

논문 2016-53-6-4

무선 수동형 센서 망을 위한 경합형 MAC 방식의 최적 설계

(Optimal Design of Contending-type MAC Scheme for Wireless Passive Sensor Networks)

최 천 원*, 서 희 원**

(Cheon Won Choi[Ⓢ] and Heewon Seo)

요 약

별도의 RF 소스가 센서 노드에게 에너지를 공급하는 무선 수동형 센서 망은 배터리 없이 영원히 동작할 수 있는 망이다. 그러나 영원한 수명에 대한 기대와 달리 무선 수동형 센서 망은 아직 에너지의 희소성, 에너지 수신과 데이터 전송의 동시불가능성, 자원 활용의 비효율성 등 많은 문제를 안고 있다. 본 논문에서는 패킷 상실에는 관대하지만 패킷의 적시 전달을 요구하는 서비스를 제공하는 무선 수동형 센서 망을 다룬다. 이러한 망에서 여러 센서 노드들이 하나의 싱크 노드에게 패킷들을 전달하도록 현실적 제약을 인식하여 framed and slotted ALOHA에 기초한 경합형 MAC 방식을 고려한다. 이어서 지리적으로 흩어져있는 센서 노드들이 전송한 패킷들이 경로 손실을 겪어 결국 capture 현상이 빚어질 때 MAC 방식이 얻을 수 있는 망 전체 throughput을 조사한다. 특히 두 센서 노드만이 망에 있을 때 망 전체 throughput의 정확한 공식을 closed form으로 도출한다. 마지막으로 설계 parameter들을 조절하여 최대의 망 전체 throughput을 취하도록 경합형 MAC 방식을 최적화한다.

Abstract

A wireless passive sensor network is a network which, by letting separate RF sources supply energy to sensor nodes, is able to live an eternal life without batteries. Against expectations about an eternal life, however, a wireless passive sensor network still has many problems; scarcity of energy, non-simultaneity of energy reception and data transmission and inefficiency in resource allocation. In this paper, we focus on a wireless passive sensor network providing a packet service which is tolerable to packet losses but requires timely delivery of packets. Perceiving the practical constraints, we then consider a contending-type MAC scheme, rooted in framed and slotted ALOHA, for supporting many sensor nodes to deliver packets to a sink node. Next, we investigate the network-wide throughput achieved by the MAC scheme when the packets transmitted by geographically scattered sensor nodes experience path losses hence capture phenomena. Especially, we derive an exact formula of network-wide throughput in a closed form when 2 sensor nodes reside in the network. By controlling design parameters, we finally optimize the contending-type MAC scheme as to attain the maximum network-wide throughput.

Keywords : wireless passive sensor network, MAC, framed and slotted ALOHA, capture, throughput

I. 서 론

싱크 노드(sink node)와 센서 노드(sensor node)로 구성되는 무선 센서 망(wireless sensor network)에서

센서 노드는 주변 환경을 감지하고 정보를 수집하여 싱크 노드에게 전송한다. 일반적으로 센서 노드는 내장된 배터리(battery)로부터 에너지를 공급받아 이러한 감지, 수집 그리고 전송을 수행한다. 그러나 무선 센서 망이 흔히 구축되는 환경에서 배터리의 충전이나 교체가 용이하지 않고 따라서 무선 센서 망의 수명은 한정된다. 이러한 이유로 에너지 절감(energy saving)은 무선 센서 망의 설계에서 주요 제약 요소였다^[1].

무선 전력 전송(wireless power transfer)에 대한 관심이 커지면서 무선 전력 전송 기술이 적용된 무선 센서 망인 무선 수동형 센서 망(wireless passive sensor

* 정회원, 단국대학교 응용컴퓨터공학과 (Department of Applied Computer Engineering, Dankook University)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail : cchoi@dku.edu)

** 학생회원, 단국대학교 대학원 컴퓨터학과 (Department of Computer Engineering and Science, Graduate School, Dankook University)

Received : April 1, 2016

Revised : May 10, 2016

Accepted : May 27, 2016

network)이 등장하였다. 무선 수동형 센서 망은 싱크 노드와 센서 노드 외에 별도의 radio frequency 소스(radio frequency source: RF 소스)를 갖고 있고 RF 소스가 방사한 RF 파(wave)를 수신하여 센서 노드가 자신을 구동하기 위한 에너지를 충당토록 한다. 이와 같이 무선 수동형 센서 망은 배터리 없이 영원히 동작할 수 있다^[2-3].

