무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 동향 및 분석

Review and Analysis of Energy-Efficient MAC Protocols in Wireless Sensor Networks

황호영 · 정윤원 · 김민정 · 정창용 · 권재균 · 성단근
Ho Young Hwang · Yun Won Chung · Min Jeong Kim · Chang Yong Jung
Jae Kyun Kwon · Dan Keun Sung

무선 센서 네트워크에서는 기본적으로 교환이나 충전이 어려운 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성된다. 따라서 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이는 것이 무선 센서 네트워크에서는 중요하다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 측면을 고려하여 현재까지 제안되어 온 저전력 MAC 프로토콜들과 라우팅 프로토콜들을 정리하여 소개하고 센서 네트워크 환경에서의 Cross Layer 설계 및 센서 네트워크 관련 표준화 기술 및 동향을 소개한다. 또한 센서 네트워크 환경을 위해 제안된 MAC 프로토콜들 중 S-MAC(Sensor MAC) 프로토콜과 T-MAC(Timeout MAC) 프로토콜의 수면 모드 제어(sleep mode control)에 대해 수학적으로 분석하고 이들의 성능을 에너지 소모 관점과 지연 관점에서 평가하고 비교 분석한다.

주제어: 무선 센서 네트워크, 에너지 효율적인 MAC 프로토콜, Cross Layer, 수면 모드 제어

A wireless sensor network consists of sensor nodes which are expected to be battery-powered and hard to replace or recharge. Thus, reducing the energy consumption of sensor nodes is an important design consideration in wireless sensor networks. In this paper, we introduce existing energy-efficient MAC protocols, routing protocols, Cross Layer issues and standard technologies for wireless sensor networks. We here analyze two MAC protocols: Sensor MAC (S-MAC) and Timeout MAC (T-MAC) protocols which were proposed as energy-efficient MAC protocols for wireless sensor networks. We compare the performance of the S-MAC protocol with that of the T-MAC protocol in terms of average power consumption and average delay for varying various input parameters.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Energy-Efficient MAC Protocol, Cross Layer, Sleep Mode Control

I. 서 론

무선 센서 네트워크(wireless sensor networks)에서는 기본적으로 교환하기 어려운 작은 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성되어 있기 때문에 각 센서 노드들은 주어진 배터리의 수명이 다할 때까지만 원하는 정보를 전달할 수 있다. 따라서 단-대-단(end-to-end) 전송시의 1bit를 전달하는데 소모되는 에너지를 줄이는 것이 센서 네트워크의 설계시 최우선적으로 고려되어야 한다. 그리고 센서 네트워크의 특성상 센서 노드에서

황호영, 김민정, 정창용, 성단근: 한국과학기술원
정윤원, 권재균: 한국전자통신연구원

수집된 정보는 일정 시간 내에서 유효하기 때문에 센서 노드의 정보는 제한된 시간 안에 정보 수집기(data collector)에게 전달되어야 한다. 따라서, 주어진 에너지 소모(energy consumption) 상황에서 최대 단-대-단 지연(maximum end-to-end delay) 조건에 맞도록 프로토콜을 설계하는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 주로 각 계층별로 독립적으로 센서 네트워크 환경을 위한 프로토콜들이 제안되어 왔으며 이들 중 주된 연구로 센서 네트워크의 MAC(Medium Access Control) 계층과 네크워크 계층에서의 에너지 효율적인 프로토콜들이 제안되었다. 무선 센서 네트워크 중 분산된 구조의 애드혹 기반으로 동작하는 애드혹 센서 네트워크(ad hoc sensor networks)에서의 에너지 효율적인 프로토콜들도 제안되었다.

무선 센서 네트워크에서 각 센서 노드들이 수집한 정보의 시간적인 유효성에 따라 최대 단-대-단 지연 조건을 만족시키면서도 센서 노드들의 배터리 수명을 고려하여 센서 네트워크 전체의 에너지 효율을 높이는 작업이 중요하다. 이러한 작업을 위해서는 주어진 에너지 소모 상황에서 최대 지연 조건을 만족시키도록 각 계층들이 설계되어야 한다. 이제까지는 네트워크 및 응용 프로그램의 제한 조건에 따라 계층 사이의 인터페이스를 고정시키고 각각의 계층별로 독립적으로 설계되어 왔다. 하지만 이러한 접근 방법은 네트워크 설계를 단순화시키고 특정 계층으로만 제한되어 상위의 계층 및 하위의 계층의 특성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 계층 간 유연하지 못하고(inflexible) 준최적(suboptimal) 인 방식으로 실제 주어진 성능을 충분히 나타내지 못한다. 따라서 상위 또는 하위 계층의 특성 및 상황에 맞도록 적응성(adaptation)을 지원하고 각 계층의 특성을 상호 고려한 최적화(optimization)를 지원하는 Cross Layer 설계가 필요하다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크 환경에서의 Cross Layer 설계를 위해 고려되어야 할 사항과 관련 연구들을 정리하여 소개한다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 측면을 고려하여 현재까지 제안되어 온 저전력 MAC 프로토콜들과 저전력 라우팅 프로토콜들을 정리하여 소개한다. 무선 센서 네트워크에서는 기본적으로 교환이나 충전이 어려운 배터리로 동작하는 센서 노드들로 구성되므로 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이는 것이 무선 센서 네트워크에서는 중요하다. 무선 센서 네트워크 환경을 위해 제안된 MAC 프로토콜들 중 에너지 효율적인 MAC 프로토콜로 제안된 S-MAC(Sensor MAC) 프로토콜과 T-MAC(Timeout MAC) 프로토콜의 수면 모드 제어(sleep mode control)에 대해 수학적으로 분석한다. S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드의 효율적인 에너지 관리를 위한 수면 모드(sleep mode)에 의해 발생하는 지연과 패킷 송수신에 대한 평균 지연, 수면 모드를 통해 얻어지는 상대적인 에너지 절감 효과 및 센서 노드의 평균 전력 소모를 수학적으로 분석한다. 이러한 분석들을 통해 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 패킷의 평균 발생률과 패킷 송수신을 위해 소요되는 평균 시간의 변화 등 각종 환경에서의 성능을 에너지 소모 관점과 지연 관점에서 평가하고 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 무선 센서 네트워크에서의 관련 연구 및 동향들을 소개한다. 센서 네트워크에서의 에너지 효율을 고려한 MAC 프로토콜들과 라우팅 프로토콜들을 정리하고 무선 센서 네트워크 환경에서의 Cross Layer 설계 및 무선 센서 네트워크 관련 표준화 기술 및 동향을 소개한다. III장에서는 무선 센서 네트워크 환경을 위해 제안된 MAC 프로토콜들 중 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대해 수학적으로 분석한다. IV장에서는 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대한 성능을 에너지 소모 관점과 지연 관점에서 평가하여 비교 분석하고 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 관련 연구 동향

1. 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜 기술 동향

무선 센서 네트워크 환경에서 소모되는 전력을 줄이기 위한 여러 MAC 프로토콜들이 제안되었는데 이러한 무선 센서 네트워크 환경에서의 MAC 프로토콜들은 중요하게 여겨지는 설계 관점에 따라 물리 계층에서 사용되는 채널의 수, 경쟁 기반(contention based) 또는 비경쟁 기반 채널 접속 방식과 관련된 노드의 조직(organization), 수신되는 메시지가 있을 때 이를 인지하는 방법(notification)의 3가지로 분류될 수 있다.

첫 번째는 물리 계층에서 사용하는 채널수에 따른 분류로, 다중 채널 시스템의 충돌이 거의 없는 환경에서는 SMACS[1]와 PicoRadio[2]와 같은 다중 채널을 사용하는 MAC 프로토콜들이 좋은 성능을 보여주지만 다중 채널에 의한 복잡한 무선 통신이 상당한 에너지 소모를 보여 MAC 프로토콜 설계시 간단하고 강인한 단일 채널의 물리 계층을 사용하는 경향으로 바뀌게 되었다. 두 개의 채널을 사용하는 MAC 프로토콜은 한 개의 데이터 채널과 다른 하나의 wake-up 채널을 사용하는데, Miller와 Vaidya[3]는 송신 노드가 wake-up 채널을 통해서 수신 노드를 깨울 때 다른 노드들도 이 채널을 듣고 깨어나서 어떤 노드가 수신 노드인지를 알려주는 신호를 들은 후 송신 노드가 지정한 수신 노드가 아닌 노드들은 다시 저전력 소모 상태로 돌아감으로써 불필요한 전력 소모를 줄이는 방법을 제시하였다.

두 번째는 MAC 계층에서 네트워크 내 센서 노드의 조직화 방법에 따른 분류이다. 경쟁 기반 프로토콜은

랜덤 엑세스(random access) 방식이기 때문에 다른 노드와의 전송 충돌로 인한 에너지 소모와 매체 접근을 위한 채널 감지(channel sensing) 및 랜덤하게 수신되는 신호를 수신하기 위한 채널 감지로 인한 에너지 소모가 많다. CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 프로토콜이 그 예로 이 방식은 충돌을 가능한 피하는 방식이다[4]. 이웃 노드들이 자신의 제어 패킷을 도청하게 함으로써 송수신시 매체에 접근하는 것을 막아줌으로써 충돌을 피한다. 가능한 충돌을 피한다는 점에서 불필요한 에너지 소모를 줄일 수는 있으나 언제 수신될지 모르는 신호를 위해 계속 채널을 감지하고 있어야 하므로 에너지 효율이 크게 증가되지는 않는다. 이러한 단점을 보완하여 소모되는 전력을 줄이기 위해 여러 가지 다른 경쟁 기반의 프로토콜들이 제시되었다. Hill과 Culler[5], El-Hoiydi[6]는 각각 독자적으로 낮은 레벨 반송파(carrier)의 프리앰블 감지(preamble sensing) 기법을 통해 주기적으로 무선 통신을 위한 부분의 전원을 켜고 끄는 방법을 제안했다. 이러한 방법은 모든 경쟁 기반 MAC 프로토콜에 적용될 수 있는데 El-Hoiydi가 ALOHA 방식에 이 방법을 적용하여 Preamble Sampling[6]을 제안하였다. 최근에 제안된 B-MAC[7]에서는 프리앰블의 길이를 상위 계층에 변수로 제공하여 에너지 소모 감소와 성능 사이의 트레이드오프(tradeoff)를 통해 최적화된 값을 선택할 수 있게 하였다. El-Hoiydi는 Preamble Sampling을 한 단계 더 발전시켜 송신자가 수신자의 샘플링 스케쥴을 알고 있을 때, 긴 프리앰블이 필요 없음을 이용하여 수신 노드가 채널 샘플링을 시작할 때부터 긴 프리앰블이 아닌 짧은 기본 길이의 프리앰블이 포함된 데이터를 보내는 WiseMAC을 제안하였다[8]. WiseMAC은 프리앰블 길이를 네트워크의 트래픽에 따라 유동적으로 변화시켜 프리앰블 길이의 최적화를 통해 불필요한 에너지 소모를 줄이게 된다.

