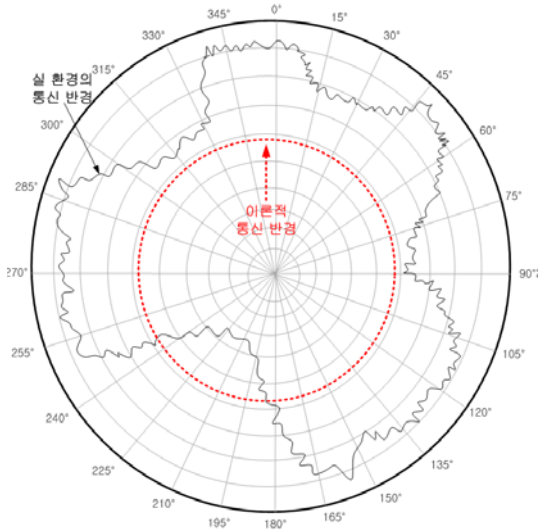


그림 4. 무선 센서 네트워크에서의 통신 반경

$$L = 32.44(dB) + 20\log fMc + 20\log dKm \quad (2)$$

무선 계층에서 송신 전력은 자유 공간에서 거리의 제곱에 비례하여 손실되기 때문에 통신 거리의 증가에 따른 전송 에너지 소모는 지수적으로 증가하며 이는 실제 무선 센서 네트워크에서 역시 성립한다.

$$L = Const \cdot R^\alpha \quad (3)$$

자유공간에서의 전파상수  $\alpha=2$ 와 거리  $R$ 로 전파 손실  $L$ 을 식 (3)에서 나타냈다.

그림 5는 등방성 안테나와 방향성을 고려한 센서 노드의 전송 반경을 나타낸다.

본 논문에서 성능평가를 위해 사용한 라디오 칩셋인 CC2420은 수신감도가 -82dBm인 지역이 최대 송신 거리이다. 이론적으로 -82dBm의 수신감도를 사용한 경우 데이터 전송이 가능한 통신 반경은 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

표 1은 실제 ZigbeX로 실측한 통신반경과 이론적인 통신반경을 나타낸다.

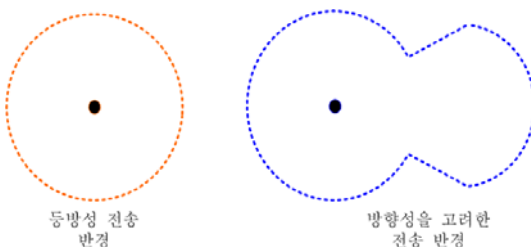


그림 5. 등방성 및 방향성 안테나의 간략화

표 1. CC2420의 실측 및 이론 통신반경

Radio Output Power(dBm)	실측 최대 통신 거리(m)	이론 최대 통신 거리(m)
0	286~142	125
-1	238~122	112
-3	172~93	89
-5	147~79	70
-7	112~68	56
-10	82~43	40
-15	46~27	22
-25	15~9	7.1

위의 데이터를 이용하여 실측된 방향성 부분의 최대 통신 거리는 등방성의 이론 값 및 방향성이 약한 부분의 2배의 통신 거리를 갖는 것을 알 수 있다.

제안된 센서 네트워크는 다음과 같은 가정 사항을 둔다.

- 센서 노드의 방향성의 성질을 이용 각 센서 노드를 에너지 효율적이도록 네트워크 생성 시 배치되어야 한다.
- 센서 노드는 초기의 배치된 위치에서 이동하지 않는다.

등방성 안테나 사용의 모델의 경우 격자형 구조는 최대 전송 거리  $R$ 을 갖는 정사각형 모형으로 표현 할 수 있다. 그림 6은 기존의 등방성 안테나에서의 격자형 구조를 나타낸다.

등방성 안테나를 갖는 센서 노드의 경우 그림 6의 경우 각 가장 먼 거리의 노드 간 통신을 하기 위해 최소 5홉의 필요하다. 이는 데이터 전송을 하여 송신전력을 사용하는 노드는 최소 5개가 필요함을 나타낸다.

제한한 네트워크 모델은 최초 노드의 효율적 배치로 인해 각 노드가 가진 안테나의 방향성을 이용하여 센서 네트워크의 통신 필드를 최소의 격자로 네트워크를 구성함으로써 기존의 등방성 안테나를 사용한 네트워크보다 통신에 사용될 최소한의 센서 네트워크의 수가 적으며, 동일 송신전력에서 보다 적은 홉수를 나타낸다.

