ISSN 1598-0170 (Print)
ISSN 2287-1136 (Online)
http://www.jksii.or.kr

클러스터 기반 센서 네트워크에서의 네트워크 특성 정보를 고려한 무선 채널 선택 기법☆

Wireless Channel Selection Considering Network Characteristics in Cluster-based Sensor Networks

김 대 영[1] 김 범 석[2] 조 진 성[2*]
Dae-Young Kim BeomSeok Kim Jinsung Cho

요 약

무선 센서 네트워크의 구현에 활용되는 IEEE 802.15.4 표준은 이기종 통신 기술들이 공존하는 2.4 GHz ISM 대역을 기반으로 동작하며, 수시로 변하는 네트워크 상태로 인한 간섭을 회피한 전송 효율의 향상과 네트워크의 상태를 고려한 채널 선택 기술이 요구된다. 무선 센서 네트워크는 다수의 센서 노드로 구성되어 있으며, 확장성을 위해 클러스터 기반의 네트워크 구조를 가지며, 싱크 노드는 각 클러스터들의 네트워크 특성정보를 수집하고 주기적 쿼리 메시지 발송을 통해 이 정보들을 네트워크 필드 내 클러스터 헤드들과 공유한다. 본 논문에서는 클러스터 헤드가 수집한 네트워크 정보를 기반으로 클러스터 내에서의 네트워크 상태를 파악하고, 계량화된 처리량 (throughput) 레벨, 수신신호강도 (RSSI) 레벨, 그리고 신뢰성 (reliability)을 파라미터로 하는 목적함수를 통해 적절한 무선 채널을 클러스터에서 선택하는 방안을 제안한다. 제안된 방안이 네트워크 상태 변화에서도 데이터 전송 효율을 유지할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

☞ 주제어 : 채널 선택, 간섭, 클러스터, 무선 센서 네트워크

ABSTRACT

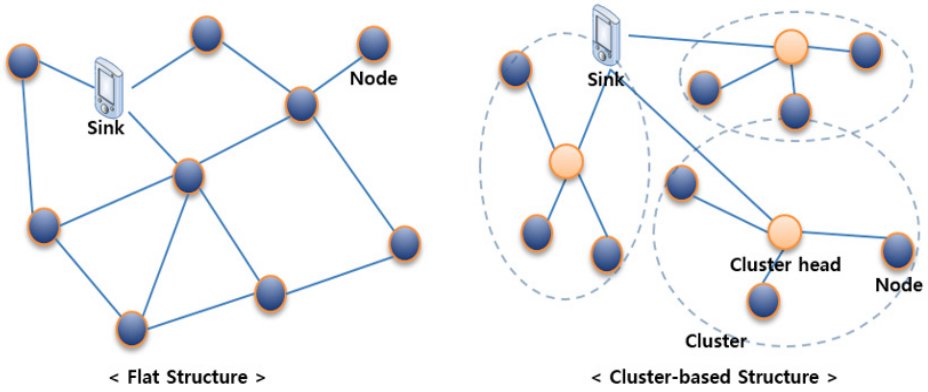
To provide scalability, wireless sensor network has cluster-based architecture. Wireless sensor network can be implemented based on the IEEE 802.15.4 which is exploited in 2.4GHz ISM frequency band. Since this frequency band is used for various data communication, network status of wireless sensor networks frequently changes according to wireless environment. Thus, wireless channel selection to avoid reduction of transmission efficiency is required. This paper estimates network status using the information that a cluster-head collects in a cluster. Through objective function with throughput, RSSI level and reliability as input parameters, this paper proposes proper wireless channel selection. Simulation results show that the proposed method maintains transmission efficiency even though network status changes.

☞ keyword : channel selection, interference, cluster, wireless sensor networks

1. 서 론

무선 센서 네트워크는 작은 크기의 센싱 및 통신 기능을 포함한 센서 노드가 다수로 구성된 애드혹 (ad-hoc) 네트워크를 의미한다. 센서 네트워크 서비스는 센서 노드가 주변의 환경 정보를 센싱하고 수집하여 싱크 (sink)에 전달함으로써 이루어지며, 환경 또는 전장 (battlefield) 감시와 같이 넓은 지역에 수백, 수천 개의 노드를 배치하여 정보를 수집하게 된다[1-3]. 무선 센서 네트워크의 네트워크 구조는 그림 1과 같이 평면 (flat) 구조와 계층적 (hierarchical) 구조를 가진다. 무선 센서 네트워크가 배치된 네트워크 필드 (network field) 에서 평면 구조의 경우 개별 센서 노드가 싱크 노드로 수집한 데이터를 전달하지만, 계층적 구조에서는 네트워크 필드를 클러스터 단위로 나누고 각 클러스터는 클러스터 헤드와 클러스터 멤버로 구성되게 된다. 클러스터 멤버에 해당하는 센서 노드는 수집한 데이터를 자신이 속한 클러스터 헤드로 전달하고, 클러스터 헤드에 해당하는 센서 노드는 클러스터 멤버로부터 수집한 데이터를 싱크 노드로 전달하게 된다.

[1] Network team, AirPlug Inc., Seoul, 135-920, Korea.
[2] Department of computer engineering, KyungHee university, Yongin, 446-701, Korea.
* Corresponding author (chojs@khu.ac.kr)
[Received 27 October 2014, Reviewed 9 November 2014(R2 26 January 2015, R3 14 April 2015), Accepted 17 April 2015]
☆ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2059741).



(그림 1) 무선 센서 네트워크의 네트워크 구조
(Figure 1) Network structure of wireless sensor networks

이러한 클러스터 단위로 클러스터 헤드에 의해서 관리되는 계층적 구조의 센서 네트워크가 확장성 (scalability)을 고려할 때 평면 구조보다 더 적합하다고 할 수 있다.