S-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크를 위해 특별히 고안된 방법으로 슬롯(slotted) 개념을 사용하는 MAC 프로토콜이다[9]. S-MAC 프로토콜은 단일 채널을 사용하는 경쟁기반 프로토콜로 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 활성 구간(active part)과 수면 구간(sleeping part)으로 나눈다. 수면 구간에서는 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 에너지 소모를 거의 하지 않는 상태로 활성 구간의 duty cycle을 줄임으로써 전력 소모를 줄이는 방법을 사용한다. 하지만 수율(throughput)과 지연(delay)에 대한 성능 사이에 tradeoff를 해야 하는 문제가 있다. S-MAC의 고정된 duty cycle에 적응성을 추가한 프로토콜이 제안되었는데 이를 T-MAC이라고 한다[10]. T-MAC은 네트워크 트래픽의 변동에 유연하게 적응할 수 있는 MAC 프로토콜로, 발생되는 트래픽을 한꺼번에 모아서 활성 구간에 전송하고 수면 구간이 되기 전에 정해진 time-out 시간 동안 노드 자신에게 송수신되는 신호가 없으면 수면 상태가 되는 방식으로 S-MAC 보다 에너지 관리의 효율이 조금 더 좋다.

프레임 기반의 TDMA 방식의 MAC 프로토콜은 예약과 스케쥴링을 사용하기 때문에 충돌이 없어 자연적으로 전력 소모를 줄이는 프로토콜이다[11]. 그러나 TDMA 기반의 프로토콜은 클러스터를 형성하여 통신하기 때문에 각각의 노드는 이웃 노드들의 스케쥴을 저장하고 있어야 하는 단점을 가지게 된다[12],[13]. L-MAC(Light weight MAC)은 TDMA 기반의 MAC 프로토콜로 시간을 슬롯으로 나누어 각 노드에게 할당함으로써 노드를 관리한다[14]. 이 프로토콜은 두 홉 내에 있는 이웃 노드들이 쓰지 않는 번호의 슬롯을 사용함으로써 충돌이 없는 통신을 할 수 있게 한다. 하지만 새로운 노드가 네트워크에 가입을 시도할 때 어떤 슬롯이 사용되지 않고 있는지를 알기 위해 프레임내의 모든 슬롯을 수신해야 하는 오버헤드가 있다.

세 번째는 센서 노드가 메시지 송수신을 어떻게 인지하는가에 의한 분류이다. 스케쥴링 기반의 프로토콜은 사전에 각 노드가 통신을 할 수 있는 시간이 정해져 있기 때문에 언제든 채널을 감지하고 있을 필요가 없이 정해진 시간에서만 통신을 하면 되므로 에너지 소모를 줄일 수 있는데, TDMA 방식을 사용하는 프로토콜이 그 대표 예이다[15],[16]. MAC 프로토콜 중 wake-up 라디오를 사용하는 경우 통신 채널과는 다른 주파수를 여분의 채널로서 wake-up 라디오를 사용하여 매우 낮은 전력으로 채널을 감지하여 수신되는 신호를 인지한다[17]. 그러나 채널수에 따른 분류에서 언급했던 바와 같이 wake-up 채널이 비록 저전력이라 할지라도 여분의 채널을 감지하고 있는 것은 에너지 소모를 줄이기 위한 측면에서 긍정적인 효과를 얻을 수 없어 단일 채널을 사용하는 센서 네트워크로 옮겨가게 되었다. 그 결과 불필요한 채널의 감지를 줄이기 위해 단일 채널을 사용하고, 주기적으로 라디오를 끄고 켜면서 라디오가 켜진 구간 동안만 채널을 감지하면서 데이터의 수신을 인지하게 하는 프로토콜을 제안하게 되었다. 앞에서 언급한 S-MAC, T-MAC, Wise-MAC, L-MAC, Preamble Sampling 방법들이 모두 단일 채널을 사용하면서 주기적으로 채널을 감지하는 프로토콜들이다. 이와 같은 무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜들을 분류하면 표 1과 같다[27].

2. 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜 기술 동향

무선 센서 네트워크에서의 에너지 소모를 줄이기 위한 노력은 MAC 계층 뿐 만 아니라 네트워크 계층에서도 이루어져 왔는데 네트워크 계층에서는 주로 에너지 소모를 줄이기 위한 라우팅 기법들이 제안되어 왔다. 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜의 설계를 위해서는 에너지 소모를 최소화하면서

표1. 무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜 분류 [27]

MAC Protocol	Channels	Organization	Notification
SMACS[1]	FDMA	Frames(TDMA based)	Schedule
PicoRadio[2]	CDMA + tone	Random(Contention based)	Wake-up
Miller[3]	Data + tone	Random(Contention based)	Wake-up+listening
Low Power Listening[5]	Single	Random(Contention based)	Listening
Preamble Sampling[6]	Single	Random(Contention based)	Listening
B-MAC[7]	Single	Random(Contention based)	Listening
S-MAC[9]	Single	Slots(Contention based)	Listening
T-MAC[10]	Single	Slots(Contention based)	Listening
L-MAC[11]	Single	Frames(TDMA based)	Listening

링크가 끊어지지 않고 최대한 오랫동안 유지될 수 있도록 설계하는 것이 중요하다.

SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)[18]은 에너지 효율적인 데이터 라우팅 기법에 초점을 둔 프로토콜로 같은 데이터를 여러 노드들에게 보낼 때 데이터가 중복으로 전달되는 것을 피하기 위해 제안된 방식으로 센서 네트워크에서 제안된 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜들 중 초기에 제안된 방식이다.

Heinzelman et al.[19] 는 클러스터(cluster) 기반의 프로토콜로 LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)를 제안하였다. 이는 네트워크에서 센서 노드들이 스스로 지역적인 클러스터(local cluster)를 형성하고 에너지 소모를 고르게 분산시키기 위해 적응성이 있는 클러스터링을 사용하는 프로토콜이다. 지역 클러스터 당 한 개의 노드가 클러스터 헤드(cluster head)로 동작하게 되는데 에너지가 가장 많은 센서 노드가 클러스터 헤드로 동작을 수행하면서 에너지가 다른 노드보다 작아지게 되면 그 시점에서 에너지가 가장 많은 노드가 클러스터 역할을 수행하게 된다. 클러스터 헤드의 역할을 한 개의 센서 노드가 담당하게 되면 배터리가 빨리 고갈되므로 클러스터 헤드를 순환시켜 한 개의 노드가 클러스터 헤드로서 동작하는 부담을 줄여주는 방식이다.

Estrin et al.[20]은 Directed Diffusion 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 이는 초기의 낮은 데이터 전송속도로 많은 트래픽을 여러 경로를 통해 전달하여 가장 좋은 경로를 찾은 후 찾은 경로를 통해 데이터를 전송함으로써 에너지 소모를 줄이는 방식이다. Shah et al.[22]은 Energy Aware Routing을 제안하였는데 가장 적은 에너지를 소모하는 최적의 경로를 사용하는 것이 항상 네트워크의 수명을 늘리는 최적의 방법은 아니라는 관점에서 네트워크의 수명을 길게 하기 위해 간헐적으로 성능과 에너지 소모 사이의 tradeoff로 에너지 소모를 줄이는 준최적의 경로를 사용한다. 이는 송신 노드에서 수신 노드까지 여러 개의 경로를 설정해 두고 각 경로마다 선택될 확률을 정해줘서 데이터를 수집하는 노드와 센서 노드가 통신을 할 때마다 경로 당 정해준 확률을 바탕으로 한 개의 경로를 선택하여 사용한다. Tian과 Georganas[23]는 적은 에너지를 소모하면서 수신 노드에 데이터를 전달할 수 있는 SWR(Single-Path With Repair Routing Scheme)을 제안하였다. 이는 단일 경로를 사용하여 데이터를 전달하고 링크 고장시(link failure) 다른 경로를 설정해 고장이 난 링크를 다시 복구시켜 적은 에너지 소모로 신뢰성 있는 데이터 전송을 수행하여 성공적인 데이터 전송률을 높인다.

