

## 사물인터넷을 위한 라우팅과 매체접근제어의 상호작용

박관근\*

### Routing and Medium Access Control Interactions for Internet of Things

Pangun Park\*

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyoung, 650-160, Korea

#### 요 약

무선 MAC (Medium Access Control)과 라우팅 기술은 사물인터넷의 핵심 네트워크 기술 요소로서, 최근 이와 관련된 집중적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 사물인터넷을 위한 새로운 표준이 제안되고, 다른 네트워크 관련 기술들이 패치되면서, 이러한 네트워크의 성능을 평가하는 방식은 명확하지 않다. 본 연구에서는 사물인터넷을 위한 최근의 MAC과 라우팅 프로토콜 기술을 분석 정리하고, 이들 간의 상호작용에 대하여 설명하였다. 특히, 현재 많은 사물인터넷 관련 분야에서 고려되고 있는 IEEE 802.15.4 MAC과 RPL (Routing Protocol for Low-power Lossy Network) 라우팅 프로토콜의 기술을 설명하고 이들 간의 상호작용에 대하여 설명하였다. 이러한 분석에 따라 경쟁 기반의 MAC 프로토콜의 경우 라우팅의 성능에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 MAC과 라우팅 관련 시스템 파라미터를 최적화할 수 있는 모델링을 제시하였다.

#### ABSTRACT

Wireless Medium Access Control (MAC) and routing technologies are the basic building blocks making it possible the Internet of Things (IoT). These technologies have been the focus of substantial research in the last decade. Nevertheless, as new networking standards for IoT are being proposed and different solutions are patched together, evaluating the performance of the network becomes unclear. In this paper, a new overview of MAC and routing protocols for IoT and new interactions are given. The IEEE 802.15.4 MAC and Routing Protocol for Low-power Lossy Network (RPL) routing protocols are taken as reference to exemplify and illustrate the discussion. Experimental results show that contention-based access MACs may hurt the routing, unless these two are carefully designed together.

**키워드** : 사물인터넷, 무선 통신, 매체접근제어, 라우팅

**Key word** : Internet of Things, Wireless Communication, Medium Access Control, Routing

Received 27 August 2015, Revised 15 September 2015, Accepted 30 September 2015

\* Corresponding Author Pangun Park (E-mail: pgpark@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9173)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyoung 650-160, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.10.2465>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

사물인터넷은 수많은 물리적인 물체들이 무선 네트워크를 통하여 인터넷에 연결되는 시스템을 말한다. 이러한 기술은 빌딩, 산업 자동화 시스템, 건강 관리, 스마트 그리드, 보안 등과 관련된 매우 다양한 응용에 적용될 수 있다[1, 2]. 기존에 사용되던 인터넷 관련 무선 네트워크 프로토콜 기술이 이러한 사물인터넷에 적용될 수는 있으나, 관련 응용의 영역이 매우 다양해짐에 따라 기술적 적용에 많은 한계를 표출하게 되었다. 특히, 이러한 사물인터넷의 요구 사항을 고려하여 다양한 MAC (Medium Access Control)과 라우팅 기술이 제안되고 있다. 예를 들어, 저전력 요구 사항을 갖는 사물인터넷 응용에서는 물리 또는 매체접근제어 계층으로 IEEE 802.15.4 표준 또는 이와 관련된 확장 버전을 사용하고 있다[3].

빌딩 및 산업 자동화 시스템과 응용 분야에서는 ZigBee, WirelessHART와 같은 IEEE 802.15.4 표준에 기반한 네트워크 기술을 사용하고 있다. 최근의 시장 조사에서는 이러한 관련 표준이 빌딩 및 산업 자동화 시스템 시장의 약 50%를 차지하고 있음을 보이고 있다 [1]. 이와는 대조적으로 라우팅 프로토콜 기술은 아직까지 지배적인 해결책이 없는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 IETF (Internet Engineering Task Force)는 IEEE 802.15.4 MAC에 기반하여 라우팅 프로토콜의 표준화 작업을 진행하고 있다.