무선 센서 네트워크는 통신 표준으로 IEEE 802.15.4 LR-WPAN[4]을 따르며, IEEE 802.15.4는 2.4 GHz ISM 주파수 대역을 사용한다. 2.4 GHz 주파수 대역에서 최대 전송 속도 250Kbps를 구현할 수 있으며, 이 주파수 밴드대역에서의 활용도가 높다. 또한, IEEE 802.15.4는 2.4 GHz 주파수 밴드에서 16개의 무선 채널을 가지며 각 채널은 2 MHz대역폭을 가진다. 그러나 2.4 GHz ISM 주파수 밴드는 다양한 통신 기술들이 사용됨으로 인해, 공존성 (coexistence) 문제가 대두되고 있다. 공존성의 문제는 동일 주파수 밴드에 존재하는 동기종 혹은 이기종 통신 기술을 사용하는 기기간의 상호간 신호 간섭 및 충돌로 인한 네트워크의 성능이 저하되는 현상을 의미한다. 실제로 2.4GHz 대역의 WLAN 기술[5]은 IEEE 802.15.4보다 넓은 대역폭을 가지기 때문에 2.4GHz 대역의 WLAN 기술과의 공존은 IEEE 802.15.4기반의 기기들의 성능 저하의 큰 요인이 된다. 특히, IEEE 802.15.4 표준은 IEEE 802.11표준에 비해 송신 신호세기가 작으며, 수신 신호세기에 대한 민감도가 높으므로 IEEE 802.11으로부터의 간섭으로 인한 심각한 성능 저하가 발생하게 되며, 이러한 IEEE 802.11로부터의 간섭을 회피하는 과정에서 가용 채널 수가 제한 되게 된다[6-9]. 따라서 이러한 제한된 가용 채널들 가운데 간섭을 받지 않는 채널을 효율적으로 선택하는 방법이 필요하다.

앞서 설명한 것과 같이, 무선을 이용한 데이터 전송의 경우 공존성 및 간섭의 문제로 인해 무선 상태가 자주 변경될 수 있으며, 그에 따라 전송 효율도 변경된다. IEEE 802.15.4 기반의 센서 네트워크는 여러 개의 무선 채널을 가지기 때문에 현재의 채널 상태가 좋지 못하다면 채널 상태가 더 좋은 다른 채널을 이용한 데이터 전송이 가능하다. 그러나 공존성의 문제로 인해 IEEE 802.15.4표준에서 제시한 16개의 무선 채널을 모두 이용하는 것은 쉽지 않다. 따라서 무선 센서 네트워크에서의 전송 효율을 유지하기 위해 제한된 무선 채널 중에서 적절한 무선 채널을 선택하여 데이터 전송하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 확장성을 고려하여 클러스터 기반의 계층적 구조의 센서 네트워크를 다룬다 [10]. 클러스터 멤버 노드는 IEEE 802.15.4를 사용하여 클러스터 헤드에 데이터를 전송한다. 클러스터 헤드는 클러스터 멤버 노드 보다 더 많은 기능을 포함하며 싱크 노드로의 데이터 전송을 위해 IEEE 802.11b를 사용한다. 이러한 클러스터 기반의 무선 센서 네트워크에서 클러스터 간 통신에 사용되는 IEEE 802.11b의 간섭을 회피하고 클러스터 내부에서의 높은 데이터 전송 효율을 달성하기 위한 무선 채널 선택 방안을 제시한다. 클러스터 헤드는 처리량 (throughput), 수신신호강도(RSSI; Received Signal Strength Indicator), 신뢰성 (reliability)과 같은 네트워크 정보를 수집하고 이를 기반으로 클러스터 내에서의 네트워크 상태를 파악한다. 클러스터 헤드는 수집한 네트워크 정보를 싱크 노드에 보고하고, 싱크 노드는 각 클러스터가 수집한 네트워크 정보를 가공하여 쿼리 (브로드캐스트) 메시지를 통해 클러스터 헤드들과 공유한다. 클러스

터 헤드는 수집된 네트워크 정보는 통계적으로 관리하며, 주기적으로 자신의 통계적 정보와 싱크 노드로부터 공유된 정보를 기반으로 클러스터 내의 네트워크 상태를 평가하여 현재의 무선 채널을 유지할지, 다른 무선 채널로 옮길지를 결정한다. 다른 무선 채널로 옮기는 것으로 결정하게 되면 통계적 정보를 파라미터로 하는 목적함수를 통해 옮겨가기 위한 무선 채널을 선택한다. 채널 선택이 완료되면 클러스터 헤드는 자신이 속한 멤버 노드에게 알리게 되고, 이 후 클러스터 내의 모든 노드는 선택된 무선 채널로 옮겨가게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련 연구를 기술하고, 3절에서 제안하는 클러스터 기반 센서 네트워크에서 네트워크 정보를 고려한 무선 채널 할당 기법을 소개한다. 4 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 방안의 전송 효율을 검증하고, 5절에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

일반적으로 비허가대역을 사용하는 통신 기기들은 각기 다른 통신기술을 기반으로 구현되어 있으며, 같은 주파수대역을 공유하여 사용하는 특징을 가진다. 하지만, 이러한 비허가대역을 사용하는 상이한 통신기술들은 공존 상황을 고려해서 설계되지 않았으며, 이로 인해 상호 간섭을 일으켜 네트워크의 성능 저하를 유발한다. 실제로 IEEE 802.11과 IEEE 802.15.4는 넓은 범위에서 상용 운용되고 있는 통신기술이며, 이는 2.4 GHz 대역을 공유하여 동작하지만, 두 통신기술 모두 상호 공존상황을 고려하여 설계되지 않았으며, 이로 인해 IEEE 802.15.4 기반의 네트워크의 심각한 성능저하가 발생한다. 예를 들어, IEEE 802.11 표준[5]에서는 이기종 통신 기술의 감지 감도를 높이는 방법으로 preamble-based CCA (Clear Channel Assessment)를 구현할 수 있다고 정의하고 있지만, 이는 IEEE 802.11이 아닌 다른 이기종 통신기술에서의 타 통신기술 감지 기능을 무효화시킨다는 단점이 있다. 반대로 이기종 통신 기술의 감지 감도가 낮은 energy-based CCA도 구현이 가능하지만, 특정 시나리오에서만 이기종 통신기술을 감지할 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 또한, 이 두가지 방식 모두 이기종 통신 기술간의 공존 상황을 고려해서 설계되지는 않았으므로, 공존으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수는 없다. 이 같은 문제를 분석하기 위해 S. Pollin 등은 IEEE 802.15.4기반의 통신기기가 최대 송신 전력을 사용하더라도 IEEE 802.11의 수신 감도가 낮음으로 인해 backoff를 하지 않아 IEEE 802.15.4의 성능저하를 유발하는 것을 실험으로 검증하였다[6].