그러나 영원한 수명에 대한 기대와 달리 무선 수동형 센서 망은 아직 성숙하지 못한 기술력 등으로 인해 여러 가지 현실적 문제를 안고 있다. 첫 번째 문제는 에너지의 희소성(scarcity)이다. 무선 수동형 센서 망에서 별도의 RF 소스가 에너지를 공급함에도 불구하고 센서 노드가 사용할 수 있는 에너지는 여전히 희소하다. Friis 방정식^[4]을 통해 대략 가늠할 수 있듯이 RF 소스가 전송하는 에너지에 비해 센서 노드가 수신할 수 있는 에너지는 미약하고 더욱이 RF 소스가 전송할 수 있는 전력은 많은 경우 법적으로 제한된다. 이와 같이 RF 소스로부터 수신한 전력은 자신을 직접 구동시킬 만큼 충분하지 않아 센서 노드는 수신한 전력으로 일단 내부의 캐패시터(capacitor)를 충전한 후 캐패시터에 축적된 에너지로 자신을 구동시켜야 한다. 두 번째 문제는 센서 노드가 에너지의 수신과 데이터의 전송을 동시에 수행할 수 없다는 동시불가능(non-simultaneity)이다. 이로 인해 센서 노드는 일정 시간 동안 RF 소스로부터 수신한 전력으로 캐패시터를 충전한 후에야 싱크 노드와 통신할 수 있고 이러한 충전과 통신을 주기적으로 반복해야 한다. 세 번째 문제는 자원 할당의 비효율성(inefficiency)이다. 센서 노드가 싱크 노드와 통신하는 시간에 비해 센서 노드가 RF 소스로부터 수신한 전력으로 캐패시터를 충전해야 하는 시간은 훨씬 길다. 이렇듯 시간 자원의 극히 일부분만을 통신을 위해 사용하게 되는 비효율성을 감내해야 한다^[1].

무선 수동형 센서 망에서도 물론 센서 노드가 싱크 노드에게 데이터를 전달하도록 지원하는 매체 접근 제어(media access control: MAC) 방식이 필요하다. 특히 앞서 밝힌 현실적 문제가 충분히 고려된 MAC 방식이 요구된다. 예를 들어 에너지의 희소성과 자원 활용의 비효율성으로 인해 무선 수동형 센서 망은 과한 signaling 부하를 감당하기 어렵다. 따라서 싱크 노드는 주위에 얼마나 많은 센서 노드가 포진해 있는지 알기 어렵고 센서 노드의 신원이나 위치 등 정보를 구하기는 더욱 어렵다. 또한 센서 노드 역시 이웃에 얼마나 많은

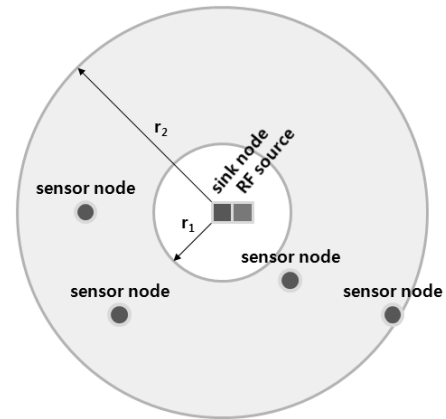


그림 1. 무선 수동형 센서 망의 형태

Fig. 1. Configuration of wireless passive sensor network.

센서 노드가 포진해 있는지 혹은 이들이 데이터를 전송하고 있는지 등에 관한 정보를 얻기 힘들다. 이러한 점에 비추어 스케줄링형(scheduling-type)보다 경합형(contending-type) MAC 방식이 보다 적절하다고 볼 수 있다.

Akan 등은 무선 수동형 센서 망에서 time division multiple access(TDMA) 기반의 방식, 경합(contention) 기반의 방식 그리고 이들의 혼합(hybrid) 방식을 사용할 수 있다고 언급하였으나 방식 자체를 구체적으로 제시하지 않았다^[3]. Choi 등은 무선 수동형 센서 망에서 지연(delay)에 덜 민감한 packet 전달 서비스를 제공하기 위해 slotted ALOHA에 기반한 MAC 방식을 제안하였다^[1].