무선 MAC과 라우팅 프로토콜이 사물인터넷의 다양한 네트워크 요구 사항과 계층간 상호 운용 가능성 및 표준화 요구를 동시에 만족시키는 것은 매우 중요한 과제이다[4]. 특히, 고성능의 요구사항을 필요로 하는 크리티컬한 사물인터넷의 응용에 있어서는 이러한 MAC과 라우팅 계층의 복잡한 상호작용이 심도 있게 고려되어야 하며, 기존의 계층 분리형 연구 개발로는 많은 성능적 한계를 가질 수밖에 없다[5]. 예를 들어, 사물인터넷이 제어 시스템에 적용될 시, 전체 제어 시스템의 안정성을 보장할 수 있도록 소스 노드의 정보가 목적 노드에 원활하게 전달되어야 한다. 따라서, 무선 네트워크의 신뢰도, 지연, 전력 소모와 같은 성능치가 심도 있게 고려되어야 한다. 이러한 다양한 성능 요구 조건을 만족시키기 위하여 네트워크 계층 간의 상호 작용에 관한 근본적인 고려가 필수적이다.

본 연구는 3가지 핵심 내용을 포함한다. (1) 사물인터넷을 위한 무선 MAC과 라우팅 프로토콜의 장/단점과 특징에 따른 고려 요소 검토 (2) 사물인터넷의 무선 네트워크로 최근 많이 고려중인 IEEE 802.15.4 MAC 표준과 IETF RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks) 프로토콜 기술 설명, (3) MAC과 라우팅 계층의 상호작용에 관한 분석 방안을 제시한다.

## II. MAC과 라우팅의 상호작용

그림 1은 MAC과 라우팅 계층 간의 상호 연관성을 블록 다이어그램을 통하여 표현하고 있다. 응용 계층의 전체 토폴로지 정보와 노드의 트래픽 생성량과 같은 정보는 전체 시스템의 입력 정보가 된다.

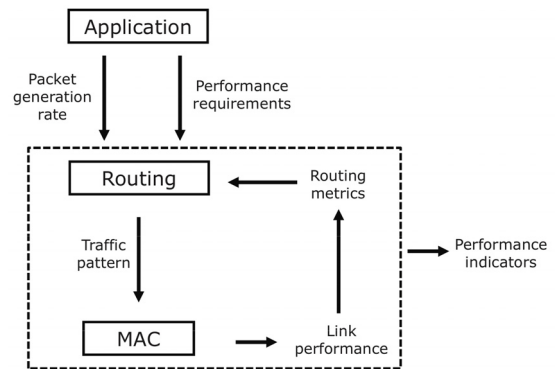


그림 1. MAC과 라우팅 계층의 상호작용에 기반한 모델링 및 설계  
Fig. 1 MAC and routing interaction for modeling and design

네트워크 라우팅 관리자는 이러한 시스템 입력 정보와 라우팅 성능 메트릭을 고려하여 네트워크의 노드에 트래픽을 분산하고 데이터 패킷을 전달하는 역할을 한다. 일반적인 라우팅 성능 메트릭은 단대단간의 신뢰도, 전송 지연 시간, 전체적인 네트워크 에너지 소모 등과 같다. 다양한 MAC 프로토콜이 각 링크별로 다른 신뢰도, 지연, 에너지 소모, 트래픽 혼잡도를 보이므로, 이러한 라우팅 성능 메트릭은 MAC 기술의 영향을 직접적으로 받는다. 따라서 그림 1과 같은 피드백 루프에서 MAC과 라우팅 계층 기술이 독립적으로 설계됐을 경우, 신뢰성, 지연과 같은 다양한 요구사항을 동시에 만족시키기 어렵다.

표 1. 사물인터넷을 위한 MAC 프로토콜의 요소별 비교  
Table. 1 MAC protocol categorization and comparison for IoT.