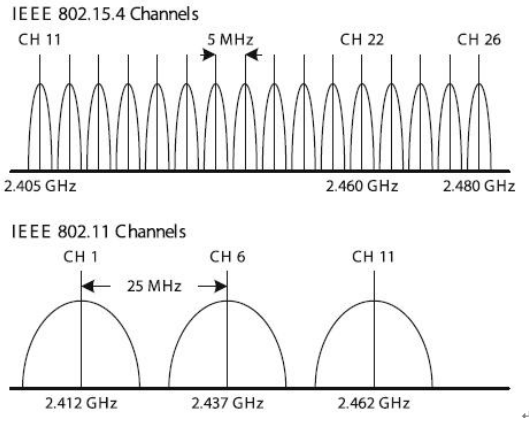
이기종 통신기술간의 공존 문제를 회피하기 위한 방안은 공간, 시간, 주파수를 기준으로 분류된다. 공간 기반의 공존 문제 회피 방안은 송신 전력과 거리, 수신감도와 같은 이기종 통신 기술의 전파 특성을 고려하여 공간적으로 상호 간섭을 줄이는 방안이며, 이를 위해 송신 전력을 조절하는 방법을 사용하고 있다. 하지만, IEEE 802.11과 IEEE 802.15.4와 같이 송신 전력과 수신 감도가 극단적으로 차이가 나는 경우에는 공간 기반의 공존 문제 회피 방안을 적용할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 공간 기반의 공존 문제 회피 방안의 한계를 극복하기 위해, 같은 주파수 대역에서 공존하는 이기종 통신 기기들 시간축상의 간섭 회피를 하는 시간 기반의 공존 문제 회피 방안은 다수의 연구가 진행되어왔다. 하지만 다수의 이기종 통신기기가 동일 주파수 대역을 사용하게 되는 경우에 시간 자원의 결핍이 생길 수 있으며, 기존의 시간 기반의 공존 문제 회피 방안들이 채널 접근 방식을 통해 확률적으로 이기종 통신 기술을 감지하기 때문에 근본적인 공존 문제 해결방안이 될 수 없다. 반면, 주파수 기반의 공존 문제 회피 방안은 공존해 있는 이기종 통신이 서로 중첩되지 않는 주파수 대역을 사용함으로써 공존성 문제를 회피하는 방법으로 공존 문제의 근본적인 해결 방안이 될 수 있다[6-9]. 하지만 주파수 기반의 공존 문제 회피 방안에 대한 연구는 다중채널 MAC 프로토콜의 설계 및 구현에 초점이 맞추어져 있으며, 이는 기존의 통신 표준들과의 호환성 문제가 발생하게 된다.

무선 센서 네트워크에서의 주파수 기반의 공존성 문제 회피 방안은 가용 채널 중 적절한 채널을 선정하는 방식을 채택하고 있으며, 이는 채널 할당 시점에 따라 3가지로 분류된다. 네트워크가 처음 배치되는 시점의 초기화 단계에서 채널이 결정되는 정적인 (static) 방식, 데이터 전송하기 직전 송수신 노드간 협상에 의해 결정되는 동적인 (dynamic) 방식, 그리고 일정 주기 마다 또는 특정 이벤트 발생시 채널을 결정하는 반 동적인 (semi-dynamic) 방식이 있다. 3가지 방식의 무선 채널 할당 기법 중 반 동적인 방식이 적은 오버헤드 (low overhead)와 높은 적응성 (high adaptivity) 사이에서 최상의 균형 (trade-off)을 나타내는 것으로 알려져 있다[11]. 클러스터 기반의 센서 네트워크를 고려한다면 반 동적인 (semi-dynamic) 방식이 가장 적합하다.

일반적으로 다중 채널을 가진 네트워크에서 하나의 무선 채널을 선정하기 위해서는 가용 채널의 리스트를 사

용하며, 이 리스트에서 채널 선택을 위한 정책 또는 휴리스틱에 의해서 사용하기 위한 하나의 무선 채널을 선택하게 된다. 무선 채널 선정을 위해서 라운드 로빈 (round Robin), 최소 선택 채널 (least chosen channel), 최소 부하 채널 (least load channel) 그리고 확률에 기반한 방법들이 사용될 수 있다[11]. EM-MAC[12]은 라운드 로빈에 의한 방법으로 분류되었지만, 무선 채널은 임의 (Random)로 선택된다. 나쁜 채널로 판단되는 무선 채널은 블랙 리스트에 두고 일정시간 동안 가용 채널에서 배제시키며, 채널 선택 시 가용 채널들 중에서 임의로 선택한다. 나쁜 채널의 판단은 채널의 점유 (busy) 또는 비 점유 (idle) 상태에 따라 점수를 증가 시키거나 감소시켜 임계치 이상의 점수에 도달하게 되면 나쁜 채널로 규정한다. MMSN[13]은 가용 채널 리스트 중에서 최소 선택 채널 방법을 사용하여 무선 채널을 선택한다. 최소 선택 횟수가 동일한 무선 채널이 다수 존재하는 경우에는 임의로 선택한다. TACA[14]는 일정 주기 마다 트래픽 가중치 (traffic weights)를 계산하고 이를 바탕으로 가용 무선 채널들 중에서 최소 부하 채널을 선택한다. ARM[15]는 주어진 확률을 가지고 임의로 무선 채널을 선정한다. 채널 선정을 위한 확률은 평균적으로 가용한 채널의 수와 전체 채널 수의 비율로 나타낸다. 한편, 클러스터 기반의 센서 네트워크 구성 및 채널 할당 기법을 제안한 MCCT[16]도 제안되었으며, MCCT에서는 구성된 각 클러스터의 클러스터 헤드가 채널 선택의 복잡도를 줄이기 위해 임의 (Random)로 채널을 선택한다.

이와 같이, 무선 채널 선정을 위한 기존 방안은 가장 적게 선택된 채널, 트래픽량이 가장 적은 채널, 또는 임의로 채널을 선정함으로써 무선 채널의 사용량을 분산시켜 채널 상호간 간섭을 최소화 하려 한다. 하지만 이와 같은 기존의 방안들은 채널을 선정함에 있어 네트워크 운용 중에 채널의 상태를 파악할 수 있는 요소를 고려하지 않고 있으며, 이는 선정된 채널의 좋은 상태를 보장할 수 없다. 또한, 기존의 무선 채널 할당 기법은 이기종 통신 기술과의 공존성 문제를 고려하지 않고 단일 통신 기술에서 다중 채널을 사용하기 위한 방안을 다룬다. 즉, 공존성의 문제에서 이기종 통신 기술에 의한 네트워크 상태 변화를 고려하지 않기 때문에 공존성의 문제에서 적절한 무선 채널 선택 기법이 필요하다. 본 논문에서는 일정 주기 단위의 네트워크 통계 정보를 기반으로 네트워크 상태 변화를 파악하고, 무선 채널의 이동이 필요하다고 판단되는 경우 네트워크 통계 정보를 기반으로 이동할 무선 채널을 선정하여 적용한다.