앞서 설명한 라우팅 프로토콜들은 한 개의 데이터가 여러 개의 데이터로 복사되어 동시에 몇 개의 경로로 전달되는가에 따라 단일 경로 라우팅(single-path routing)과 다중 경로 라우팅(multi-path routing) 프로토콜로 분류될 수 있다. MESH[24]는 데이터를 여러 개로 복사하여 한 개의 센서 노드에 대해 여러 개의 경로로 데이터를 동시에 전달하는 다중 경로 프로토콜 방식이다. Braided[25]는 데이터 전달을 위해서 여러 개의 경로를 설정해 놓지만 그 경로들 중에서 한 개만 사용하고 다른 경로들은 백업(backup) 경로로 설정해 두어 링크 고장 시 다른 경로를 사용할 수 있으므로 에너지 효율적인 링크 복구를 할 수 있다. Directed Diffusion 라우팅 프로토콜은 데이터를 모으는 노드에서 몇 개의 경로를 설정하는가에 따라서 단일 경로의 라우팅을 할 수도 있고 다중 경로의 라우팅을 할 수도 있다. Energy Aware Routing, SWR 방식과 Rumor Routing[26]은 단일 경로 라우팅으로 전달하는 데이터의 복사 없이 한 개의 경로로만 데이터가 전달되는 방식이다. 일반적으로 단일 경로 라우팅 프로토콜이 다중 경로 라우팅 프로토콜보다 간단하고 에너지 소모도 적지만 단일 경로 라우팅은 링크가 고장이 날 경우 데이터 전송이 실패할 뿐 만 아니라 링크를 복구시키는데 에너지 소모가 많아지게 된다. 따라서 단일 경로 라우팅 프로토콜과 다중 경로 라우팅 프로토콜 사이의 tradeoff로 백업 경로를 미리 설정해 둔 보완된 단일 경로 라우팅 프로토콜 등이 연구되고 있다. 앞서 설명한 여러 가지

표 2. 무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜 분류

Routing Protocol	Geographical Size (Scalability)	Path	Energy Savings
LEACH[19]	Small	Single	• Max. lifetime of cluster • Energy efficient information collection
Directed Diffusion[20]	Small	Single/Multiple	• Min. energy consuming path selection • Energy efficient information dissemination
Energy Aware Routing[22]	Small	Single(+Backup path)	• Max. lifetime of network
SWR[23]	Large	Single	• Min. energy consuming path selection with adaptive link failure recovery
MESH[24]	Small	Multiple	• Min. energy consuming path selection with multiple path routing
Braided[25]	Small	Single(+Backup path)	• Min. energy consuming path selection with backup path
Rumor Routing[26]	Small	Single	• Min. energy consuming path selection

라우팅 프로토콜들은 지원할 수 있는 센서 네트워크의 크기와 에너지 절약 관점에 따라서 분류될 수 있다. 무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜들을 분류하면 표 2와 같다.

3. 무선 센서 네트워크에서의 Cross Layer 설계 기술 동향

무선 센서 네트워크에서는 각 노드 당 에너지 소모를 줄이는 것도 중요하지만 이와 함께 네트워크 전체의 에너지 소모를 줄이는 것이 중요하다. 이를 달성하기 위해 네트워크의 여러 계층을 고려한 Cross Layer 설계에 대한 연구가 필요하다.

Goldsmith와 Wicker[28]는 에너지가 제한된 무선 네트워크에서 에너지 소모를 줄이기 위해서 하드웨어, 링크 계층, MAC 계층, 그리고 다른 모든 상위 계층들이 결합적으로 설계되어야 하는 것을 보였다. Madan et al.[29]는 물리 계층, MAC 계층, 네트워크 계층에서 라우팅 시 각 계층 간의 상호 최적의 설계를 통해 에너지가 제한된 무선 센서 네트워크의 수명을 길게 하기 위한 방법을 제시하였고, ElBatt과 Ephremides[30]는 전력 제어로 극복하는데 한계가 있는 간섭의 영향을 스케쥴링을 통하여 줄이고 전송에 필요한 전력의 최소 기준에 맞도록 스케쥴된 노드별로 전력을 제어하여 시스템의 에너지 절약을 얻도록 제안하였다. Cruz와 Santhanam[31]는 전송 전력을 최소화하도록 최적화된 전력 제어와 링크 스케쥴링을 실시하고 링크의 상태 및 그에 따른 가중치를 기반으로 최적의 라우팅을 수행하도록 설계하는 방법을 제시하였고, Kozat et al.[32]은 데이터 전송률의 적응성이 없는 링크에서의 에너지 효율적인 전력 제어와 스케쥴링 방법을 제안했으며, Bhatia와 Kodialam[33]는 라우팅과 스케쥴링 및 전력 제어시 에너지 절약 효과를 얻을 수 있도록 결합적 설계 방식을 제안하였다.

Safwati et al.[34]은 MAC 계층과 네트워크 계층의 Cross Layer에서의 에너지 소모를 줄이기 위해 ECPS(Energy-Constrained Path Selection) 방식과 E2LA(Energy-Efficient Load Assignment) 방식을 제안하였다. ECPS 방식은 MAC 계층과 네트워크 계층의 라우팅을 결합적으로 설계하여 데이터가 수신 노드에 성공적으로 도착할 확률을 최대화하는 방식이고, E2LA 방식은 에너지 절약을 원하는지 원하지 않는지에 따라 라우팅하는 방식으로 에너지 효율적인 측면에서 라우팅의 부하를 분산시키는 방식이다. Cui et al.[35]은 링크 계층과 하드웨어 사이의 결합적인 설계를 통해 점-대-점(point-to-point) 링크 상에서 에너지 소모를 감소시키는 방식과 이를 MAC 계층까지 확장한 Cross Layer 설계를 통해 에너지 효율적인 가변 길이의 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식을 제안하였다. 그리고 Cui et al.[36]은 무선 센서 네트워크에서 라우팅과 MAC과 링크 계층을 고려하여 에너지 소모를 줄이는 결합적 설계를 convex 최적화 기법을 사용하여 제안하였다.

Cui et al.[37]은 전송 에너지(transmission energy)와 함께 전송에 필요한 회로 연산 에너지(circuit processing energy)를 고려하고, MQAM(M-Quadrature Amplitude Modulation)과 MFSK(M-Frequency Shift Keying) 시스템에서 채널 부호화(channel coding)를 고려하여 변조 대역, 전송 시간, constellation size에 대한 tradeoff 분석을 통해 에너지 효율적인 변조 방식을 선택하도록 제안하였다. 상위 계층에서 요구하는 최소 전송률을 충족시키면서 최소한의 에너지를 사용하여 정보를 전송하도록 주어진 채널 상황에서 변조 방식을 변화시킬 수 있다. 변조 방식과 더불어 채널 부호화 방법을 통해 에러 복구 능력을 키워서

주어진 비트 에러율를 만족시키는데 필요한 전력을 줄일 수 있다. 에러 복구 능력이 탁월한 터보 코드는 반복 연산을 통한 복호화 수행에 따른 전력 소모도 고려되어야 하지만 상위계층에서의 요구하는 전송률, 에러율, 응용의 특성에 따라 채널 부호화 방법을 적절히 선택하는 Cross Layer 설계 전략이 필요하다.

Cui et al.[38]은 센서 네트워크 환경에서 에너지 효율적인 협력(cooperative) MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 시스템을 제안하고 SISO(Single-Input Single-Output) 시스템과 비교하여 에너지 절약 효과와 지연 감소 효과를 보였다. MIMO 안테나 시스템은 SISO 안테나 시스템에 비하여 같은 전송 전력과 같은 비트 에러율 상황에서 높은 데이터 전송율을 지원할 수 있다. 이는 동일한 수율 상황에서 보다 적은 양의 전력이 소모될 수 있음을 의미한다. 센서 네트워크 환경에서 제한된 크기의 작은 센서 노드들에 MIMO 안테나 시스템을 적용하는 것은 구현상 어려운 점이 있기 때문에 여기서의 에너지 효율적인 협력 MIMO 시스템은 하나의 안테나를 가지는 개별 센서 노드들 여러 개가 정보 송수신 서로 협력을 이루어 다중 안테나 시스템의 효과를 얻을 수 있도록 제안되었다.

4. 무선 센서 네트워크 관련 표준화 기술 및 동향

무선 센서 네트워크 관련 표준화 기술들로는 WPAN(Wireless Personal Area Networks) 표준인 IEEE 802.15.1/Bluetooth 기술과 저속의 WPAN을 지향하는 IEEE 802.15.4/Zigbee 기술, IEEE 802.15.4a UWB(Ultra-Wide Band) 기술, 유비쿼터스 센서 네트워크(Ubiquitous Sensor Network) 기술, RFID(Radio Frequency Identification) 기술 등이 있다.

WPAN 표준인 IEEE 802.15.1/Bluetooth 기술[39],[40]에서는 현재의 트래픽 상황 및 채널 상황 등을 고려하여 각각의 노드들을 여러 전력 절약(power saving) 모드에서 동작하게 한다. 노드가 홀드 모드(hold mode) 일 경우에는 송수신이 이루어지지 않고 네트워크의 싱크 만을 유지시켜 소모되는 전력을 최소화하고, 파크 모드(park mode) 일 때는 미리 설정된 긴 주기 마다 깨어나서 송수신 준비를 하도록 하여 전력 소모를 줄이며, 스니프 모드(sniff mode)에서는 모든 슬롯 구간 동안 깨어서 전력을 소모하는 것이 아니라 깨어 있는 동안 몇몇 시간 슬롯들을 건너뛰도록 하여 전력 소모를 줄인다. 이는 활성 모드와 수면 모드 이외에 다양한 노드들의 상황에 맞게 다수의 모드를 설정하고 운용함으로써 효율적인 전력 절약 효과를 얻을 수 있다. WLAN(Wireless Local Area Networks) 표준인 IEEE 802.11에서의 전력 관리와 비교해보면 IEEE 802.11에서 노드의 모드는 두 가지로 활성 모드와 PS(Power Saving) 모드로 나뉘고, AP(Access Point) 기반의 망에서는 TIM(Traffic Indication Map) 을 이용한 전력 관리가 사용되며 애드혹 기반의 망에서는 ATIM(Announcement Traffic Indication Message)을 이용한 전력 관리가 사용된다.