본 논문에서는 무선 수동형 센서 망에서 패킷의 상실(loss)에는 비교적 관대하지만 패킷의 적시(timely) 전달을 요구하는 서비스를 제공하기 위한 MAC 방식으로 framed and slotted ALOHA^[5]에 기초한 경합형 MAC 방식을 고려한다. 다음 지리적으로 흩어져있는 센서 노드들이 전송한 패킷들이 경로 손실(path loss)을 겪고 마침내 capture 현상^[6]이 빚어질 때 망 전체 throughput을 조사한다. 특히 두 개의 센서 노드가 포진한 경우 정확한(exact) 망 전체(network-wide) throughput의 공식을 closed form으로 유도한다. 마지막으로 throughput 공식과 모의 실험(simulation) 방법을 통해 설계 parameters의 값을 조절하여 최대의 망 전체 throughput을 취할 수 있도록 경합형 MAC 방식을 최적화(optimization)한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 여러 센서 노드들이 하나의 싱크 노드에게 패킷들을 전달하도록 지원하는 경합형 MAC 방식을 설명한다. 3 장에서는 두

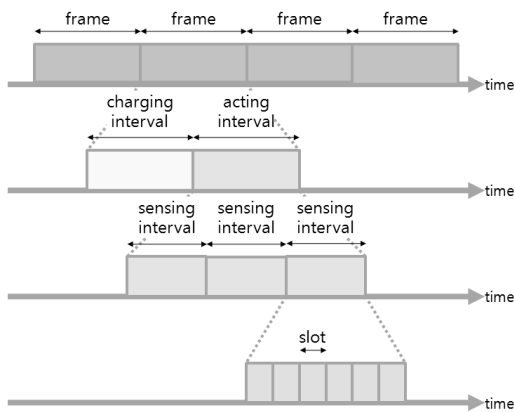


그림 2. 고려하는 MAC 방식의 시간 구조
Fig. 2. Time structure of MAC scheme being considered.

개의 센서 노드가 있는 경우 정확한 망 전체 throughput을 closed form으로 구한다. 4 장에서는 경합형 MAC 방식이 최대의 망 전체 throughput을 얻을 수 있도록 설계 parameter들의 최적의 값을 구한다.

II. 경합형 MAC 방식

본 논문에서 고려하는 무선 수동형 센서 망은 그림 1에 나타난 바와 같이 하나의 싱크 노드, 하나의 RF 소스 그리고 여러 센서 노드들로 구성되어 있다. RF 소스는 싱크 노드와 공재하고 센서 노드들은 싱크 노드 주위에 산재해 있다.

RF 소스는 전방향 안테나(omni-directional antenna)를 갖추고 있으며 이를 이용하여 RF 파를 센서 노드에게 방사한다. 한편 각 센서 노드는 감지 부(sensing unit), 처리 부(processing unit) 그리고 송수신 부(tranceiving unit)로 구성되어 있다. 센서 노드는 전방향 안테나를 이용하여 RF 소스가 방사한 RF 파를 수신하고 이를 직류(direct current: DC)로 변환한 후 내부의 캐패시터를 충전한다. 이어서 캐패시터에 저장된 에너지를 소모하여 감지 부, 처리 부 그리고 송수신 부를 구동한다.

본 논문에서 고려하는 무선 수동형 센서 망은 그림 1에 나타난 바와 같이 하나의 싱크 노드, 하나의 RF 소스 그리고 여러 센서 노드들로 구성되어 있다. RF 소스는 싱크 노드와 공재하고 센서 노드들은 싱크 노드 주위에 산재해 있다.