(그림 2) IEEE 802.15.4와 IEEE 802.11b의 무선 채널
(Figure 2) Wirless channels of
IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b

3. 제안하는 기법

본 논문에서는 2.4GHz 주파수 밴드를 사용하는 클러스터 기반의 센서 네트워크를 다룬다. 클러스터 기반의 센서 네트워크는 다수의 클러스터로 구성되며, 각 클러스터는 클러스터 헤드와 클러스터의 멤버 노드로 이루어진다. 클러스터 기반 센서 네트워크에서의 데이터 전송은 클러스터 내부 (Intra-cluster) 통신과 클러스터간 (Inter-cluster) 통신으로 이루어져 있으며, 클러스터 내부 통신에서는 클러스터 헤드에 의한 데이터 수집이 이루어지고, 클러스터간 통신에서 싱크 노드가 각 클러스터 헤드로부터 수집된 데이터를 전달받게 된다. 클러스터 내부 통신에서는 IEEE 802.15.4 를, 클러스터간 통신에서는 IEEE 802.11b를 사용하는 것으로 가정한다.

네트워크 필드는 2.4GHz 주파수 밴드를 사용하기 때문에 이기종 통신 기술이 공존할 수 있으며, 센서 네트워크 또한 클러스터 내부 통신에서는 IEEE 802.15.4를, 클러스터간 통신에서는 IEEE 802.11b를 사용하는 것처럼 동일 주파수 밴드에서 2가지 통신 기술을 사용하여 데이터를 전송한다. 이와 같은 환경에서는 공존성 문제 (coexistence problem)가 발생할 수 있다. 공존성 문제는 동일 주파수 밴드에서 이기종 통신 기술이 혼재되어 사용됨으로써 상호간 신호 감쇄를 통해 전송효율을 떨어뜨리는 것을 의미한다. 그림2는 2.4GHz에서 IEEE 802.15.4 무선 채널과 IEEE 802.11b 무선 채널의 겹치는 것을 보여준다. IEEE 802.11b의 경우 IEEE 802.15.4 보다 채널 대역폭

(표 1) 처리량 레벨
(Table 1) Throughput level

Level	Throughput
5	160Kbps 이상
4	80Kbps~160Kbps
3	40Kbps~80Kbps
2	20Kbps~40Kbps
1	10Kbps~20Kbps
0	10Kbps 이하

이 더 넓으며, 2.4GHz 주파수 밴드에서 1번, 6번, 11번 채널을 주로 사용한다[10]. 따라서 IEEE 802.11b와 IEEE 802.15.4가 공존하는 경우 겹치지 않는 IEEE 802.15.4의 가용 무선 채널은 3~4개가 존재한다. 이처럼 공존성 문제를 회피하기 위해서는 서로 다른 통신 기술들이 잘 사용하지 않는 무선 채널을, 즉 겹치지 않는 무선 채널을 우선적으로 선정하여 네트워크를 배치 (deploy)할 수 있으나, 네트워크가 배치된 이후에도 공존성 문제로 인한 전송 효율 감소에 대응하여 무선 채널을 선정할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 우선적으로 타 통신 기술과 겹치지 않는 무선 채널을 선정하여 사용하며, 네트워크가 배치된 이후에도 각 무선 채널의 처리량, 수신신호강도를 계량화하여 관리함으로써 공존성 문제로 인해 전송 효율이 떨어질 때 계량화된 네트워크 정보인 처리량, 수신신호강도 레벨와 신뢰성 통해 새로운 무선 채널을 선정하여 사용한다. 또한 싱크 노드로부터 각 클러스터의 네트워크 정보를 잔달받아 무선 채널 선정을 위한 데이터로 활용한다.

3.1 네트워크 정보 계량화

클러스터 헤드는 클러스터 내에서 데이터를 수집하고, 이로부터 각 멤버 노드에 대한 처리량 과 수신신호감도를 측정한다. 일반적으로 채널의 상태가 좋다는 것은 동기종 혹은 이기종 통신기기로부터 발생하는 간섭 없이 높은 데이터 처리량과 수신신호강도, 데이터 전송 신뢰성을 가지는 것을 의미한다. 처리량과 수신 감도는 채널의 상태를 판단하기 위한 기준으로 무선 센서 네트워크에서는 주기적 모니터링을 위해 네트워크 필드로부터 데이터를 수집하고 있기 때문에 클러스터 헤드는 주기적으로 처리량 및 수신신호강도를 획득 할 수 있다. 처리량과 수신신호강도를 측정한 클러스터 헤드는 표 1 및 표 2와 같이 각 수치를 레벨(level)로 계량화 하여, 각 레벨에서의 사용 빈도 (frequency)를 히스토그램 (histogram)으로 관리한다. 또한, 채널 상태 판단의 정확성을 높이기 위해 멤버

(표 2) 수신신호강도 레벨
(Table 2) RSSI level

Level	RSSI
9	-50 이상
8	-55 ~ -50
7	-60 ~ -55
6	-65 ~ -60
5	-70 ~ -65
4	-75 ~ -70
3	-80 ~ -75
2	-85 ~ -80
1	-90 ~ -85
0	-90 이하

노드로부터 주기적으로 수집되는 데이터 량을 기반으로 신뢰성을 추정하여 채널 상태 판단에 반영한다. 일정 주기 동안 클러스터 헤드에서 클러스터 내의 멤버 노드들로부터 수집한 데이터 량으로써 신뢰성을 정의한다. 즉, 센서 네트워크의 트래픽은 싱크 노드로부터 브로드캐스트되는 쿼리 메시지에 의해 발생되기 때문에, 일정시간 동안 수집되는 데이터 량이 많다는 것은 채널의 안정성이 높다는 것을 의미한다. 그러면, 클러스터 헤드에서 관리되는 처리량 레벨, 수신신호강도 레벨, 그리고 신뢰성 정보를 기반으로 다른 무선 채널로의 이동 (migration)을 결정하고, 이동하기 위한 무선 채널을 선정할 수 있다.