저속의 WPAN을 지향하는 IEEE 802.15.4 / Zigbee 기술 [41],[42]에서 각 피코넷(piconet)들은 수퍼프레임(super- frame) 단위로 송수신이 이루어 지는데, 하나의 수퍼프레임 안에는 노드들이 활성화되어 송수신을 할 수 있는 비콘 구간(beacon period), 경쟁 구간(contention access period), 비경쟁 구간(contention free period)으로 구성되는 활성 구간(active period)과 네트워크 조정자(piconet coordinator)를 포함한 네트워크에 속한 노드들이 모두 비활성화되는 비활성 구간(inactive period)으로 나뉠 수 있다. 네트워크의 노드들이 비활성화되는 비활성 구간을 정의함으로써 전체 네트워크의 전력 소모를 줄일 수 있고 노드별 전력 모드 제어를 추가하여 전력 절약 효과를 높일 수 있다.

IEEE 802.15.4[43]에서는 수 개월에서 수 년 동안 유지될 수 있는 낮은 소모 전력의 단순한 회로 구조를 가진 센서에 대한 요구 사항 및 원격 조정, 가정 자동화 등의 응용에 대한 요구 사항 등을 받아 표준화를 하였다. 그러나 향후 유비쿼터스 환경에서 요구되는 보다 높은 정밀도의 위치 추적에 대한 해결책이 제시되지 않았고 초저전력으로 통신함으로써 수 년까지 수명을 유지할 수 있도록 하는 연구가 필요하게 되었다. 이러한 필요성에 따라 여러 회사들은 UWB 기술이 앞선 요구사항과 위치 추적에 대한 해결책이 될 수 있다고 보기 시작했다. UWB 기술은 낮은 전력 밀도로 통신하여 타 기기와 사용되는 주파수가 겹쳐도 간섭이 적고 가격이 저렴하고 소형화에 유리하며 낮은 전력 소모의 특성을 가지고 정밀한 거리 측정 및 cm 단위의 위치 추적에 이용될 수 있다. 현재 IEEE 802.15.4a Alt-PHY에서 이와 같은 요구 사항을 반영하여 표준화가 진행 중이며 핵심 기술로 UWB 기술의 도입이 활발히 논의되고 있다[44],[45].

유비쿼터스 센서 네트워크에서는 필요한 모든 것에 전자 태그를 부착하고 이를 통하여 사물의 인식 정보는 물론 주변의 환경 정보까지 탐지하여 이를 실시간으로 네트워크에 연결하여 정보를 관리하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 인식 정보를 제공하는 다양한 방식의 RFID 태그를 개발하고 이에 각종 감지 기능을 추가하여 이들 간의 네트워크를 구축하는 것이 필요하다. RFID 태그는 에너지원을 얻는 방법에 따라 수신 전파에서 송신 에너지를 얻는 수동형과 별도의 배터리에서 에너지를 얻는 능동형으로 나뉠 수 있다. 유비쿼터스 환경에 맞게 값싸게 구현되고 저전력으로 오랜 기간 지속되어 통신이 가능하도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, RFID 표준화는 국제 표준 기구인 ISO와 IEC가 합동으로 창설한 ISO/IEC JTC1/SC31(AIDC)가 주도하고 있고 산업에의 적용을 위해 항공, 자동차, 우편, 건설, 물류, 유통 등 다양한 산업별 표준화 단체와 연관 관계를

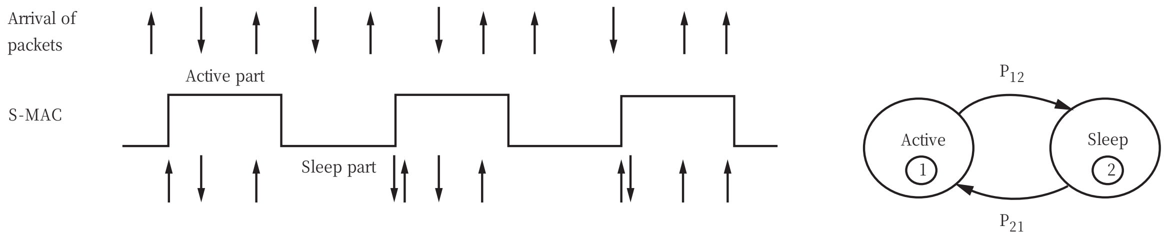

그림 1. S-MAC 프로토콜에 대한 동작 및 상태 천이 모델

맺고 있다. 현재 코드 체계와 각 주파수별 무선 인터페이스 규격 등의 제정을 완료하고 응용 요구사항(ARP), 기초태그, 실시간 위치탐지(RTLS) 등의 기술보고서 및 표준화의 초기 단계에 있다[46],[47].

Ⅲ. 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 모델링 및 분석

무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜들 중 에너지 효율적인 MAC 프로토콜로 제안된 S-MAC[9] 프로토콜과 T-MAC[10] 프로토콜의 수면 모드 제어에 대해 모델링을 수행하고 수학적으로 분석한다.

1. S-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대한 모델링 및 분석

S-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크를 위해 고안된 방법으로 슬롯 개념을 사용하는 MAC 프로토콜이다. S-MAC 프로토콜은 단일 채널을 사용하는 경쟁기반 프로토콜로 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 활성 구간과 수면 구간으로 나눈다. 수면 구간에서는 센서 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 전력을 거의 소모하지 않는 상태가 된다. S-MAC 프로토콜에서는 전력 소모를 줄이기 위해 활성 구간의 duty cycle을 줄이는 방법을 사용하게 된다. 그러나 수율과 지연에 대한 성능과 전력 소모 사이에 tradeoff 문제가 있으며, S-MAC 프로토콜에서는 이러한 성능과 전력 소모 사이의 세밀한 조정이 어려운 문제가 있다.

본 논문에서 고려하는 S-MAC 프로토콜에 대한 동작 및 상태 천이 모델(state transition model)은 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 S-MAC 프로토콜에서는 수면 구간에 패킷의 송수신이 이루어지지 않으며 지연된 패킷의 송수신은 활성 구간에서 이루어지게 된다. 그림 1에서 나타낸 패킷의 도착(arrival of packets)은 센서 노드에 송수신을 위한 패킷이 발생한 시점을 나타낸다. S-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에서 머무르는 시간을 T_{active}, 수면 상태에서 머무르는 시간을 T_{sleep}, 한 주기에 해당하는 시간을 T_{slot}이라고 하면 $T_{slot}=T_{active}+T_{sleep}$이 성립한다. S-MAC 프로토콜에서 상태 1과 상태 2에 평균적으로 머무르는 시간을 각각 $\overline{T}_1$, $\overline{T}_2$라고 하면 $\overline{T}_1=T_{active}$, $\overline{T}_2=T_{sleep}$과 같이 나타낼 수 있고, 각 상태에서의 정상 상태 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1=\frac{\overline{T}_1}{\overline{T}_1+\overline{T}_2}=\frac{T_{active}}{T_{active}+T_{sleep}}=\frac{T_{active}}{T_{slot}}, \qquad (1)$$

$$P_2=\frac{\overline{T}_2}{\overline{T}_1+\overline{T}_2}=\frac{T_{sleep}}{T_{active}+T_{sleep}}=\frac{T_{sleep}}{T_{slot}}=1-\frac{T_{active}}{T_{slot}} \qquad (2)$$

센서 노드가 수면 상태에 머무르는 경우 센서 노드의 전력 소모를 줄이기 위해 송수신이 이루어지지 않는다고 가정하면, 패킷을 송신하고자 하는 센서 노드는 패킷을 수신해야 하는 수신 센서 노드가 수면 상태에서 활성 상태로 천이되기 전까지 패킷 송신을 지연시켜야만 한다. 이러한 수면 상태에 의해 추가적으로 발생하는 지연을 수면 지연(sleep delay), D_s라 하고 송수신을 위한 패킷의 발생을 포아송 발생(Poisson arrival)이라고 가정하면 수면 지연 D_s는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_s=\sum_{k=0}^{\infty}\Pr(N_{pkt}=k)\cdot(D|N_{pkt}=k)=T_{sleep}/2, \qquad (3)$$

여기서 센서 네트워크에서의 송수신을 위한 패킷의 발생에 대한 분포는 고려되는 센서 네트워크의 환경 및 응용 프로그램에 따라 다양한 분포를 가지게 된다. 본 논문에서는 S-MAC과 T-MAC의 성능의 간단한 분석을 통해 두 기법의 성능을 비교하는데 목적이 있으므로 수

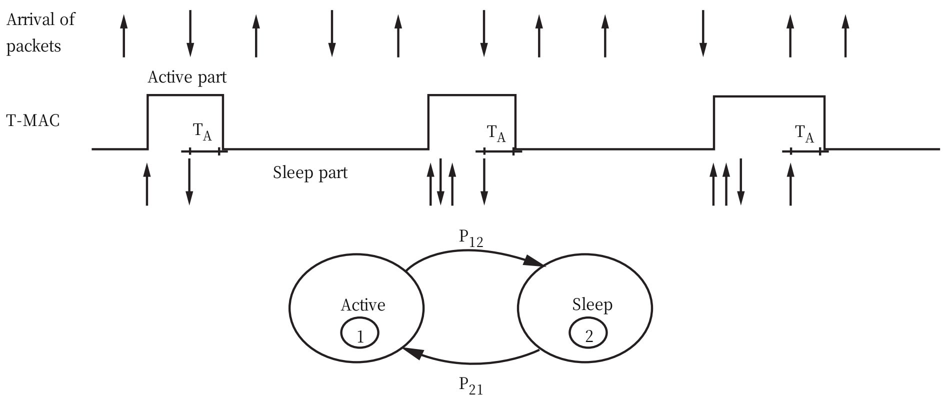

그림 2. T-MAC 프로토콜에 대한 동작 및 상태 천이 모델

학적 분석의 편의상 패킷의 발생을 포아송 발생으로 가정한다. N_{pkt}은 수면 상태의 센서 노드에 송수신을 위한 패킷이 발생하는 개수를 나타내며 $(D|N_{pkt}=k)$은 수면 상태의 센서 노드에 송수신을 위한 패킷의 발생이 k개 일어나는 조건 하에서의 수면 모드에 의한 지연을 나타낸다. S-MAC 프로토콜은 기본적으로 CSMA/CA 프로토콜과 같이 경쟁을 기반으로 하는 프로토콜을 사용하므로, 경쟁 기반의 MAC 프로토콜들이 기본적으로 가지게 되는 백오프 지연(backoff delay) 이나 반송파 감지 지연(carrier sensing delay) 등을 수반하게 된다. 여기서 정의한 수면 지연 D_s는 기존의 경쟁 기반 MAC 프로토콜에서 발생하는 백오프 지연이나 반송파 감지 지연 등에 추가적으로 발생하게 되는 지연이다. 즉 수면 지연 D_s는 센서 노드가 수면 상태에 머무를 때 발생하는 패킷들에 대한 평균 지연 시간을 나타낸다. 활성 상태까지 고려한다면 활성 상태에서의 패킷에 대한 송수신은 수면 모드 동작에 의한 지연이 발생하지 않으므로, 활성 상태와 수면 상태에서의 수면 모드 동작에 의한 패킷의 송수신에 대한 지연을 수면 모드 제어에 의한 평균 지연(average delay), $\overline{D}$라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{D} = P_{sleep} \cdot D_s = P_{sleep} \cdot T_{sleep}/2 = P_2 \cdot \overline{T}_2/2 \qquad (4)$$