그림 7은 방향성을 고려한 효율적인 배치를 마친 네트워크 구조이다. 방향성을 가진 안테나를 가진 노드의 경우 그림 7과 같이 가장 먼 거리의 노드 간 통신을 위해 최소 3홉이 필요하게 된다. 이는 데이터 전송을 하여 송신전력을 사용하는 노드는 최소 3개가 필요함을 나타낸다.

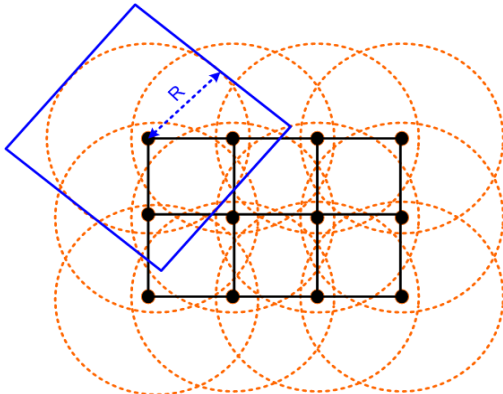


그림 6. 등방성 안테나에서의 격자형 네트워크 구조

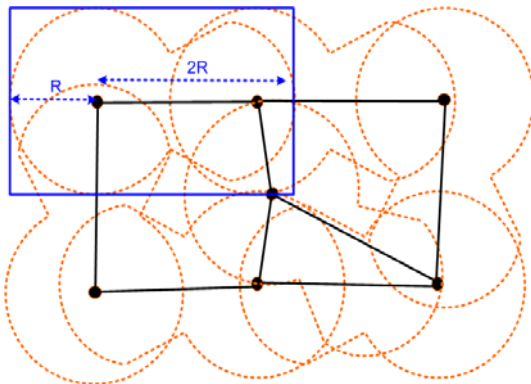


그림 7. 센서 노드의 방향성을 고려한 네트워크 구조

#### IV. 성능 평가 및 고찰

본 논문에서는 제안한 센서 네트워크 모델의 구현 및 성능평가를 위해 Chipcon사의 CC2420을 적용한 한백전자의 Zigbee 모듈(Module)인 ZigbeX Mote를 사용하여 일정한 규격내의 필드에서의 네트워크 구성 노드의 수와 사용되는 송신전력에 대해 측정하였다. 또한, ZigbeX Mote로 송신전력에 따른 최대 거리를 측정 및 Seamcat 시뮬레이터로 간섭원이 존재하는 상황에서의 등방성 안테나를 가진 센서 노드의 송신 전력에 따른 최대 거리를 시뮬레이션 하여 보다 적합한 시뮬레이션 파라미터를 선정하였다.

##### 4.1 성능 평가 파라미터

성능평가를 위해서는 다음과 같은 파라미터가 필요하다. 첫째, 사용되는 송신전력 환경에서 1 bit 당 소모되는 에너지 및 패킷 당 소모되는 에너지를 알아야 한다. 시뮬레이션 환경에 이를 적용하기 위해

ZigbeX Mote를 사용하여 송신 전력에 따른 거리를 측정 및 등방성 안테나를 사용한 센서 노드의 송신 전력에 따른 거리의 검증의 경우 이론값과 SeamCat 시뮬레이터를 사용하여 비교하였다.

##### 4.1.1 송신 전력에 따른 통신 반경 파라미터

제한한 프로토콜의 성능평가를 위해 사용된 라디오 칩셋인 CC2420은 수신감도가 -82dBm인 지역이 최대 송신 거리이다. 이론적으로 -82dBm의 수신감도를 사용한 경우 데이터 전송이 가능한 통신 반경은 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

그러나, 실제 네트워크를 구성하는 센서 Mote의 경우 PCB 안테나를 사용하게 되며 송, 수신 노드 안테나의 방향성에 따라 많은 오차를 보이게 되고 이는 앞의 표 1에 나타낸다.

그림 8은 ZigbeX를 사용하여 송신 전력에 따른 최대 통신 반경을 측정하기 위한 구성환경이다.

송신 전력에 따른 통신 반경 파라미터를 사용하기 위해선 기존의 등방성 안테나를 사용한 센서 노드의 경우의 이론값과 비교 가능한 파라미터가 있어야 한다.

Seamcat 시뮬레이터는 센서 네트워크의 노드 간 통신에서의 간섭원이 존재하는 상황에서 이를 시뮬레이션이 가능하다.

그림 9는 Seamcat 시뮬레이터를 이용하여 송신전력이 0dBm의 환경에서 수신감도가 -81.97dBm의 경우 측정된 최대 전송거리를 나타낸다.