3.2 채널 이동 결정 및 채널 선정

클러스터 헤드는 표1 및 표 2를 기반으로 처리량 히스토그램, 수신신호강도 히스토그램을 유지 및 관리하고 각 히스토그램으로부터 평균 처리량 레벨과 평균 수신신호강도 레벨을 계산한다. 처리량 히스토그램으로부터 계산된 처리량 레벨은 네트워크 상태를 파악하기 위한 척도가 되며, 수신신호강도 레벨은 클러스터 헤드와 멤버 노드들 간의 평균 거리(distance)를 나타내게 된다. 수신신호강도 레벨이 높으면 전송 신호의 세기가 커서 전송 성공 확률이 높아지기 때문에 네트워크의 채널 상태가 좋을 가능성이 높다. 반대로 수신신호강도 레벨이 낮으면 네트워크의 채널 상태가 나빠질 가능성이 높아지게 된다. 따라서 클러스터 헤드와 멤버 노드간 평균 수신신호강도 레벨이 낮은 경우, 채널 선택의 기준이 되는 처리량 임계값의 수치를 높여줌으로써 엄격한 기준을 가지고 채널의 이동 여부를 결정한다 (line 1-2). 반면에, 평균 수신신호강도 레벨이 높은 경우, 처리량 임계값의 수치를 낮춤로

(표 3) 채널 이동 결정 및 채널 선정 알고리즘
(Table 3) Channel hopping decision and channel selection algorithm

	Channel-Selection(throughput, rssi, reliability) * Throughput_thrd = throughput threshold * UPPER_TP_THRD = upper throughput threshold * LOWER_TP_THRD = lower throughput threshold * rssi = received signal strength indication * RSSI_THRD = rssi threshold * netCharj = {throughput, reliability} of channel j * scorej = score of channel j * channel = selected channel after perform the proposed algorithm
line 1	If (rssi > RSSI_THRD)
line 2	Then throughput_thrd := UPPER_TP_THRD
line 3	Else
line 4	throughput_thrd := LOWER_TP_THRD
line 5	
line 6	If (throughput < throughput_thrd)
line 7	Then **channel selection**
line 8	
line 9	**// channel selection**
line 10	If (there exist another netCharj)
line 11	Then tmp := INIT
line 12	Loop: (j)
line 13	do calculate scorej
line 14	If (scorej > tmp)
line 15	Then channel := j
line 16	tmp := scorej
line 17	End Loop
line 18	Return channel
line 19	Else
line 20	Return channel := random(channel set)

써 너무 쉽게 채널 이동을 결정하지 않도록 한다 (line 3-4). 표 3은 클러스터 기반의 센서 네트워크에서 채널 이동 결정과 채널 선정을 위한 알고리즘을 나타내며, line1 부터 line7까지의 내용이 수신신호강도 히스토그램과 처리량 히스토그램으로부터 채널 이동 여부를 결정하는 것을 나타낸다.

채널 이동 여부가 결정되면 (line 6-7), 클러스터 헤드는 그 동안 수집된 다른 채널들의 특성 정보 (netChar)를 기반으로 이동하기 위한 무선 채널을 선택할 수 있다 (line 10-18). 무선 채널에 대한 네트워크 특성 정보는 클러스터 헤드가 직접 수집한 통계 정보와 싱크 노드로부터 전달받은 간접적인 통계 정보로 구성된다. 일정 주기 동안 클러스터 헤드는 네트워크 통계 정보를 수집하고, 수집한 정보는 데이터 전송시 데이터에 피기백 (piggyback)되어 싱크 노드로 전달된다. 이러한 네트워크 특성 정보는 싱크 노드가 전체 네트워크 필드로의 쿼리 전송시 각 클러스터 헤드로 전달되며, 무선 채널 선택을 위한 점수 계산에 활용된다. 클러스터 헤드는 네트워크 특성 정보를 통해 계산된 점수 중에서 가장 높은 점수를 가진 무선 채널을 이동하기 위한 채널로 선정하고, 이 후 클러스터 내의 멤버 노드들에게 채널 이동을 알린다. 만약 클러스터 헤드가 무선 채널들에 대한 네트워크 통계

정보를 확보하지 못했다면, 현재 채널을 제외한 가용 채널 중에서 임의로 이동하기 위한 무선 채널을 선정하게 된다 (line 19-20).

채널 선정을 위한 점수 계산은 네트워크 특성 정보를 기반으로 이루어지며, 네트워크 특성 정보는 처리량 레벨과 신뢰성으로 구성된다. 처리량 레벨은 처리량 히스토그램을 통해 계산된 처리량 레벨의 평균 값이고, 신뢰성은 클러스터 헤드가 일정 주기 동안 멤버 노드로부터 수집한 데이터 량으로 나타낸다. 처리량 레벨과 신뢰성은 동등한 비교를 위해 각각 정규화 (normalization)한 뒤 가중치 (α)를 적용하여 점수로 계산한다. 식 (1)과 식 (2)는 해당 채널의 처리량 레벨 (f_{tp})과 신뢰성 (f_{re})의 선형 정규화를 나타내고, 식 (3)은 식 (1)과 식 (2)를 통해 계산되는 점수($score$)를 나타낸다.

$$f_{tp} = \frac{(f_{tp}^{i} - f_{tp}^{\min})}{(f_{tp}^{\max} - f_{tp}^{\min})} \quad (1)$$

f_{tp}^{i}는 채널 i의 누적된 처리량 레벨 히스토그램의 평균을 의미하며, $f_{tp}^{\min}$와 $f_{tp}^{\max}$는 수집된 처리량 레벨의 최소, 최대값을 의미한다.

$$f_{re} = \frac{(f_{re}^{i} - f_{re}^{\min})}{(f_{re}^{\max} - f_{re}^{\min})} \quad (2)$$

f_{re}^{i}는 채널 i에서 클러스터 헤드가 클러스터 멤버로부터 수집한 데이터의 수를 의미하며, $f_{re}^{\min}$와 $f_{re}^{\max}$는 클러스터 헤드가 잠정적으로 수집할 수 있는 데이터량의 최소, 최대값을 의미한다.

$$score = \alpha_{tp} f_{tp} + \alpha_{re} f_{re} \quad (3)$$

$score$는 앞서 정규화된 처리량과 신뢰성 값을 기반으로 하여 계산된 채널 상태의 최종 점수를 의미하며, 이에 사용되는 α_{tp}와 α_{re}은 각각 처리량과 신뢰성 값의 가중치를 의미한다.