S-MAC 프로토콜에서의 수면 모드 제어에 의해 얻어지는 에너지 소모에 있어서의 상대적인 절감 효과를 상대적 에너지 절감 효과(relative energy savings), E_s라고 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = T_{sleep}/T_{slot} = 1 - T_{active}/T_{slot} \qquad (5)$$

S-MAC 프로토콜에서의 평균적인 전력 소모를 $\overline{P}c$라고 하면, 이는 각 상태 i에서 소모되는 센서 노드의 전력 소모를 Pc_i라고 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{P}c = \sum_{i=1}^{2} Pc_i \cdot P_i = Pc_{active} \cdot P_1 + Pc_{sleep} \cdot P_2 \qquad (6)$$

S-MAC 프로토콜에서의 duty cycle은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Duty\ cycle = \frac{T_{active}}{T_{active} + T_{sleep}} \qquad (7)$$

2. T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대한 모델링 및 분석

S-MAC 프로토콜의 고정된 duty-cycle에 적응성을 추가한 프로토콜이 제안되었는데 이를 T-MAC이라고 한다[10]. T-MAC은 네트워크 트래픽의 변동에 유연하게 적응할 수 있는 MAC 프로토콜로 발생되는 트래픽을 한꺼번에 모아서 활성 구간에 전송하고 수면 구간이 되기 전에 정해진 일정 시간(time-out) 동안 센서 노드 자신에게 송수신되는 트래픽이 없으면 수면 상태가 되는 방법으로 S-MAC 보다 에너지 관리의 효율이 조금 더 좋다고 할 수 있다. 본 논문에서 고려하는 T-MAC 프로토콜에 대한 동작 및 상태 천이 모델은 그림 2와 같다.

T-MAC 프로토콜에서 센서 노드의 활성 상태에서 트래픽 부하에 따라 머무르는 시간을 결정하게 되는 일

정 시간을 activity time-out value, T_A라 하고, T-MAC 프로토콜에서의 상태 1과 상태 2에 평균적으로 머무르는 시간을 각각 $\overline{T}_1$, $\overline{T}_2$라고 하고, T-MAC 프로토콜에서 한 주기에 해당하는 시간을 앞서 S-MAC 프로토콜과 같이 T_{slot}이라고 하면 각 상태에서의 정상 상태 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{\overline{T}_1}{\overline{T}_1 + \overline{T}_2}, \quad P_2 = \frac{\overline{T}_2}{\overline{T}_1 + \overline{T}_2} \tag{8}$$

T-MAC 프로토콜에서의 상태 1에 평균적으로 머무르는 시간 $\overline{T}_1$은 그림 2와 같이 T-MAC 프로토콜의 동작을 가정할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{T}_1 = E[T_1]$$

$$= E[\sum_{i=0}^{N_1} S_i + \sum_{j=0}^{N_2} \{(T_{p_j} | T_{p_j} < T_A) + S_j\} + T_A]$$

$$= E[\sum_{i=1}^{N_1} S_i] + E[\sum_{j=1}^{N_2} (T_{p_j} | T_{p_j} < T_A) + S_j] + T_A$$

$$= E[N_1]E[S] + E[N_2] \cdot (E[T_p | T_p < T_A] + E[S]) + T_A, \tag{9}$$

여기서 N_1은 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 수면 상태일 때 일어난 패킷의 송수신 발생 횟수이고, S_i는 i번째 패킷의 송수신 시 소요되는 시간이다. N_2는 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에 머무르는 동안 N_1개의 패킷 서비스를 마친 후 수면 상태로 천이하기 전까지 패킷의 송수신이 발생한 횟수이고, T_{p_j}는 (j-1)번째 패킷의 송수신이 끝난 후 j번째 패킷의 송수신이 발생하기까지 걸리는 시간이다. 여기서 T_{p_1}의 경우에는 수면 상태인 상태 2에서 활성 상태인 상태 1로 천이되어 N_1개의 패킷 서비스를 마친 시점에서부터 1번째 패킷의 송수신이 발생하기까지 걸리는 시간을 나타낸다. 송수신을 위한 패킷의 발생은 앞서 S-MAC 프로토콜에서 분석한 바와 같이 λ_p의 평균 패킷 발생율을 가지는 포아송 발생이라 가정한다. T-MAC 프로토콜에서의 상태 2에 평균적으로 머무르는 시간 $\overline{T}_2$은 그림 2와 같이 T-MAC 프로토콜의 동작을 가정할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{T}_2 = E[T_2] = E[T_{slot} - T_1 | T_1 < T_{slot}]$$

$$= \frac{\int_0^{T_{slot}} (T_{slot} - t) / \overline{T}_1 \cdot \exp(-t/\overline{T}_1)\, dt}{\int_0^{T_{slot}} 1/\overline{T}_1 \cdot \exp(-t/\overline{T}_1)\, dt}$$

$$= T_{slot} - \overline{T}_1 + - \frac{T_{slot} \cdot \exp(-T_{slot}/\overline{T}_1)}{1 - \exp(-T_{slot}/\overline{T}_1)} \tag{10}$$

여기서 패킷의 송수신 시 소요되는 서비스 시간 S는 T-MAC 프로토콜에서의 T_A에 비해 일반적으로 작으므로, T_1은 T_p에 의해 결정되고 T_p들의 합은 truncated 지수 분포들의 기하 분포 합인데 지수 분포의 기하 분포 합은 지수 분포이므로, T-MAC 프로토콜에서의 상태 1에 머무르는 시간 T_1의 분포를 지수 분포로 근사하여 가정한다. T-MAC 프로토콜의 센서 노드가 수면 상태일 때 일어난 패킷의 송수신 발생 횟수 N_1에 대한 평균은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[N_1] = \lambda_p \overline{T}_2$$

$$= \lambda_p \cdot \left\{ T_{slot} - \overline{T}_1 + \frac{T_{slot} \cdot \exp(-T_{slot}/\overline{T}_1)}{1 - \exp(-T_{slot}/\overline{T}_1)} \right\} \tag{11}$$

T-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에 머무르는 동안 N_1개의 패킷 서비스를 마친 후 수면 상태로 천이하기 전까지 패킷의 송수신이 발생한 횟수 N_2의 평균은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[N_2] = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \Pr(N_2 = n)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \prod_{i=1}^{n} \Pr(T_{p_i} < T_A) \cdot \Pr(T_{p_{n+1}} \geq T_A)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left(\int_0^{T_A} \lambda_p \exp(-\lambda_p t)\, dt \right)^n \cdot \left(\int_{T_A}^{\infty} \lambda_p \exp(-\lambda_p t)\, dt \right)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot (1 - \exp(-\lambda_p T_A))^n \exp(-\lambda_p T_A)$$

$$= \frac{1 - \exp(-\lambda_p T_A)}{\exp(-\lambda_p T_A)} \tag{12}$$

T-MAC 프로토콜에서 패킷의 송수신 시 소요되는 시간 S에 대한 분포를 파레토(Pareto) 분포와 지수(exponential) 분포, 상수(constant) 3가지에 대해서 고려한다면 패킷의 송수신 시 소요되는 시간 S에 대한 분포 및 평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_s(t) = \begin{cases} \alpha \cdot {k_s}^{\alpha} / t^{\alpha+1} & \text{(Pareto)} \\ \mu_p \exp(-\mu_p t) & \text{(exponential)} \\ \delta(t - 1/\mu_p) & \text{(constant)} \end{cases}$$

$$E[S] = \begin{cases} \dfrac{k_s \cdot \alpha}{\alpha - 1} & \text{(Pareto)} \\ 1/\mu_p & \text{(exponential or constant)} \end{cases} \quad (13)$$

여기서 k_s는 패킷의 송수신 시 소요되는 시간의 최소값을 나타내고, α는 패킷의 송수신 시 소요되는 시간 S에 대한 heavy-tailedness를 나타낸다. $T_p < T_A$의 조건에서의 T_p의 평균은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[T_p | T_p < T_A]$$

$$= \frac{\int_0^{T_A} t \lambda_p \exp(-\lambda_p t)\, dt}{\int_0^{T_A} \lambda_p \exp(-\lambda_p t)\, dt} = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{T_A \cdot \exp(-\lambda_p T_A)}{1 - \exp(-\lambda_p T_A)} \quad (14)$$

T-MAC 프로토콜에서는 $\overline{T}_1 \geq T_A$과 $\overline{T}_2 \leq T_{slot} - T_A$의 관계식이 성립하므로, T-MAC 프로토콜의 센서 노드가 수면 상태에 머무를 때 발생하는 패킷들에 대한 평균 지연 시간에 해당하는 수면 지연 D_s는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_s = \overline{T}_2 / 2 \leq (T_{slot} - T_A)/2 \quad (15)$$