	Complexity	Flexibility	Energy Efficiency	Throughput	Understanding
Schedule	High complexity and high cost for scheduling algorithms. Collision free schedules infeasible for huge networks.	Low adaptability for dynamic topologies.	High energy efficiency for periodic traffic and network topologies. Overhead due to time synchronization and clock drifting.	High throughput since no collisions and no overhearing.	Good understanding.
Contention	Low complexity.	High flexibility.	Tradeoff between the receiving cost of idle listening and transmission cost of longer preamble. Non-trivial determination of the optimal check interval.	Low throughput when traffic load and check interval increase due to high contentions.	Some investigations for preamble sampling protocols.
Hybrid	Medium complexity.	High flexibility.	Tradeoff between idle listening and collisions. Optimal size of active period is a function of traffic load, network topology, and hardware specifications.	High throughput.	Complex due to the coexistence of the stochastic behavior and the deterministic behavior.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 새로운 성능 메트릭을 정의할 시 MAC과 라우팅의 시스템 파라미터 및 성능과의 상호관계를 분석해야 하며, 이러한 분석을 통하여 그림 1과 같이 전체적인 네트워크 시스템의 성능을 최적화 할 수 있다. 최적화 방법과 관련된 부분은 다음의 3.2 절과 5장에서 서술하였다.

### III. MAC 프로토콜

MAC 프로토콜은 무선 채널을 통하여 패킷이 전송되는 시간, 주파수 등을 관리한다. 본 연구에서는 사물인터넷을 위하여 다양한 MAC 프로토콜을 접근 방식에 따라 크게 3가지 방식: 스케줄링 기반, 경쟁 기반, 하이브리드 기반 방식으로 분류 하였다.

#### 3.1. MAC 분류

스케줄링 기반의 MAC 프로토콜은 기본적으로 시간을 슬롯 단위로 나누어 동작한다. 각 노드는 할당된 슬롯에서 활성화 되어, 무선 채널에 패킷을 전송 또는 수신하게 되며, 이외의 다른 시간 슬롯에서는 수면 모드로 들어가게 된다. 많은 스케줄링 기반 MAC 프로토콜은 TDMA (Time Division Multiple Access)와 FDMA (Frequency Division Multiple Access)의 혼합된 형태를

보인다. 스케줄링 MAC 프로토콜의 가장 큰 장점은 스케줄링이 정해지면 패킷 충돌, *overlistening* 등의 문제를 최소화 할 수 있다는 것이다. 또한, 높은 트래픽의 상황에서 경쟁 기반의 MAC 프로토콜보다 향상된 전송 지연, 공평도, 전송률을 보인다. 그러나 간섭을 최소화 할 수 있는 스케줄링 기법은 전체적인 네트워크 토폴로지 정보에 기반하기 때문에 설계 및 구현의 복잡도가 높다고 할 수 있다. 표 1에서는 사물인터넷을 위한 다양한 MAC 프로토콜의 장/단점을 비교 검토하였다.

경쟁 기반의 MAC 프로토콜은 스케줄링 기반의 방식과는 다르게, 중앙 집중적 스케줄러 관리자가 존재하지 않는다. 따라서 경쟁 기반 MAC 프로토콜은 전체 네트워크의 시간 동기화 또는 토폴로지 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 기존의 경쟁 기반 MAC 프로토콜은 에너지 효율성 문제로 인하여 사물인터넷에 바로 적용하는 데는 기술적 한계성을 갖고 있다. 이러한 에너지 효율성 문제를 해결하기 위하여 LPL (Low Power Listening)이라는 preamble 샘플링 기반의 기술이 제시되었다 [6]. 기본적으로 각 노드는 대부분의 시간을 수면 모드로 유지하다가, 채널 모니터링 주기마다 활성화 되어 노드에 전달되는 패킷 전송이 있는지를 확인한다. 이러한 방식은 트래픽이 매우 낮은 응용 분야에 있어서 에너지 효율성을 높일 수 있는 기술이라고 할 수 있다.

마지막으로 하이브리드 기반 MAC 프로토콜은 경쟁 기반의 랜덤 접근 방식과 스케줄링 기반의 MAC 프로토콜의 장점을 결합한 형태이다. 이러한 MAC 프로토콜은 경쟁 기반 또는 스케줄링 기반의 프로토콜을 어떻게 결합하느냐에 따라 경쟁을 위한 예약 접근 방식과 분할 접근 메커니즘으로 나누어 볼 수 있다.