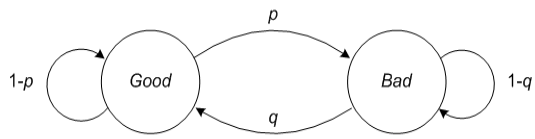
클러스터 헤드는 데이터 전송을 경험하지 못한 채널에 대한 점수 계산을 위해 싱크 노드로부터의 쿼리 정보를 이용할 수 있다. 쿼리 메시지를 통해 클러스터 헤드는 다른 클러스터에서 측정된 네트워크 통계 정보를 수신한다. 수신된 통계 정보는 간접적인 네트워크 특성 정보이며, 간접적인 네트워크 특성 정보는 일정한 가중치 (β)를 적용한 후 점수 계산에 이용한다. 클러스터 헤드는 식 (3)을 통해 각 채널의 점수를 계산하며, 가장 높은 점수를 가지는 무선 채널을 선정한다.

4. 성능 분석

4.1 채널 모델

무선 센서 네트워크의 각 채널의 상태는 데이터 전송 환경이 좋은 Good 채널 상태와 신호 간섭과 같은 이유로 데이터 전송 환경이 좋지 못한 Bad 채널 상태로 나타낼 수 있으며 마르코프 체인 (Markov chain)을 통해 모델링 할 수 있다. 무선 채널의 상태가 Good에서 Bad로 변경될 확률을 p라고 하면, 채널 상태를 Good에서 그대로 유지되는 확률은 $1-p$가 된다. 마찬가지로 무선 채널의 상태가 Bad에서 Good으로 변경될 확률을 q라고 하면, Bad 상태에서 그대로 유지되는 확률은 $1-q$가 된다. 이를 마르코프 모델 (Markov model)로 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3의 마르코프 모델은 천이 확률에 대한 행렬 (transition probability matrix)로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.



(그림 3) 채널 모델
(Figure 3) Channel model

$$\mathrm{P} = \begin{pmatrix} 1-p & p \\ q & 1-q \end{pmatrix} \quad (4)$$

무선 채널의 상태에 대한 확률 변수를 X라고 하면, 채널 환경이 좋을 때는 $\mathrm{P}[X = Good]$로 나타낼 수 있고 채널 환경이 좋지 않을 때는 $\mathrm{P}[X = Bad]$로 나타낼 수 있으며 마르코프 모델로부터 한계 및 정체확률 (limiting and Stationary Probabilities) [16]을 적용하여 각각의 채널 상태에 대한 확률을 획득할 수 있다. 식 (5)와 식 (6)은 한계 및 정체확률을 적용하여 구해진 각 채널 상태에 대한 확률을 나타낸다.

$$\mathrm{P}[X = Good] = \frac{q}{p+q} \quad (5)$$

$$\mathrm{P}[X=Bad]=\frac{p}{p+q} \quad (6)$$

그러면, 채널 상태의 확률을 통해 데이터 패킷의 전송 성공 확률(P_s)을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_s=(1-per)\mathrm{P}[X=Good] \quad (7)$$

식 (7)에서 per은 패킷 에러율(packet error rate)을 의미하며 IEEE 802.15.4 표준 [4]에서는 1%를 목표로 한다.

4.2 신호감쇄 모델

IEEE 802.15.4 표준에서는 신호 감쇄 모델을 제공한다 [4]. 표준에서 제공된 모델을 사용하여 송신 노드와 수신 노드 사이의 거리에 따라 수신 노드에서의 RSSI를 식 (8)과 같이 계산할 수 있다. 노드의 송신 파워에서 거리에 따라 계산되는 신호 감쇄 수치를 제외하면 노드가 수신한 신호강도가 된다. 일반적으로 센서 노드에서는 송신 파워를 0 dBm을 사용하며, 이 때 수신 신호강도는 신호 감쇄 수치로 나타난다.

$$\mathrm{RSSI(d)}=\begin{cases}P_{tx}-(40.2+20\log_{10}(d))\\ P_{tx}-(58.5+33\log_{10}(\frac{d}{8}))\end{cases} \quad (8)$$

4.3 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 SMPL [17] Library를 사용하여 구현되었으며, 10000 초 동안 수행되었다. 본 논문에서는 주기적으로 채널을 선택하지 않고 초기에 정해진 채널로만 통신하는 방안과 클러스터 기반의 센서 네트워크에서의 채널 선택에 있어 많이 사용되는 임의 채널 선택 기법[12, 16]과의 성능 비교를 통해 제안하는 방안의 높은 효율을 검증하였다. 동등한 성능 검증을 위해 세 방안의 시뮬레이션 환경은 다음과 같이 동일하게 설정하였다. 클러스터는 임의로 배치된 20개의 멤버 노드와 하나의 클러스터 헤드로 구성되며, 클러스터 헤드와 멤버 노드는 IEEE 802.15.4의 통신 기술을 사용하고, 클러스터 헤드와 싱크 노드는 IEEE 802.11b 통신 기술을 사용하는 것으로 가정한다. 가정된 네트워크 환경에서 클러스터 멤버들은 주기적으로 정해진 양의 데이터를 전송하며, 클러스터 헤드는 주기적으로 쿼리 메시지를 송신함으로써 클러스터를 관리한다. 제안하는 방안에서는 클러스터 헤드가 수신할 때 수집할 수 있는 네트워크 특성정보 (처리량, 수신 신호 강도, 신뢰성)를 QUERY_INTERVAL동안 수집하고, 이를 기반으로 채널의 상태를 점수($score$)로 계산한다. 수집된 수신신호강도 값 측정은 식 (8)을 이용하여 클러스터 헤드와 멤버 노드 사이의 거리에 따라 계산된다. 처리량 값의 측정은 패킷 전송 성공 확률 ($\mathrm{P_s}$)의 ±0.1의 범위에서 균등 (uniform) 분포에 따라 결정한다. 3절에서 언급한 것처럼 클러스터 내에서의 IEEE 802.15.4 통신 기술의 가용 무선 채널 수는 4개로 한다. 채널의 상태는 CHANNEL_INTERVAL마다 변경되며, p, q의 확률을 조절하여 $\mathrm{P}[X=Good]$와 $\mathrm{P}[X=Bad]$를 결정한다. 채널 상태가 좋지 못할 때 p는 0.7~0.9의 범위에서 균등 분포를 가지고, q는 0.2~0.4의 범위에서 균등 분포를 가지는 것으로 가정한다. 채널 상태가 좋을 때 p는 0.1~0.3의 범위에서 균등 분포를 가지고, q는 0.6~0.8의 범위에서 균등 분포를 가지는 것으로 가정한다. 클러스터 헤드는 채널 간섭이 발생하는 동안 수집되는 네트워크 정보를 계량화하고, 3.2절에서 제안된 방안에 따라 채널 이동과 이동할 채널을 선정한다. 클러스터 헤드는 데이터 타임 슬롯 (data time slot) 동안 모든 멤버 노드로부터 데이터를 수집을 시도하며, 싱크 노드로부터 쿼리 메시지를 수신한 후 5회의 데이터 타임 슬롯을 가진다. 싱크 노드의 쿼리 메시지는 QUERY_INTERVAL 마다 수신 된다. 기타 시뮬레이션을 위한 파라미터는 표 4와 같다.