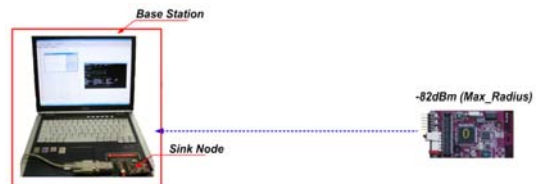


그림 8. 통신반경 측정 실험 환경



그림 9. 수신감도가 -82dBm인 지점까지의 거리

표 2. Seamcat 시뮬레이터로 확인한 CC2420 통신 반경

Radio Output Power(dBm)	최대 통신거리 (m)
0	124
-1	111
-3	88
-5	70
-7	55.5
-10	39.5
-15	22
-25	7

표 2는 등방성 안테나를 사용한 센서 네트워크에서 간섭원이 존재하는 환경에서의 대한 최대 통신 거리를 나타내며, 이는 표 1에서의 이론값과 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

4.1.2 송신 전력에 1비트 및 패킷 당 소모 에너지

두 번째 파라미터인 데이터 전송에 소모되는 에너지를 알아야 한다. 먼저 1bit당 소모되는 에너지를 측정하기 위해서는 식(4)가 사용된다.

$$P_{Bit} = I_{Tx} \times V_s \times \frac{1}{R_{Tx}} \quad (4)$$

표 3. CC2420 송신 전력에 따른 비트 및 패킷의 소모 에너지

Radio Output Power (dBm)	Energy /bit (nJ/b)	Energy /Control_Packet (uJ/p)	Energy /Packet (uJ/p)
0	208.8	16.7	60.1
-1	198	15.8	57
-3	182.4	15	52.5
-5	166.8	13.3	48
-7	150	12	43.2
-10	134.4	10.8	38.7
-15	118.8	9.5	34.2
-25	102	8.1	29.4

비트 당 전송에 소모되는 에너지는 설정된 송신 전력의 전류  $I_{Tx}$ 와 전압  $V_s$ , 그리고 데이터율  $R_{Tx}$ 의 역수의 곱으로 구할 수 있다. 표 3은 송신 전력에 따른 비트 및 패킷 당 소모 에너지를 나타낸다.

4.2 성능평가

제안한 알고리즘과의 성능평가를 위해서 등방성 센서 노드와 방향성을 고려한 센서 노드에서 기존의 통신 반경을 다룬 알고리즘인 GAF 알고리즘을 센서 네트워크 환경에 각각 적용하여 송신 전력에 따른 전체 네트워크의 에너지 소모율 및 실제 필드의 사용노드를 측정한다.

표 4. 성능평가 파라미터

구분	적용
송신 전력 ( 0dBm )	17.4 mA
최대 전송 거리	286 / 125 m
Packet size	36 Bytes
전원	3V
네트워크 필드 규격	500m ×500m
packet 수	1000개
Event Time	0.5sec

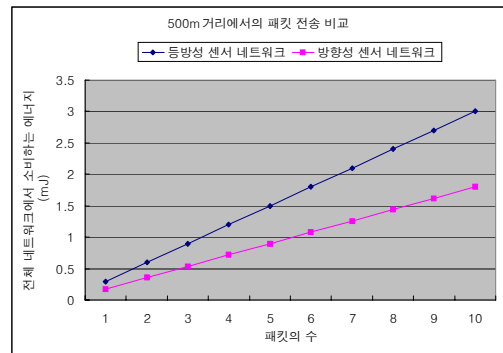


그림 10. 직선 500m 거리에서의 네트워크 에너지 소모

주어진 필드 환경에서 사용하는 노드의 개수와 노드 간 워크에서 소모되는 에너지 및 노드 간 에너지 소모를 측정 노드의 수에 따라 측정하였다. 성능평가를 위한 환경은 표 4와 같다.

그림 10은 기존의 등방성 센서 노드의 네트워크와 방향성 센서 노드의 네트워크에서의 직선 500미터의 전송거리의 경우의 전체 노드의 에너지 소비를 나타낸다.

직선거리에서 방향성을 고려하여 노드를 배치할 경우 센서 노드는 GAF 라우팅 프로토콜의 성질을 이용하여 자신과 가장 먼 센서 노드들에게 멀티 홉으로 전송하게 되어 전체적인 네트워크에서의 에너지 사용이 줄어드는 것을 알 수 있다.

기존의 등방성 센서 네트워크 환경과 방향성을 고려한 센서 네트워크 환경에서 GAF 라우팅 프로토콜의 경우 동일 에너지의 사용으로 최대 2배의 전송거리를 전송하게 함으로써 실질적으로 네트워크의 에너지 소모 역시 40%의 에너지 효율을 나타낸다.