RF 소스는 전방향 안테나(omni-directional antenna)를 갖추고 있으며 이를 이용하여 RF 파를 센서 노드에게 방사한다. 한편 각 센서 노드는 감지 부(sensing unit), 처리 부(processing unit) 그리고 송수신 부(tranceiving

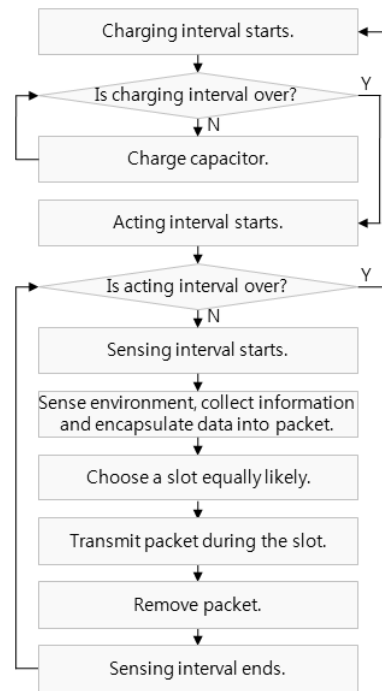


그림 3. 고려하는 MAC 방식의 동작
Fig. 3. Behavior of MAC scheme being considered.

unit)로 구성되어 있다. 센서 노드는 전방향 안테나를 이용하여 RF 소스가 방사한 RF 파를 수신하고 이를 직류(direct current: DC)로 변환한 후 내부의 캐패시터를 충전한다. 이어서 캐패시터에 저장된 에너지를 소모하여 감지 부, 처리 부 그리고 송수신 부를 구동한다.

본 논문에서는 여러 센서 노드들이 무선 매체(wireless medium)를 공유하여 싱크 노드에게 패킷들을 전달하도록 지원하는 경합형 MAC 방식을 고려한다. 그림 2에 나타난 바와 같이 고려하는 MAC 방식에서 시간은 프레임(frame)으로 나뉘고 프레임은 다시 충전 구간(charging interval)과 활동 구간(acting interval)으로 나뉜다. 또한 활동 구간은 일정 수의 감지 구간(sensing interval)들로 나뉘고 각 감지 구간은 일정 수의 슬롯(slot)들로 구성된다.

매 프레임의 충전 구간 동안 RF 소스는 전방향 안테나를 이용하여 RF 파를 방사한다. 그러면 각 센서 노드는 역시 전방향 안테나로 RF 파를 수신하고 직류로 변환하여 내부의 캐패시터를 충전한다. 이 때 프레임이 지속되는 동안 감지 구간마다 패킷을 한 번씩 전송할 수 있을 만큼의 에너지가 캐패시터에 축적되도록 한다.

매 프레임의 활동 구간 동안 감지 구간이 시작될 때 마다 센서 노드는 주변 환경을 감지하고 정보를 수집하여 패킷에 담는다. 이어서 센서 노드는 감지 구간을 구성하는 슬롯들 중 하나를 동일한 확률로(equally likely)

선택하고 선택한 슬롯 동안 패킷을 전송한다.

싱크 노드는 패킷을 올바르게 수신하여도 수신 확인(acknowledgement)을 센서 노드에게 방송(broadcast)하지 않는다. 따라서 센서 노드는 패킷 전달에 성공했는지 알지 못하므로 재전송(retransmission) 또한 하지 않는다. 이로 인해 결과적으로 패킷 상실이 발생할 수 있다.

고려하는 MAC 방식은 그림 3의 순서도에 정리되어 있다.

III. Throughput 분석: 사례 연구

본 장에서 고려하는 무선 수동형 센서 망은 하나의 싱크 노드, 싱크 노드와 공재하는 하나의 RF 소스 그리고 M 개의 센서 노드 s_1, \dots, s_M 으로 구성되어 있다. 초기에 이들 센서 노드는 그림 1에 도시된 바와 같이 싱크 노드를 중심으로 한 작은 원(circle)의 반지름이 r_1 이고 큰 원의 반지름이 r_2 인 annulus에 임의로 (randomly) 놓이고 그 후 이들의 위치는 변하지 않는다. 싱크 노드가 원점(origin)에 놓여 있는 극좌표계(polar coordinate system)에서 모든 $m \in \{1, \dots, M\}$ 에 대해 센서 노드 s_m 의 위치를 (D_m, Θ_m) 이라고 하자. 여기에서 D_m 은 싱크 노드로부터의 거리이고 Θ_m 은 기준 방향으로부터의 각도를 나타낸다. 본 장에서 $(D_1, \Theta_1), \dots, (D_M, \Theta_M)$ 은 서로 독립(independent)이고 동일하게 분포되어(identically distributed) 있다고 가정한다. 또한 D_m 과 Θ_m 은 서로 독립이라고 가정한다.