T-MAC에서의 활성 상태와 수면 상태에서의 수면 모드 동작에 의한 패킷의 송수신에 대한 지연을 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{D} = P_2 \cdot \overline{T}_2 / 2 \leq \frac{(T_{slot} - T_A)}{T_{slot}} \cdot \frac{(T_{slot} - T_A)}{2} \quad (16)$$

T-MAC 프로토콜에서의 수면 모드에 의해 얻어지는 상대적인 에너지 절감 효과를 상대적 에너지 절감 효과 E_s라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = P_2 \leq (T_{slot} - T_A) / T_{slot} \quad (17)$$

T-MAC 프로토콜에서의 평균적인 전력 소모를 $\overline{Pc}$라고 하면, 이는 각 상태 i에서 소모되는 센서 노드의 전력 소모를 Pc_i라고 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{Pc} = \sum_{i=1}^{2} Pc_i \cdot P_i = Pc_{active} \cdot P_1 + Pc_{sleep} \cdot P_2 \quad (18)$$

T-MAC 프로토콜에서의 duty cycle은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Duty\ cycle = P_1 \geq T_A / T_{slot} \quad (19)$$

IV. 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 성능 평가

무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜들 중 에너지 효율적인 MAC 프로토콜로 제안된 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대해 III장에서의 수학적인 분석들을 기반으로 성능 평가를 수행하고 비교 분석한다.

그림 3은 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 평균 활성 상태에 머무르는 시간의 변화에 따른 상대적 에너지 절감 효과 E_s와 평균 수면 지연 D_s의 관계를 보여준다. 여기서 평균 수면 지연 D_s는 센서 노드가 수면 상태에 머무를 때 발생하는 패킷들에 대한 평균 지연 시간을 나타내고, 상대적 에너지 절감 효과는 수면 모드에 의해 얻어지는 상대적인 에너지 절감 효과를 나타낸다. 그림 3에서 동일한 수면 지연 D_s에서 센서 노드의 평균 활성 상태 시간이 800ms, 400ms, 200ms, 100ms로 감소할수록 상대적 에너지 절감 효과 E_s는 증가하게 된다. 이는 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드의 평균 활성 상태 시간이 감소할수록 평균적으로 수면 상태에 머무르는 시간이 증가하기 때문이다.

그림 4는 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 평균 활성 상태에 머무르는 시간의 변화에 따른 평균 수면 지연 D_s와 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$의 관계를 보여준다. 여기서 센서 노드의 활성 상태에서 소모되는 평

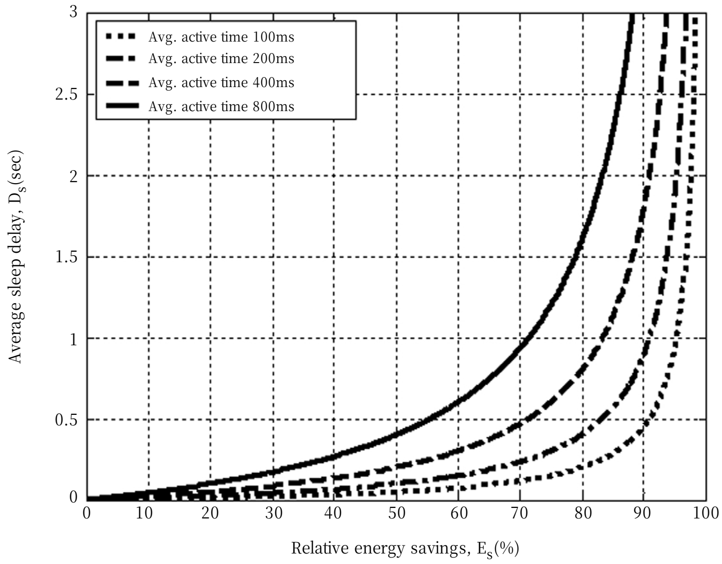

그림 3. 상대적 에너지 절감 효과에 따른 평균 수면 지연

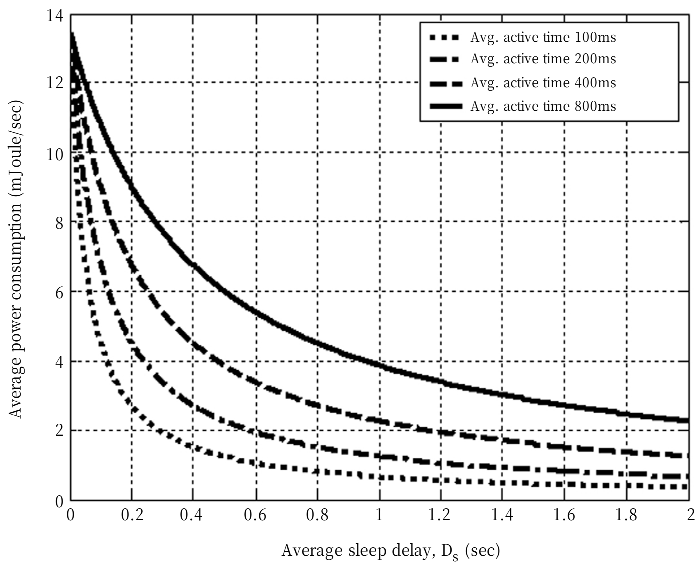

그림 4. 평균 수면 지연에 따른 평균 전력 소모

균 전력 소모를 13.5mW, 센서 노드의 수면 상태에서의 평균 전력 소모를 15μW로 가정하였다[9]. 그림 4에서 동일한 수면 지연 D_s에서 센서 노드의 평균 활성 상태 시간이 100ms, 200ms, 400ms, 800ms로 증가할수록 센서 노드의 평균 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하게 된다. 이는 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드의 평균 활성 상태 시간이 증가할수록 평균적으로 수면 상태에 머무르는 시간이 감소하므로 센서 노드의 평균 전력 소모는 증가하는 것이다.

그림 5는 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서의 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$를 activity time-out value, T_A의 변화에 따라 비교한 결과이다. 그림 5~8에서 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서의 한 주기에 해당하는 시간 T_{slot}은 1000msec로 가정하였다. T-MAC 프로토콜의 활성 상태에서 트래픽 부하에 따라 머무르는 시간을 결정하는 T_A가 증가할수록 T-MAC

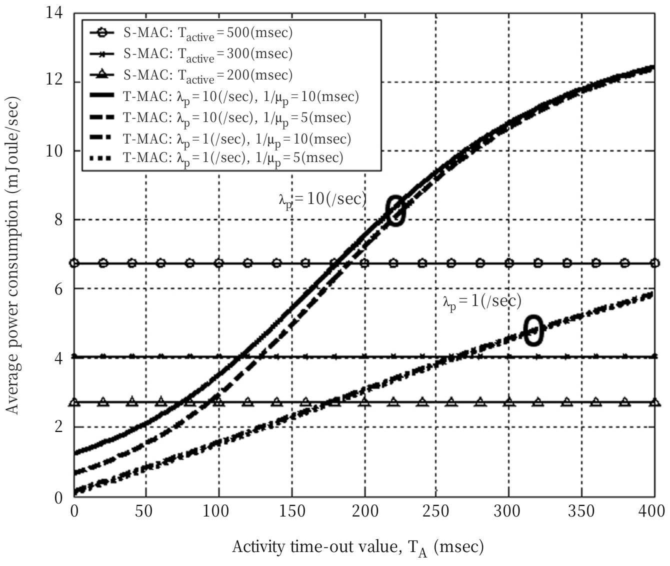

그림 5. T_A에 따른 S-MAC, T-MAC에서의 평균 전력 소모

프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에 머무를 확률이 증가하므로 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하게 된다. S-MAC 프로토콜의 성능은 T_A의 변화에 대해 일정하고 평균 활성 상태 시간 T_{active}가 200ms, 300ms, 500ms로 증가할수록 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하게 된다. T-MAC 프로토콜은 트래픽 부하에 따라 적응적으로 성능이 변화하게 되며 이는 패킷의 평균 송수신 발생률 λ_p와 패킷의 송수신 시 소요되는 평균 시간 $1/\mu_p$의 변화에 따른 성능의 변화를 통해 알 수 있다. 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p가 1(/sec)에서 10(/sec)로, 패킷의 송수신 시 소요되는 평균 시간 $1/\mu_p$이 5msec에서 10msec로 증가함에 따라 T-MAC 프로토콜의 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하게 된다. T-MAC 프로토콜의 T_A값이 작은 경우에는 S-MAC 프로토콜과 비교시 평균적인 전력 소모가 작지만 T_A값이 증가함에 따라 S-MAC 프로토콜보다 더 많은 센서 노드의 전력 소모를 요구하게 된다.

그림 6은 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서의 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$를 T_A의 변화에 따라 비교한 결과이다. 여기서 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 활성 상태와 수면 상태에서의 수면 모드 동작에 의한 패킷의 송수신에 대한 지연을 나타낸다. T-MAC 프로토콜의 활성 상태에서 트래픽 부하에 따라 머무르는 시간을 결정하는 T_A가 증가할수록 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에 머무를 확률이 증가하므로 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. S-MAC 프로토콜의 성능은 T_A의 변화에 대해 일정하고 평균 활성 상태 시간 T_{active}이 200ms, 300ms, 500ms로 증가할수록 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. 패킷의 평균 송수신 발생률 λ_p이 1(/sec)에서 10(/sec)로, 패킷의 송수신 시 소요되는 평균 시간 $1/\mu_p$이 5msec에서 10msec로 증가함에 따라 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. T-MAC 프로토콜의 T_A값이 작은 경우에는 S-MAC 프로토콜과 비교시 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$가 크지만, T_A값이 증가함에 따라 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. 이는 T-MAC 프로토콜에서는 T_A의 증가에 따라 트래픽 부하에 대해 적응적으로 센서 노드의 활성 상태에 더 긴 시간을 머무르게 하기 때문이다.