### 3.2. MAC 엔진

주어진 네트워크의 성능 요구 조건을 고려하여, 이러한 다양한 종류의 MAC 프로토콜을 선택하는 것은 매우 중요한 성능 최적화 문제라고 할 수 있다. MAC 프로토콜 엔진은 다양한 종류의 MAC 프로토콜 라이브러리를 포함하며, 응용의 요구사항에 따라 프로토콜의 파라미터를 최적화한다. 엔진은 기본적으로 네트워크 토폴로지, 트래픽 로드와 같은 정보 및 신뢰도, 지연, 에너지 소모와 같은 응용의 요구 사항과 하드웨어 자원의 제한 요소 등을 입력으로 받아들인다. MAC 엔진은 이러한 제한 요소와 요구사항을 고려하여, 프로토콜을 선택하고 파라미터를 최적화하여 성능을 개선한다. 이러한 최적화 단계의 핵심 기술은 네트워크 성능과 관련된 수학적 모델링이라고 할 수 있다.

### 3.3. IEEE 802.15.4 MAC

본 절에서는 저전력과 저전송률을 필요로 하는 사물 인터넷 응용의 무선 네트워크에서 물리 계층과 MAC 계층을 포함하는 IEEE 802.15.4 표준의 경쟁 기반 slotted CSMA/CA 방식에 대하여 설명하고자 한다. 참고로, IEEE 802.15.4 MAC은 두 가지 접근 제어를 정의하는데, 경쟁 기반의 unslotted CSMA/CA 방식과 slotted CSMA/CA 와 GTS (Guaranteed Time Slot) 할당 방식을 포함하는 하이브리드 기반의 beacon-enabled 모드를 포함한다.

#### 3.3.1. Slotted CSMA/CA 모드

Slotted CSMA/CA 방식으로 패킷을 전송하려고 할 때, 각 노드는 MAC 계층의 backoffs의 수 NB, 경쟁 window 길이 CW, backoff exponent BE와 재전송 수 RT와 같은 4가지 파라미터를 초기화 한다.

MAC 계층은  $[0, 2^{BE} - 1]$  units aUnitBackoff-Period 사이의 랜덤 수를 생성하고 이렇게 생성된 backoff 시간이 끝날 때까지 대기한다.

Backoff 시간이 완료되면, 노드는 CCA(Clear Channel Assessment)를 통하여 채널 상태를 모니터링 한다. 만약 CCA가 idle 상태이면, 노드는 패킷을 전송하기 시작하고, 채널 상태가 busy 상태가 되어 CCA가 실패하면, MAC은 NB와 BE를 최대 값인 macMaxCSMABackoffs 과 macMaxBE 값까지 한 개씩 증가 시킨다. 만약 BE 값이 macMaxBE에 다다르면, 리셋이 될 때 까지 최대값을 유지한다. 만약 NB 값이 macMaxCSMABackoffs 보다 크면, 패킷은 채널 접근 실패로 버려진다. 그렇지 않다면 CSMA/CA 알고리즘이 backoff와 관련한 랜덤 수를 재생하고, 프로세스를 반복한다. 노드의 채널 접근이 성공하면, 패킷을 전송하고 ACK 메시지를 수신하기 위하여 대기한다. 전송된 패킷에 상응하는 ACK를 수신하면, 패킷이 성공적으로 전송됐다고 볼 수 있다. 만약 패킷 충돌이나, ACK timeout 동안에 패킷을 받지 못하면, RT 변수는 최대값 macMaxFrameRetries 까지 하나씩 증가한다. 만약 RT 값이 macMaxFrameRetries 보다 작으면, MAC은 BE=macMinBE 로 초기화 하고, 채널 재접근을 위하여 CSMA/CA를 반복한다. 본 연구에서는 IEEE 802.15.4 파라미터를  $m_0 = \text{macMinBE}$ ,  $m_b = \text{macMaxBE}$ ,  $m = \text{macMaxCSMABackoffs}$ ,  $n = \text{macMaxFrameRetries}$ 로 표현한다.