고려하는 MAC 방식에서 시간은 프레임으로 나뉘고 프레임은 다시 충전 구간과 활동 구간으로 나뉜다. 또한 활동 구간은 몇 개의 감지 구간으로 구성된다. 이러한 시간 구조에서 충전 구간의 길이는 a 슬롯이고 활동 구간은 길이가 c 슬롯인 b 개의 감지 구간으로 구성되어 있다.

센서 노드가 싱크 노드에게 전송한 packet은 경로 손실(path loss)을 겪는다. 모든 $m \in \{1, \dots, M\}$ 에 대해 센서 노드 s_m 이 평균 전력(average power) U_m 으로 packet을 보내고 싱크 노드가 평균 전력 V_m 으로 packet을 받는다면 V_m 은 U_m 과 다음과 같이 관계된다^[7].

$$V_m = U_m K \left(\frac{D_0}{D_m} \right)^\gamma. \quad (1)$$

위 식에서 K 는 경로 손실 상수(path loss constant),

D_0 는 기준 거리(reference distance) 그리고 γ 는 경로 손실 지수(path loss exponent)이다. 본 논문에서 모든 센서 노드는 같은 사양을 갖추고 있고 똑같이 초기화되어 망에 배치된다. 따라서 모든 센서 노드는 사전에 설정된 동일한 전력 U 로 packet을 전송한다. 그러므로 모든 $m \in \{1, \dots, M\}$ 에 대해 $U_m = U$ 이다.

둘 이상의 센서 노드가 같은 슬롯 동안 패킷들을 전송하면 소위 충돌(collision)이 일어난다. 센서 노드 s_m 이 전송한 패킷이 경험하는 신호 대 간섭 비(signal-to-interference ratio: SIR)를 R_m 이라고 하자. 임의의 슬롯 동안 싱크 노드가 센서 노드 s_m 으로부터 수신하는 평균 전력을 V_m^* 라고 하자. 그러면

$$V_m^* = \begin{cases} V_m & \text{if } s_m \text{ transmits a packet} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

수신 전력 V_m^* 를 이용하여 SIR R_m 을 다음과 같이 정의한다. 모든 $m \in \{1, \dots, M\}$ 에 대해

$$R_m = \frac{V_m^*}{\sum_{k=1}^M V_k^*}. \quad (3)$$

본 장에서 센서 노드 s_m 이 패킷을 전송했을 때 충돌이 일어나지 않으면 싱크 노드는 센서 노드 s_m 이 보낸 패킷을 올바르게 수신할 수 있다고 가정한다. 더욱이 충돌이 발생하더라도 만약 SIR R_m 이 threshold 값 τ 보다 크면 싱크 노드는 센서 노드 s_m 이 보낸 패킷을 올바르게 수신할 수 있는 capture 현상이 일어난다고 가정한다.

모든 $i \in \{1, 2, \dots\}$ 와 $j \in \{1, \dots, b\}$ 에 대해 $Z_{i,j}$ 를 싱크 노드가 i 번째 프레임의 j 번째 감지 구간 동안 올바르게 수신한 패킷의 수라고 하자. 그러면 망 전체 throughput η 를 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n(a+bc)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b Z_{i,j}. \quad (4)$$

$Z_{1,1}, \dots, Z_{1,b}, Z_{2,1}, \dots, Z_{2,b}, \dots$ 는 서로 독립이고 동일하게 분포되어 있으므로 strong law of large numbers^[8]에 의해 망 전체 throughput을 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{bE(Z_{i,j})}{a+bc}. \quad (5)$$

정확한(exact) 망 전체 throughput을 closed form으로 구하기 위해 싱크 노드 주위에 오직 2 개의 센서 노드 s_1 과 s_2 가 있는 경우를 고려하자. 망 전체 throughput을 구하기 위해 우선 싱크 노드와 두 센서 노드 사이의 거리인 (D_1, D_2) 와 싱크 노드가 올바르게 수신하는 패킷의 수와의 관계를 조사한다. 싱크 노드가 센서 노드 s_m 이 보낸 패킷을 올바르게 수신하기 위해서는 다른 센서 노드가 같은 슬롯 동안 패킷을 보내지 않거나 패킷을 보내더라도 SIR R_m 이 τ 보다 커야한다. 모든 $m \in \{1,2\}$ 에 대해 SIR R_m 이 τ 보다 크거나 같은 사건(event)를 \mathbf{A}_m 이라고 하자. 그러면