또한 성능평가를 위한 네트워크 규격에서 네트워크를 구성하기 위해서는 등방성 센서 네트워크의 경우 16개의 센서 노드가 필요하지만 방향성을 고려한 센서 네트워크에서는 9개의 센서 노드가 필요하다. 동일한 필드에서 노드의 효율성 면에서도 33%의 효율을 보인다.

그림 11은 네트워크 필드 크기인 500m × 500m 구간에서의 각 필드의 가장 먼 거리에 있는 노드들 간의 통신을 1000개의 패킷을 이용하여 비교하였다. 일직선의 주어진 규격의 네트워크에서 확장하여 실질적인 네트워크 필드에서의 에너지 효율을 측정 하였을 경우 50%의 에너지 효율을 보여준다.

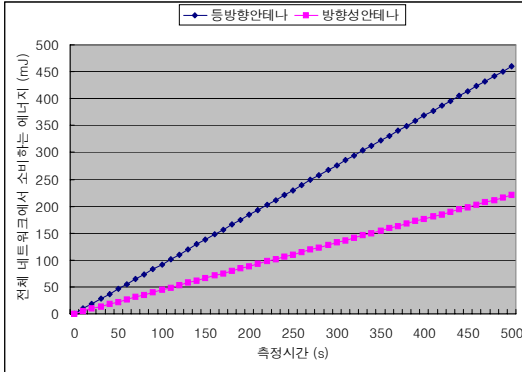


그림 11. 네트워크 필드에서의 시간에 따른 네트워크 에너지 소모

### V. 결론

본 논문에서는 제한된 에너지를 갖는 센서 노드들로 구성된 센서 네트워크의 효율적인 에너지 사용을 위한 센서 노드의 배치에 대해 제안하였다. 기존의 네트워크 운영 방식에서 고려하지 않았던 센서 노드가 가진 안테나의 방향성을 이용하여 네트워크를 구성함으로써 센서 네트워크의 에너지 효율을 개선하는 방안을 제안하였다.

성능 평가 결과 동일 필드에서 필수적으로 사용해야 할 노드의 수가 감소하고, 이는 동일한 센서 노드를 사용할 경우 등방성의 성질을 고려한 센서 네트워크에 비해 사용 시간이 많을수록 제안한 알고리즘이 보다 효율적인 성능을 보여주었다. 하지만, 초기의 센서 노드의 방향성을 고려한 네트워크의 구성은 대규모의 센서 네트워크에서의 구성에 있어 어려움이 따른다.

제안한 알고리즘은 MAC 이나 Network 계층이 아닌 PHY 계층에서의 센서 노드가 가진 방향성을 활용하여 기존의 GAF 등과 같이 최대 전송거리를 활용한 라우팅 프로토콜의 에너지 효율적 전송을 할 수 있는 환경을 제공한다.

향후 연구 과제로 초기의 고정된 노드의 사용 뿐 아니라, 방향성을 갖는 노드를 초기의 어려움 없이 에너지 효율적인 배치 방안과 배치 시 각 노드의

이동에 따른 센서 노드의 방향성을 조절하는 방안이 향후 연구 과정을 통해 개선해야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] 김기형, 정원도, 박준성, 서현곤, 박승민, 김홍남, "IEEE 802.15.4기반의 유비쿼터스 센서네트워크 기술", *전자공학회지*, 제31권, 제12호, pp.74~84, 2004년 12월.
- [2] 정성훈, 전호인, "IEEE 802.15.4 and ZigBee Protocol : 유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 Active RFID 기술", *한국통신학회지(정보통신)*, 21권, 6호, pp.693~714, 2003년 6월.
- [3] 김기일, 김상하, "MANET 에서의 다중 경로 라우팅 프로토콜 연구 동향," *주간기술동향* 2005년 7월.
- [4] IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [5] ZigBee Alliance home page, <http://www.zigbee.org>
- [6] <http://www.ti.com>
- [7] 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-Ready RF Transceiver (Rev. B), 20 Mar. 2007.
- [8] (주)한백전자 기술연구소, "유비쿼터스 센서 네트워크 시스템" 2006년 5월.
- [9] <http://www.xbow.com>
- [10] <http://www.seamcat.org>

정 원 수 (Won-Soo Jung) 정회원  
한국통신학회논문지 제32권 제12호 참조

윤 찬 영 (Chan-young Yun) 종신회원  
한국통신학회논문지 제32권 4T호 참조

오 영 환 (Young-Hwan Oh) 정회원  
한국통신학회논문지 제32권 제12호 참조