#### 3.3.2. 성능 및 문제점

IEEE 802.15.4 프로토콜은 Contiki OS를 통하여 TelosB에 구현 되었다. 전체적인 시스템은 N개의 노드가 coordinator에 데이터 패킷을 전송하는 스타 토폴로지 형태로 성능치를 측정하였다. 각각의 노드는 패킷을 성공적으로 전송하거나, 폐기 또는 샘플링 주기가 끝날 때 마다  $1-q$  확률로 새로운 패킷을 생성한다. 확률  $q$ 로 패킷을 생성하지 않을 시, 노드는  $L_0 S_b$  시간 동안에 패킷을 생성하지 않고 대기한다. 여기에서  $L_0$ 는 정수이고,  $S_b$ 는 aUnitBackoff-Period 시간 유닛으로 20 symbols의 값을 갖는다.

그림 2와 3은 다양한 MAC 파라미터와 트래픽 로드  $q=0.3, 0.5, 0.7$ 에 따라 신뢰도 및 평균 전송 지연 시간과 같은 성능 측정치와 제시된 모델[7, 8]의 성능 예측치를 비교하고 있다. 제시된 이론적 모델은 3차원 Markov Chain을 통하여 신뢰성, 지연, 전력 소모 모델을 제공한다. 3.2.1 절에서 설명하였듯이 MAC 파라미터  $m_0$ 는 최초의 Backoff 시간과 관련되어 있는 파라미

터이다.

수직바는 각  $2 \times 10^5$  시간 유닛 동안에 총 5회의 실험 데이터 값을 분석한 표준편차를 표현하고 있다. 먼저, 제시된 이론적인 모델은 실험 데이터 값을 잘 예측하고 있다. 신뢰도와 평균 지연 시간의 오차는 약 0.993%, 3.155%를 보이고 있다. 또한, 신뢰도는 MAC 파라미터  $m_0$ 가 증가 할수록 빠르게 향상 되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 3에서 평균 지연 시간은 트래픽이 높아질수록 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 패킷 전송 충돌 확률이 상승하기 때문이다. 평균 지연 시간은  $m_0$ 가 증가 할수록, 기하급수적으로 높아지는 것을 확인 할 수 있으며, 따라서  $m_0$ 는 전송 지연 시간에 영향을 주는 핵심 파라미터라고 할 수 있다. 또한, 그림 2와 3을 통하여 MAC 파라미터에 따라 네트워크의 성능이 좌우되는 것을 알 수 있다. 예를 들어,  $m_0$  값이 작을수록 지연 시간을 줄 일 수 있으나, 신뢰성이 10% 미만으로 안정성을 보장 할 수 없다.

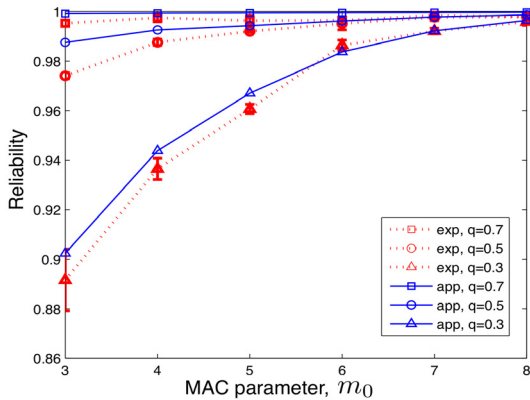


그림 2. 신뢰도,  $m_0 = 3, \dots, 8, m_b = 8, m = 4, n = 1$   
 Fig. 2 Reliability,  $m_0 = 3, \dots, 8, m_b = 8, m = 4, n = 1$

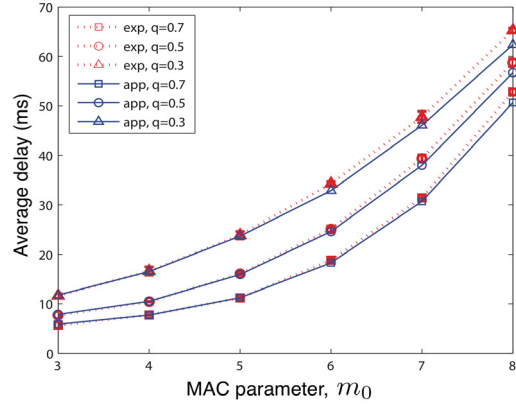


그림 3. 지연,  $m_0 = 3, \dots, 8, m_b = 8, m = 4, n = 1$   
 Fig. 3 Average delay,  $m_0 = 3, \dots, 8, m_b = 8, m = 4,$