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \{\omega \in \Omega : D_2(\omega) \geq \tau^{1/\gamma} D_1(\omega)\} \\ \mathbf{A}_2 &= \{\omega \in \Omega : D_1(\omega) \geq \tau^{1/\gamma} D_2(\omega)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 Ω 는 (D_1, D_2) 가 정의되는 sample space이다. (D_1, D_2) 는 $[r_1, r_2]^2$ 에서만 값을 가지므로 Ω 는 $\{\omega \in \Omega : (D_1(\omega), D_2(\omega)) \in [r_1, r_2]^2\}$ 와 같다. 한편 사건 \mathbf{A}_0 는 $\Omega \setminus \mathbf{A}_1 \setminus \mathbf{A}_2$ 라고 하자.

$\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1$ 그리고 \mathbf{A}_2 는 서로 배반(exclusive) 사건이고 $\mathbf{A}_0 \cup \mathbf{A}_1 \cup \mathbf{A}_2 = \Omega$ 이므로 망 전체 throughput η 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b Z_{i,j}}{n(a+bc)} \cdot I_{\mathbf{A}_0} \\ &+ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b Z_{i,j}}{n(a+bc)} \cdot I_{\mathbf{A}_1} \\ &+ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b Z_{i,j}}{n(a+bc)} \cdot I_{\mathbf{A}_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 I_B 는 indicator 함수이다. 한편 모든 $k \in \{0,1,2\}$ 에 대해 사건 \mathbf{A}_k 가 일어났을 때 $Z_{1,1}, \dots,$

$Z_{1,b}, Z_{2,1}, \dots, Z_{2,b}, \dots$ 은 서로 독립이고 동일한 분포를 따르므로 strong law of large numbers에 의해 망 전체 throughput을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{b}{a+bc} [E(Z_{i,j}|\mathbf{A}_0)P(\mathbf{A}_0) + E(Z_{i,j}|\mathbf{A}_1)P(\mathbf{A}_1) + E(Z_{i,j}|\mathbf{A}_2)P(\mathbf{A}_2)]. \quad (8)$$

모든 $m \in \{1,2\}$ 에 대해 만약 사건 \mathbf{A}_m 이 일어나면 센서 노드 s_m 이 패킷을 보내기만 하면 충돌과 관계없이 싱크 노드는 그 패킷을 올바르게 수신할 수 있다. 하지만 s_m 이 아닌 센서 노드가 packet을 보내면 충돌이 없을 때만 싱크 노드가 그 packet을 올바르게 수신할 수 있다. 한편 \mathbf{A}_0 가 일어나면 어느 센서 노드라도 패킷을 보내면 충돌이 일어나지 않아야 싱크 노드가 그 패킷을 올바르게 수신할 수 있다. 또한 각 센서 노드는 매 감지 구간에서 c 개의 슬롯들 중 하나를 동일 확률로 선택하여 패킷을 전송한다. 그러므로

$$\begin{aligned} E(Z_{i,j} | \mathbf{A}_0) &= 2 - \frac{2}{c} \\ E(Z_{i,j} | \mathbf{A}_1) &= E(Z_{i,j} | \mathbf{A}_2) = 2 - \frac{1}{c}. \end{aligned} \quad (9)$$

한편 D_1 과 D_2 가 동일하게 $[r_1, r_2]$ 에서 균일 분포(uniform distribution)를 따른다고 가정하자. 이러한 가정 하에서 만약 $\frac{r_2}{r_1} \geq \tau^{1/\gamma}$ 이면

$$\begin{aligned} P(\mathbf{A}_1) &= P(D_2 \geq \tau^{1/\gamma} D_1) \\ &= \int_{r_1}^{\frac{r_2}{\tau^{1/\gamma}}} \int_{\tau^{1/\gamma} x_1}^{r_2} \frac{1}{(r_2 - r_1)^2} dx_2 dx_1 \\ &= \frac{(r_2 - \tau^{1/\gamma} r_1)^2}{2\tau^{1/\gamma} (r_2 - r_1)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

그렇지 않으면 $P(\mathbf{A}_1) = 0$ 이다. 한편 대칭성(symmetry)에 의해 $P(\mathbf{A}_2) = P(\mathbf{A}_1)$ 이고 $P(\mathbf{A}_0) = 1 - P(\mathbf{A}_1) - P(\mathbf{A}_2)$ 이다.