(표 4) 시뮬레이션 파라미터
(Table 4) Simulation parameters

Parameters	Values
Simulation time	10000 sec
per	0.01
α_{tp}	0.6
α_{re}	0.4
β	0.8
p	Uniform(0.7, 0.9) / Uniform(0.1, 0.3)
q	Uniform(0.2, 0.4) / Uniform(0.6, 0.8)
RSSI_THRD	3
UPPER_TP_THRD	3
LOWER_TP_THRD	2
INIT	0
CHANNEL_INTERVAL	500 sec
QUERY_INTERVAL	100 sec

표 5는 시뮬레이션 동안 사용되는 표 1의 처리량 레벨에 대한 매핑 테이블 (mapping table)을 나타내다. 시뮬레이션에서는 노드의 처리량 측정이 쉽지 않기 때문에 P_s에 의한 매핑 테이블을 사용하여 처리량 레벨을 결정한다.

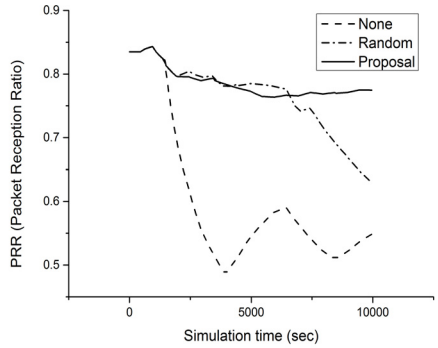
(표 5) 시뮬레이션 파라미터
(Table 5) Simulation parameters

P_s	**Level**
0.9 이상	5
0.7 ~ 0.9	Uniform(3,5)
0.5 ~ 0.7	Uniform(2,4)
0.3 ~ 0.5	Uniform(1,3)
0.1 이하	Uniform(0,1)

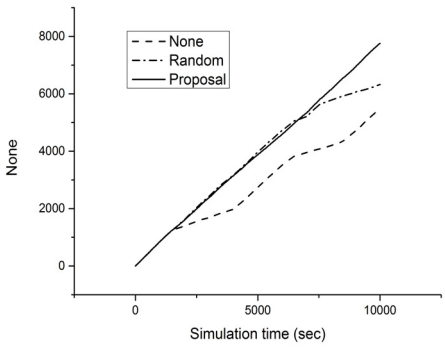
4.4 시뮬레이션 결과

본 논문은 클러스터 기반의 센서 네트워크에서 가용 채널의 처리량 및 신뢰성 정보를 활용하여 최적의 채널을 할당함으로써 각 클러스터의 전송률 및 신뢰성을 높이는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 성능 측정 기준 (metrics)으로 전송 성공률 (PRR; Packet Reception Ratio)과 QUERY_INTERVAL당 평균 클러스터 헤드에서 수집된 데이터 패킷의 수 (average number of received packet per QUERY_INTERVAL) 을 사용하였으며, 채널 변경을 하지 않는 기법 (none), 기존의 채널 할당의 대표적인 방법인 임의 채널 할당 기법 (random), 그리고 제안된 채널 할당 기법 (proposal)의 시뮬레이션 결과로 성능 비교를 수행하였다.

그림 4는 전송 성공률을 나타낸다. 임의 및 순차 채널 할당 기법의 경우 시간이 지남에 따라 전송 성공률의 변화 기복이 심한 것을 확인할 수 있다. 특히, 채널 변경을 하지 않는 기법의 경우는 2000초가 지나는 시점에서부터 전송성공률이 급격하게 감소하며, 4000초 이후로는 선택된 채널의 간섭 발생으로 인해 그 변화의 폭이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 채널 선택에 있어 채널 상태를 고려하지 않았기 때문에 간섭이 일어나는 채널을 선택하는 것으로 볼 수 있다. 반면, 제안하는 방안에서는 지속적으로 안정된 전송성공률 수치를 보여주며, 이것은 제안하는 방안에서 고려된 처리량 레벨, 수신신호강도 레벨 및 신뢰성 값이 채널 선정에 있어 신뢰성 있는 채널 상태 정보 제공을 보장해 주는 것을 의미한다.



(그림 4) 전송 성공률
(Figure 4) PRR (Packet Reception Ratio)



(그림 5) QUERY_INTERVAL당 평균 수신 패킷의 양
(Figure 5) Average number of received packet per QUERY_INTERVAL

그림 5는 QUERY_INTERVAL당 평균 수신 패킷의 양을 나타낸다. 채널을 변경하지 않는 기법의 경우, 사용하고 있는 채널의 상태가 나빠짐에도 불구하고 계속해서 채널을 유지하기 때문에 낮은 평균 패킷 수신량을 보여준다. 임의 채널 할당 기법의 경우는 채널을 변경하지 않는 기법에 비해 높은 평균 패킷 수신량을 보여주며, 이는 채널 상태가 좋지 않은 채널을 할당받는 경우가 채널을 변경하지 않는 기법에 비해서는 적기 때문에 나타나는 현상이지만, 이것 역시 채널을 변경하지 않는 기법과 비슷하게 간섭으로 인해 채널의 상태가 변화하는 상황을 인지하지 못함으로 인해 채널 상태가 좋지 않은 채널을 선택하기 때문에 높은 패킷 수신율을 보여주지는 못한다.

반면, 제안하는 방안은 채널 할당에 있어 각 채널의 계량화된 처리량과 신뢰성을 고려한 목적함수 수행 결과를 기반으로 가장 좋은 채널을 선정하기 때문에 세 방안 중 가장 높은 평균 패킷 수신량을 보여준다.

이렇게 채널 변경을 하지 않는 기법 및 기존의 임의 및 순차 채널 할당 기법은 채널을 할당함에 있어 다른 통신 기술에 의한 네트워크 상태 변화를 고려하지 않으므로 할당된 채널의 상태에 따라 전송 성공률이 가변적으로 변하며, 낮은 전송 효율을 보이는 한계점을 가지고 있다. 그러나 계량화된 처리량 레벨, 수신신호강도 레벨 및 신뢰성 값을 기반으로 현재 채널의 전송 효율을 판단하고, 이를 기반으로 채널을 선정하는 제안하는 방안은 가용채널 중 가장 좋은 채널을 클러스터 헤드에게 할당함으로써 지속적으로 높은 전송 효율을 제공할 수 있다.