#### IV. 라우팅 프로토콜

표 2는 사물인터넷을 위한 라우팅 프로토콜을 크게 3 가지 (i) Topology aware, (ii) Content aware, (iii) Location aware로 분류하고 있으며, 각 그룹별 장/단점을 요약하고 있다. IETF의 IPv6 라우팅 프로토콜 표준인 RPL (Routing Protocol for Low-power Lossy Network)에서 제시하는 것과 같이 기존의 라우팅 프로토콜을 사물인터넷에 적용하는 데는 많은 기술적 한계를 갖고 있다 [2]. 각 응용 영역의 요구 사항에 기반한 IETF의 사물인터넷을 위한 라우팅 기술 지침은 다음과 같다.

- 노드의 라우팅 상태 정보는 네트워크 내부 또는 이웃 노드 수에 선형적으로 증가해서는 안된다.
- 두 노드 사이의 링크 문제와 같이 부분적인 문제로 인하여 전체 네트워크에 브로드캐스트 메시지가 플러딩되어서는 안된다.

표 2. 사물인터넷을 위한 라우팅 프로토콜 분류  
 Table. 2 Routing Classifications for IoT.

Topology Aware	Global network information to route packets. Routing tables computed off-line and/or updated runtime. The optimization metric is the number of hops.
	Pros: scalable, widely available. Cons: energy inefficient due to network flooding.
Content Aware	Data centric approach, routing is based on application data information.
	Pros: energy efficient. Cons: sensitive to the traffic pattern.
Location Aware	Routing based on positioning. Nodes know their own and their neighbors position.
	Pros: low computation and overhead. Cons: localization critical, might be inaccurate indoor.

어떠한 기존의 IP 라우팅 프로토콜도 상위의 모든 조건을 만족 시킬 수는 없다. 따라서 IETF는 저전력 네트워크를 위한 새로운 라우팅 프로토콜의 개발을 진행하게 되었으며, 이러한 프로토콜을 IPv6 RPL 이라고 명하게 되었다.

본 절에서는 사물인터넷의 네트워크 라우팅에 적용될 RPL에 대하여 설명한다. RPL의 가장 큰 특징은 라우팅 프로토콜의 최적화 메트릭에 따른 DODAGs (Destination Oriented Directed Acyclic Graphs)이라 불리는 그래프의 생성이라고 할 수 있다. 한 개 또는 그 이상의 루트 노드에서 시작되는 또는 끝나는 그래프의 패스는 edge로 구성된다. RPL instance는 같은 성능 메트릭 또는 조건을 가지는 한 개 또는 그 이상의 DODAG을 의미하며, 네트워크는 동시에 여러 개의 DODAG을 구동시킬 수 있다.

DODAG 내의 각 노드는 랭크라는 상수값으로 표현되어 DODAG 루트 또는 다른 노드에 대하여 상대적인 위치를 표현한다. 랭크는 물리적인 유닛의 의미를 가지지는 않으며, 루트로부터 리프 노드로 단조적으로 그 값이 상승하며, 루트로 향하거나 루트로부터의 방향을 검증하는데 사용된다. 랭크의 계산은 OF (Objective Function)에 따라 다르나, 패스의 값을 의미할 필요는 없다. RPL은 DAGrank()으로부터 계산된 정수 값 부분만을 사용하는데 이는 MinHopRankIncrease 파라미터를 통하여 네트워크의 최대 홉 수 만큼 커질 수 있다. Rank는 루프를 회피하거나 탐지하는데도 사용될 수 있는데, 루프 회피 기법은 네트워크의 노드들이 부모 노드를 선택 할 시 낮은 rank의 노드만을 선택 할 수 있게 하여 만들 수 있다.