그림 7은 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서의 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$를 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p의 변화에 따라 비교한 결과이다. 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p가 증가할수록 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에 머무를 확률이 증가하므로 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하게 된다. S-MAC 프로토콜의 성능은 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p의 변화에 대해 일정하고 평균 활성 상태 시간 T_{active}이 200ms, 300ms, 500ms로 증가할수록 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하게 된다. T-MAC 프로토콜은 패킷의 송수신 시 소요되는 평균 시간 $1/\mu_p$이 5msec에서 10msec로 증가함에 따라 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 증가하고 T-MAC 프로토콜의 T_A값이 160msec에서 80msec로 감소하면 평균적인 전력 소모 $\overline{Pc}$는 감소하게 된다. T-MAC 프로토콜에서는 평균 패킷의 송수신 발생률이 작은 경우에는 S-MAC과 비교시 센서 노드의 평균적인 전력 소모가 작지만, 패킷의 송수신 발생률이 증가하면

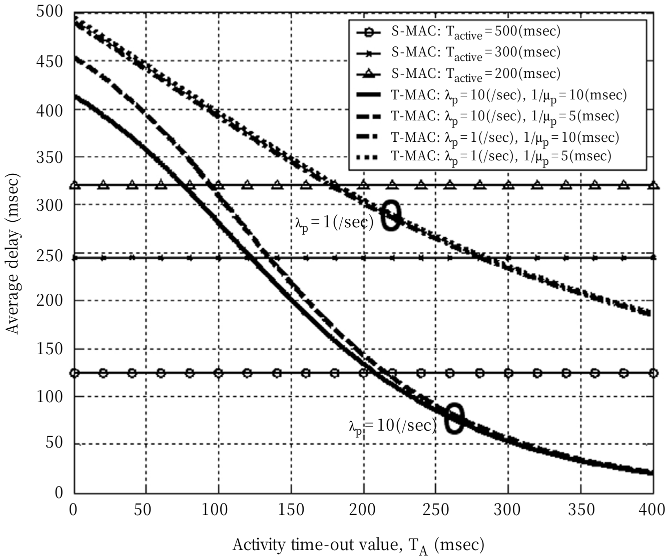

그림 6. T_A에 따른 S-MAC, T-MAC에서의 평균 지연

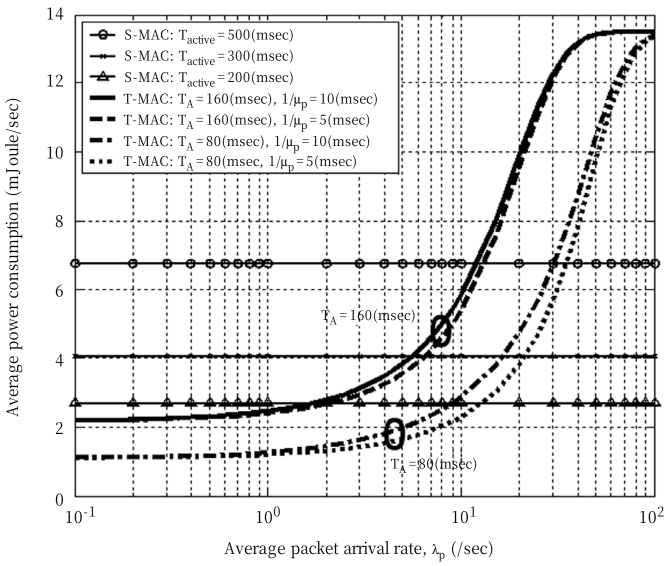

그림 7. λ_p에 따른 S-MAC, T-MAC에서의 평균 전력 소모

T-MAC 프로토콜에서의 센서 노드의 평균 전력 소모는 증가한다.

그림 8은 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서의 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$를 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p의 변화에 따라 비교한 결과이다. 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p가 증가할수록 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드가 활성 상태에 머무를 확률이 증가하므로 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. S-MAC 프로토콜의 성능은 평균 패킷의 송수신 발생률 λ_p의 변화에 대해 일정하고 평균 활성 상태 시간 T_{active}이 200ms, 300ms, 500ms로 증가할수록 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. T-MAC 프로토콜은 패킷의 송수신 시 소요되는 평균 시간 $1/\mu_p$이 5msec에서 10msec로 증가함에 따라 센서 노드가 활성 상태에 머무를 확률이 증가하므로 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. T-MAC 프로토콜에서 평균 패킷의 송수신 발생률이 작은 경우에는 S-MAC과 비교시 수면 모드 제어에 의한 평

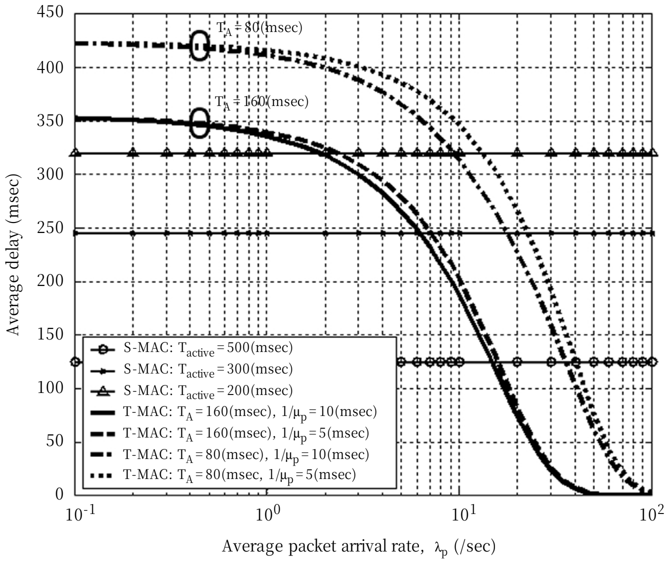

그림 8. λ_p에 따른 S-MAC, T-MAC에서의 평균 지연

균 지연 $\overline{D}$가 크지만, 패킷의 송수신 발생률이 증가함에 따라 T-MAC 프로토콜에서의 수면 모드 제어에 의한 평균 지연 $\overline{D}$는 감소하게 된다. 이는 T-MAC 프로토콜에서는 트래픽 부하의 변화에 대해 적응적으로 센서 노드의 활성 상태에 머무를 시간이 변화하기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 측면을 고려하여 현재까지 제안되어 온 저전력 MAC 프로토콜들과 저전력 라우팅 프로토콜들을 정리하여 소개하고 무선 센서 네트워크 환경에서의 Cross Layer 설계 및 무선 센서 네트워크 관련 표준화 기술 및 동향을 소개하였다. 또한 무선 센서 네트워크 환경을 위해 제안된 MAC 프로토콜들 중 에너지 효율적인 MAC 프로토콜로 제안된 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대해 수학적으로 분석하고 이들의 성능을 에너지 소모 관점과 지연 관점에서 평가하고 비교 분석하였다. 본 논문에서는 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 수면 모드 제어에 의해 발생하는 센서 노드의 활성 상태와 수면 상태에 대한 상태 확률값과 각 상태에 존재할 평균 시간을 분석하고, 이를 통해 센서 노드의 효율적인 에너지 관리를 위한 수면 모드에 의해 발생하는 지연과 패킷 송수신에 대한 평균 지연을 수학적으로 분석하였다. 또한 수면 모드를 통해 얻어지는 상대적인 에너지 절감 효과와 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 센서 노드의 평균 전력 소모를 수학적으로 분석하였다. 이러한 분석들을 통해 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜에서 패킷의 평균 발생률과 패킷 송수신을 위해 소요되는 평균 시간의 변화 등 각종 환경에서의 평균 전력 소모와 수면 모드에 의해 발생하는 패킷 송수신에 대한 평균 지연에 대하여 성능을 평가하였다. 이를 통해 무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜 중 S-MAC 프로토콜과 T-MAC 프로토콜의 수면 모드 제어에 대해 비교 분석하였다.

무선 센서 네트워크에서 각 센서 노드들이 수집한 정보의 시간적인 유효성에 따라 최대 단-대-단 지연 조건을 만족시키면서도 센서 노드들의 배터리 수명을 고려하여 센서 네트워크 전체의 에너지 효율을 높이기 위해서는 센서 노드의 프로토콜 스택에서의 여러 계층을 고려한 Cross Layer 설계에 대한 연구가 필요하다. 앞으로 무선 센서 네트워크에서의 Cross Layer 설계를 위해 각 계층별로 고려해야 할 사항들은 다음과 같다. 물리 계층에서는 주어진 현재의 채널 상황과 현재의 네트워크의 상태에서 해당 응용 프로그램의 요구 조건에 맞도록 전송 속도, 전송 전력, 변조 방식 및 채널 부호화 기법 등을 적절하게 변화시키면서도 센서 노드의 배터리 전력 소모가 크지 않도록 복잡도가 작으면서 효율적인 기법들을 사용하는 것이 필요하다. MAC 계층에서는 네트워크 계층의 지연 제한 조건 및 정보의 우선 순위도와 같은 서비스 품질에 대한 요구 조건을 고려하고, 물리 계층의 무선 링크 및 채널 간섭 상황에 따라 채널 자원을 선택하고, 그에 맞는 매체 접근 방법 및 스케쥴링 방식을 사용하면서 에너지 효율을 고려하는 것이 필요하다. 네트워크 계층에서는 현재의 무선 링크의 채널 상황과 네트워크의 트래픽 상황 및 센서 노드의 전력 상

황에 따라 라우팅 경로의 재설정 및 네트워크 연결성을 유연성 있게 변화시키면서 센서 노드의 배터리 수명 뿐만 아니라 센서 네트워크 전체의 수명을 고려하여 운용하는 것이 필요하다.

[참고문헌]

[1] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi and G. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, Oct. 2000, pp. 16-27.