5. 결 론

무선 센서 네트워크는 동일 주파수 대역을 사용하는 다수의 이기종 무선 통신 기술들과 공존하게 되며, 이러한 공존 문제로 인해 발생하는 간섭 현상은 무선 센서 네트워크의 성능 저하를 발생시키는 주요한 원인이 된다. 이와 같은 상황을 회피하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 대부분의 기존 연구들은 임의 채널 할당 기법을 사용하고 있다. 하지만 이러한 기법들은 채널의 상태를 고려하지 않으므로 간섭이 많이 발생하는 채널을 할당한 경우에 급격한 성능 저하가 발생한다. 본 논문은 이와 같은 문제를 해결하기 위해 클러스터 단위에서 멤버 노드로부터 수집되는 처리량과 수신신호강도와 같은 네트워크의 특성정보를 클러스터 헤드가 수집하여 계량화하고, 신뢰성 정보를 반영하여 네트워크 전송 효율을 판단한다. 또한 싱크 노드가 주기적으로 발송하는 쿼리 메시지를 통해 전체 클러스터의 특성정보를 공유하여 간섭이 적은 무선 채널을 클러스터 헤드에게 할당하는 기법을 제시하고, 지속적으로 높은 전송 효율을 보장할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 특히 본 논문에서 제안한 무선 채널 선정 기법은 가변적으로 변하는 각 채널의 상태를 반영함으로써 기존의 임의 무선 채널 선택 기법과 달리 지속적으로 안정된 채널을 선택함으로써 보다 우수한 성능을 보였다. 따라서 동일 대역을 사용하는 이기종 무선 통신 기술과 공존하는 상황에서 활용되는 센서 네트워크의 다양한 응용분야에 본 논문에서 제안한 무선 채널 선정 방안이 적용될 수 있다.

참 고 문 헌 (Reference)

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “A Survery on Sensor Networks,” IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, pp.102-114, August 2002.
http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2002.1024422

[2] D. culler, D. Estrin, and M. Srivastava, “Guest editors’ introduction: Overview of sensor networks,” IEEE Computer, Vol.37, No.8, pp.41-49, August 2004.
http://dx.doi.org/10.1109/MC.2004.93

[3] H. Karl, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, John Wiley & Sons, 2005.

[4] IEEE 802.15.4 Standard-2006, ″Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs),″ 2006.
http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.232110

[5] IEEE 802.11 Standard-2012, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications,” 2012.
http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6361248

[6] S. Pollom, I. Tan, B. Hodge, C. Chun, and A. Bahai, “Harmful coexistence between 802.15.4 and 802.11: A measurement-based study,” In Proc.3rd CrownCom, pp. 1-6, May 2008.
http://dx.doi.org/10.1109/CROWNCOM.2008.4562460

[7] C. M. Liang, N. B. Priyantha, J. Liu, and A. Terzis, “Surveying WiFi interference in low power ZigBee networks,” In Proc. SenSys, Zurich, Switzerland, pp. 309-322. Nov. 2010.
http://dx.doi.org/10.1145/1869983.1870014

[8] L. Angrisani, M. Bertocco, D. Fortin and A. Sona, “Experimental study of coexistence issues between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 wireless networks,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57(8), 1514 – 1523, 2008.
http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2008.925346

[9] I Howitt and A. Shukla, ″Coexistence empirical study and analytical model for low-rate WPAN and IEEE 802.11b,″ In Proc. IEEE WCNC’08, pp. 900-905, March 2008.
http://dx.doi.org/10.1109/WCNC.2008.164

[10] Y. Jeong, J. Kim and S. -J. Han, “Interference mitigation in wireless sensor networks using dual heterogeneous radios,” Wireless Networks, Vol.17, No.7, pp.1699-1713, October 2011.
http://dx.doi.org/10.1007/s11276-011-0373-4

[11] R. Soua and R Minet, “A survey on multichannel assignment protocols in wireless sensor networks,” Wireless Days, 2011.
http://dx.doi.org/10.1109/WD.2011.6098201

[12] L. Tang, Y. Sun, O. Gurewitz and D. B. Johnson, “EM-MAC: A dynamic multichannel energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in Proc. ACM MobiHoc 2011.
http://dx.doi.org/10.1145/2107502.2107533

[13] G. Zhou, C. Huang, T. Yan, T. He and J. A. Stankovic, “MMSN: Multi-frequency media access control for wireless sensor networks,” in Proc. IEEE INFOCOM 2006.
http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOM.2006.250

[14] Y. Wu, M. Keally, G. Zhou and W. Mao, “Traffic-aware channel assignment in wireless sensor networks,” Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol.5682, 2009.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03417-6_47

[15] J. Li, D. Zhang, L. Guo, S. Ji, Y. Li, “ARM: An asynchronous receiver-initiated multichannel MAC protocol with duty cycling for WSNs,” In Proc. IEEE IPCCC 2010.
http://dx.doi.org/10.1109/PCCC.2010.5682325

[16] N. Abdeddaim, F. Theoleyre, F. Rousseau and A. Duda, “Multi-Channel Cluster Tree for 802.15.4 Wireless Sensor Network,” in Proc. IEEE PIMRC 2012.
http://dx.doi.org/10.1109/PIMRC.2012.6362853

[17] S. M. Ross, “Probability Models for Computer Science,” Harcourt/Academic Press, 2001.

[18] M. H. MacDougall, “Simulating Computer Systems, Techniques and Tool,” MIT Press, 1987.

◐ 저 자 소 개 ◑

김 대 영 (Dae-Young Kim)
2004년 경희대학교 전자공학과 졸업(학사)
2006년 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2010년 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사)
2010년 8월~2013년 4월 LIG 넥스원 통신연구센터 선임연구원
2013년 4월~현재 AirPlug Inc. 선임연구원
관심분야 : 모바일 네트워크, 센서 네트워크
E-mail : dyoung.kim81@gmail.com

김 범 석 (BeomSeok Kim)
2008년 경희대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
2010년 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2010년~현재 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정
관심분야 : 무선 센서 네트워크, 무선 인체 네트워크
E-mail : passion0822@khu.ac.kr

조 진 성 (Jinsung Cho)
1992년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
1994년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2000년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사)
1998년 IBM T.J. Watson Research Center Visiting Researcher
1999~2003년 삼성전자 책임연구원
2003년~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 모바일 네트워크, 임베디드 시스템
E-mail : chojs@khu.ac.kr