RPL 노드는 주기적으로 이웃 노드에 멀티캐스팅 DIO (DODAG Information Object) 메시지를 보내고 이에 기반하여 DODAG를 생성하고 유지한다. DIO 메시지는 다른 정보와 더불어 노드의 랭크 정보를 포함한다. DODAG에 합류하기 위하여, 각 노드는 이웃 노드에게 DIO 메시지를 송신하고, DODAG의 서브셋 안에서 부모 노드를 선택한다. 또한, 각 노드는 같은 랭크를 가지는 이웃 노드의 sibling을 파악하고 추적하기도 한다. 각 노드는 하나의 최우선 순위 부모 노드를 선택 할 수 있다. 노드의 랭크는 우선순위 부모 노드의 랭크와 관련 노드와의 링크 상태 값과의 함수로 나타낸다. RPL에서는 패스 계산과 패킷 전송에 있어서 다양한 성능 메트

릭과 제한 사항이 고려 될 수 있다. 프로토콜은 링크 신뢰도, 패킷 지연, 노드 에너지 소모 등과 같은 정적 또는 동적인 성능 메트릭을 동시에 고려 할 수 있다. 예를 들어, ETX (Expected Transmissions Count)는 노드가 목적 노드에 성공적으로 패킷을 전송하기 위한 평균 전송 횟수를 의미하며, 성능 모니터링 파라미터에 포함 될 수 있다.

## V. MAC과 라우팅간의 상호작용

본 장에서는 MAC과 라우팅 계층 간의 상호 작용에 관한 모델링을 설명하고자 한다. 특히, 무선 네트워크는 IEEE 802.15.4 slotted MAC과 IETF RPL을 고려 하는 것과 같이, 일반적인 네트워크에도 적용이 가능하다.

먼저 목적 노드  $j$ 와 목적 노드의 이웃 노드를  $\Omega_j$ 라고 정의하며,  $Q_j$ 는 주위 노드에서 생성 또는 다른 노드에서 생성된 데이터가 전달되는 트래픽 로드를 의미한다.  $\lambda$ 는 네트워크의 모든 노드에서 생성되는 트래픽의 생성률 벡터이며,  $\lambda_j$ 는 노드  $j$ 가 자체 생성한 트래픽과 노드  $j$ 와 관련된 children  $\Delta_j$ 에서 생성된 모든 트래픽의 합을 의미한다. RPL의 특성을 고려하여,  $\pi_{i,j}$ 는 노드  $i$ 와  $j$  사이의 링크 관련 성능치로 정의한다. 무선의 물리적인 불확실성으로 인하여 각 링크는 신뢰도와 지연 성능에 영향을 줄 수 있으며, 이와 관련하여 라우팅 메트릭이 업데이트 된다. 이러한 동적인 상태 변화는 수학적 모델을 통하여 고려될 수 있다. RPL의 패스 선택은  $(N+1) \times (N+1)$  사이즈의 행렬  $M$ 으로 나타낼 수 있으며, 각 요소  $M_{i,j}$ 는 가능한 수신 노드 세트  $\Gamma_i$  중에서 링크  $l = (i,j)$ 가 갖는 가장 높은 확률 값을 의미하며 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$M_{i,j} = \Pr [\pi_{i,j} = \max_{h \in \Gamma_i} \pi_{i,h}]. \quad (1)$$

네트워크 상에서의 라우팅을 통한 트래픽 분산은 행렬  $M$ 을 각 링크의 성공적인 패킷 전송 확률로 스케일링 한 후 모델링이 가능하다. 따라서 행렬의 각 요소가  $T_{i,j} = M_{i,j}R_l$ 인 행렬  $T$ 를 정의 할 수 있으며, 여기에서  $R_l$ 은 링크  $l = (i,j)$ 의 모델을 통하여 예측된 신뢰도 값을 의미한다. 따라서 전체적인 Flow balance 방정식은

다음과 같다.

$$Q = QT + \lambda. \quad (2)$$

각 노드의 트래픽 생성률은  $Q = [0, Q_1, \dots, Q_N]$ 이며, 식 (2)는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$Q(I - T) = \lambda \quad (3)$$