[2] C. Guo, L. Zhong and J. Rabaey, "Low power distributed MAC for ad hoc sensor networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2001*, Vol. 5, Nov. 2001, pp. 2944-2948.

[3] M. Miller and N. Vaidya, "Minimizing energy consumption in sensor networks using a wakeup radio," in *Proc. IEEE WCNC 2004*, Vol. 4, Mar. 2004, pp. 2335-2340.

[4] IEEE Standard 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.

[5] J. Hill and D. Culler. Mica, "A wireless platform for deeply embedded networks," *IEEE Micro*, Vol. 22, Nov. 2002, pp. 12-24.

[6] A. El-Hoiydi, "Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks," in *Proc. IEEE ICC 2002*, Vol. 5, Apr. 2002, pp. 3418-3423.

[7] J. Polastre and D. Culler, "B-MAC: An adaptive CSMA layer for low-power operation," Technical Report, Dec. 2003.

[8] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C. Enz and E. Le Roux, "Poster abstract: WiseMAC, an Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Wireless Sensor Network " in *Proc. ACM Sensys 003*, Nov. 2003.

[9] W.Ye, J.Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2002*, Vol. 3, Jun. 2002, pp. 1567-1576.

[10] T.van Dam And K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. ACM Sensys 2003*, Nov. 2003, pp.171-180.

[11] P. Havinga and G. Smit, "Energy-efficient TDMA medium access control protocol scheduling," in *Proc. AMOC 2000*, Nov. 2000, pp. 1-9.

[12] J. C. Haartsen, "The Bluetooth radio system," *IEEE Personal Communications,* Vol. 7, No. 1, Feb. 2000, pp. 28-36.

[13] Specification of the Bluetooth System: Core (2001).

[14] L. van Hoesel and P. Havinga, "A lightweight medium access protocol for wireless sensor networks," in *Proc. INSS 2004*, May 2004.

[15] K. Arisha, M. Youssef and M. Younis, "Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks," in *Proc. IMPACCT 2002*, May 2002.

[16] G. Pei and C. Chien, "Low Power TDMA in large wireless sensor networks," in *Proc. IEEE MILCOM 2001*, Vol. 1, Oct. 2001, pp. 347-351.

[17] S. Singh and C. Raghavendra, "PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for ad hoc networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 28, No. 3, Jul. 1998, pp. 5-26.

[18] W. R Heinzelman, J. Kulik and H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," in *Proc. ACM/IEEE MobiCom 1999*, Aug. 1999, pp. 174-185.

[19] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. IEEE Hawaii International Conference on System Sciences 2000*, Jan. 2000.

[20] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks," in *Proc. ACM/IEEE MobiCom 2000*, Aug. 2000.

[21] C. Schurgers and M. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE MILCOM 2001*, Vol. 1, Oct. 2001, pp. 357-361.

[22] R. C. Shah and J. M. Rabaey, "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks," in *Proc. IEEE WCNC 2002*, Vol. 1, Mar. 2002, pp. 350-355.

[23] Di Tian, Nicolas D. Georganas, "Energy Efficient Routing with Gauranteed Delivery in Wireless Sensor Networks," in *Proc. IEEE WCNC 2003*, Vol. 3, Mar. 2003, pp. 1923-1929.

[24] F. Ye, S. Lu and L. Zhang, "Gradient Broadcast: A Robust, Longlived Sensor Network," http://irl.cs.ucla.edu/papers/grab-techreports. ps, 2001

[25] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker and D. Estrin, "Highly-Resilient Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks," *ACM Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 5, No. 4, Oct. 2001.

[26] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for sensor Networks," in *Proc. ACM WSNA 2002*, Sep. 2002, pp. 22-29.

[27] K. Langendoen, G. Halkes, "Energy-efficient Medium Access Control," Delft University of Technology in

Netherlands, http://www.isa.ewi.tudelft.nl/~koen/papers/MAC-chapter.pdf

[28] A. J. Goldsmith and S. B. Wicker, "Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 9, No. 4, Aug. 2002, pp. 8-27.

[29] R. Madan, S. Cui, S. Lall and A. J. Goldsmith, "Cross Layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks," submitted to *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004 (available at http://wsl.stanford.edu/ Publications.html).

[30] T. ElBatt and A. Ephremides, "Joint scheduling and power control for wireless ad hoc networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, Jan. 2004, pp. 74-85.

[31] R. Cruz and A. Santhanam, "Optimal routing, link scheduling and power control in multi-hop wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2003*, Vol. 1, Mar. 2003, pp. 702-711.

[32] U. Kozat, I. Koutsopoulos and L. Tassiulas, "A framework for Cross Layer design of energy-efficient Communication with QoS provisioning in multi-hop wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2004*, Vol. 2, Mar. 2004, pp. 1446-1456.

[33] R. Bhatia and M. Kodialam, "On power efficient communication over multi-hop wireless Networks: Joint routing, scheduling and power control," in *Proc. IEEE INFOCOM 2004*, Vol. 2, Mar. 2004, pp. 1457-1466.

[34] Safwati A., Hassanein H., Mouftah H., "Optimal cross-layer designs for energy-efficient wireless ad hoc and sensor networks," in *Proc. IEEE IPCCC 2003*, Apr. 2003, pp. 123-128.

[35] S. Cui, A. J. Goldsmith and A. Bahai, "Joint modulation and multiple access optimization under energy constraints," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2004*, Vol. 4, May 2004, pp. 2805-2811.

[36] S. Cui, R. Madan, S. Lall and A. J. Goldsmith, "Joint routing, MAC and link layer optimization in sensor networks with energy constraints," submitted to *IEEE ICC 2005*, South Korea, May 2005 (available at http://wsl.stanford.edu/Publications.html).

[37] S. Cui, A. Goldsmith and A. Bahai, "Energy-constrained Modulation Optimization for Coded Systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2003*, Vol. 1, Dec. 2003, pp. 372-376.

[38] S. Cui, A. Goldsmith and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in ensor Networks," *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, Vol. 22, No. 6, Aug. 2004, pp. 1089-1098.

[39] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN), IEEE Standard 802.15.1TM, Apr. 2002.

[40] http://www.bluetooth.org

[41] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN), IEEE Standard 802.15.4TM, Oct. 2003.

[42] http://www.zigbee.org

[43] http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html

[44] http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html

[45] 이형수,"유비쿼터스를 위한 UWB기술 개요", *전파*, 제113호, 2003년 9~10월호.

[46] 이재현,"USN 기술동향", *ITFIND-주간기술동향*, 통권 1165호, 2004. 9. 29.

[47] 표철식, 채종석,"RFID 기술 및 표준화 동향", *TTA 저널*, 제 95호, pp. 37-47.

황 호 영
(Ho Young Hwang)

2000. 2: 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
2002. 2: 한국과학기술원 전자전산학과 석사
2002. 3 ~ 현재: 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
관심분야: 차세대 이동통신, Mobile IP, 이동성관리
E-mail: hyhwang@cnr.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-869-5439
Fax: +82-42-864-3830

김 민 정
(Min Jeong Kim)

2004. 2: 한국과학기술원 전자전산학과 학사
2004. 3 ~ 현재: 한국과학기술원 전자전산학과 석사과정
관심분야: 유무선 인터넷, UWB 무선 통신
E-mail: mjkim@cnr.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-869-5439
Fax: +82-42-864-3830

정 윤 원
(Yun Won Chung)

1995. 2: 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
1997. 2: 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
2001. 8: 한국과학기술원 전자전산학과 박사
2001. 10 ~ 2002. 12: 영국 런던대학(King's College London) Visiting Post-doctoral Research Fellow
2003. 1 ~ 현재: 한국전자통신연구원 IP이동성연구팀 연구원
관심분야: 이동통신망, Mobile IP, 이동성관리
E-mail: yun.chung@etri.re.kr
Tel: +82-42-860-5244
Fax: +82-42-860-5471

정 창 용
(Chang Yong Jung)

2000. 2: 한양대학교 수학과 학사
2002. 2: 한국과학기술원 전자전산학과 석사
2002. 3 ~ 현재: 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
관심분야: 차세대 이동통신, UWB 무선 통신
E-mail: cyjung@cnr.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-869-5439
Fax: +82-42-864-3830

권 재 균
(Jae Kyun Kwon)

1996. 2: 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
1998. 2: 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
2003. 8: 한국과학기술원 전자전산학과 박사
2003. 8 ~ 현재: 한국전자통신연구원 무선전송방식 연구팀 선임연구원
2004. 10 ~ 현재: 차세대 이동통신(NGMC) 포럼 무선접속 실무반 간사
관심분야: 차세대 이동통신, 셀간간섭 관리, 무선접속
E-mail: jack@etri.re.kr
Tel: +82-42-860-6759
Fax: +82-42-860-6732

성 단 근
(Dan Keun Sung)

1975. 2: 서울대학교 전자공학과 학사
1982. 8: 텍사스 주립대학 전기 및 컴퓨터 공학과 석사
1986. 5: 텍사스 주립대학 전기 및 컴퓨터 공학과 박사
1977 ~ 1980: 한국전자통신연구원 전임연구원
1993 ~ 1994: 정보통신진흥원 교환관리위원
1996 ~ 1999: 위성연구센터 소장
1986 ~ 현재: 한국과학기술원 전자전산학과 교수
2000 ~ 현재: JCN 국제저널 편집위원
2002 ~ 현재: IEEE Communications Magazine 편집위원
2003 ~ 2005: IEEE ICC 2005(Seoul), TPC Vice-Chair, General Conference Chair
2003 ~ 2004: JCCI 학술대회 조정위원장
관심분야: 차세대 이동통신망, 멀티서비스 교환, 유무선 인터넷 망, 트래픽 제어기술, Ad hoc 통신망, UWB 네트워킹 기술
E-mail: dksung@ee.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-869-3439
Fax: +82-42-869-3410