여기에서  $I$ 는  $T$ 와 사이즈가 같은 단위행렬을 의미한다. 정적인 상태에서  $Q$  값은 다음과 같다.

$$Q = \lambda [I - T]^{-1}. \quad (4)$$

식(4)은 트래픽 생성률  $q_i$ , 행렬  $M$ 을 통한 라우팅 영향, 신뢰성  $R_i$ 을 통한 MAC 계층 등의 상호관계를 포함하고 있다. 기존의 신뢰성 모델[9]을 식(4)에 대입 했을 때, 네트워크 상에서의 트래픽 분산 모델을 확인 할 수 있다. 마지막으로, 단대단 신뢰성은 관련된 모든 패스의 링크 신뢰도의 곱으로 표현 가능하며, 단대단 지연은 송신기부터 루트 노드까지의 모든 패스와 관련된 지연의 합으로 정의 될 수 있다. 3.2.3 절에서 확인 할 수 있듯이 경쟁 기반의 MAC 파라미터는 각 링크의 신뢰도 및 지연 성능에 막대한 영향을 줄 수 있다. 이러한 링크의 성능은 결국 라우팅 계층의 단대단 성능과 직결되므로 계층별 성능 파라미터를 제안된 모델을 통하여 최적화 한다. 주요 최적화 문제는 주어진 지연 요구 조건을 만족 시키면서 신뢰성을 최대화하는 제약 조건 최적화를 고려 할 수 있다.

## VI. 결 론

본 연구에서는 사물인터넷에 적용 가능한 최근의 MAC과 라우팅 프로토콜을 분석 정리하고, 상호작용 모델을 제시하였다. 특히, IEEE 802.15.4 MAC과 RPL 라우팅 프로토콜을 대표적인 예로 분석하였으며, 이에 기반한 성능 모델링 기법을 제시하였다. 경쟁 기반의 MAC 프로토콜의 경우 라우팅의 성능에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 성능 파라미터를 최적화 할 수 있는 수학적 모델링 기법을 사용하였다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the fund for new research foundation program of Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University.

## REFERENCES

- [1] WSN for Smart Industries: A Market Dynamics Report, OnWorld, 2007, <http://www.onworld.com/smartindustries/index.html>.
- [2] Routing Over Low power and Lossy networks, Internet Engineering Task Force (IETF), <http://www.ietf.org/dyn/wg/charter/roll-charter.html>.
- [3] IEEE 802.15.4 standard: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, *IEEE*, 2006, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- [4] P. Park, H. Khadilkar, H. Balakrishnan, and C. Tomlin, High Confidence Networked Control for Next Generation Air Transportation Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, no. 12, pp. 3357-3372, 2014.
- [5] P. Park, "Traffic Generation Rate Control of Wireless Sensor and Actuator Networks," *IEEE Communications Letters*, vol.19, no.5, pp.827-830, 2015.
- [6] J. L. Hill and D. Culler, "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks," *IEEE Micro*, vol. 22, no. 6, pp. 12-24, 2002.
- [7] P. Park, P. Di Marco, C. Fischione, and K. H. Johansson, Modeling and Optimization of the IEEE 802.15.4 Protocol for Reliable and Timely Communications, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 550-564, 2013.
- [8] P. Park, P. Di Marco, P. Soldati, C. Fischione, and K. H. Johansson, "A Generalized Markov Chain Model For Effective Analysis of Slotted IEEE 802.15.4," *IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, 2009.
- [9] P. Di Marco, P. Park, C. Fischione, and K. H. Johansson, Analytical Modelling of Multi-hop IEEE 802.15.4 Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, pp. 3191-3208, 2012.



**박판근(Pangun Park)**

2005년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
2007년 11월: Royal Institute of Technology 무선시스템공학과 (공학석사)  
2011년 3월: Royal Institute of Technology 통신시스템공학과 (공학박사)  
2011년 9월 ~ 2013년 8월: University of California, Berkeley 박사후 연구원  
2013년 9월 ~ 2015년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원  
2015년 3월 ~ 현재: 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
※ 관심분야 : 사물인터넷, 사이버물리시스템, 네트워크시스템