식 (8), (9), (10)으로부터 센서 노드가 2 개일 때 고려하는 MAC 방식이 취할 수 있는 망 전체 throughput을 다음과 같이 표현할 수 있다. 만약 $\frac{r_2}{r_1} \geq \tau^{1/\gamma}$ 이면

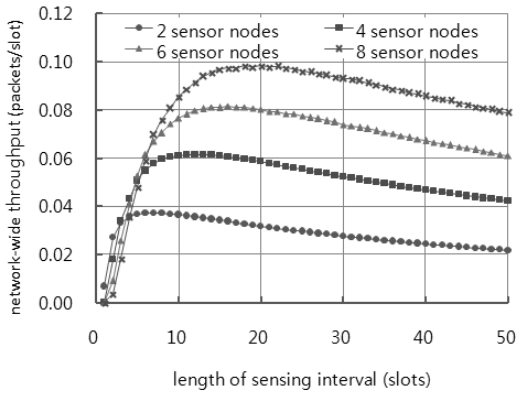


그림 4. 감지 구간의 길이에 따른 망 전체 throughput

Fig. 4. Network-wide throughput with respect to length of sensing interval.

$$\eta = \frac{2b(c-1)}{c(a+bc)} + \frac{b}{c(a+bc)} \frac{(r_2 - \tau^{1/\gamma} r_1)^2}{\tau^{1/\gamma} (r_2 - r_1)^2} \quad (11)$$

그렇지 않으면

$$\eta = \frac{2b(c-1)}{c(a+bc)}. \quad (12)$$

무선 수동형 센서 망의 설계에서 제어 가능한 parameter들 중 하나는 감지 구간의 길이 c 이다. 다음과 같은 최적화 문제(optimization problem)를 세우자.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \eta \\ & \text{with respect to } c \in \{1, 2, \dots\} \\ & \text{subject to } a > b \\ & \quad b \in \{1, 2, \dots\} \\ & \quad 0 < r_1 < r_2 \\ & \quad \gamma > 1 \\ & \quad \tau > 1 \end{aligned}$$

$c \in [1, \infty)$ 에서 망 전체 throughput η 는 하나의 critical point를 갖고 그 critical point는 maximum point이다. Maximum point를 \hat{c} 이라고 하자. 그러면 η 를 c 에 대해 미분하여 \hat{c} 을 다음과 같이 구한다.

$$\hat{c} = (1 - \phi) + \sqrt{(1 - \phi)^2 + (1 - \phi) \frac{a}{b}}. \quad (13)$$

식 (13)에서 $\phi = P(\mathbf{A}_1)$ 이다. Maximum point \hat{c} 은 자

연수가 아닐 수 있으므로 망 전체 throughput을 최대화하는 최적의(optimal) c 값인 c^* 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c^* = \begin{cases} \lceil \hat{c} \rceil & \text{if } \eta|_{c=\lceil \hat{c} \rceil} > \eta|_{c=\lfloor \hat{c} \rfloor} \\ \lfloor \hat{c} \rfloor & \text{if } \eta|_{c=\lfloor \hat{c} \rfloor} > \eta|_{c=\lceil \hat{c} \rceil}. \end{cases} \quad (14)$$

IV. MAC 방식의 최적화

본 장에서는 3장에서 구한 throughput 공식과 모의 실험 방법을 이용하여 고려하는 MAC 방식이 취할 수 있는 throughput을 조사한다. 이어서 망 전체 throughput을 최대화하는 설계 parameter의 최적 값을 구한다.

본 장에서 가정하는 환경은 다음과 같다.

- ① 무선 수동형 센서 망은 하나의 싱크 노드, 하나의 RF 소스 그리고 다수의 센서 노드들로 구성된다.
- ② RF 소스는 싱크 노드와 공재한다.
- ③ 센서 노드들은 싱크 노드를 중심으로 한 작은 원의 반지름이 0.5 m이고 큰 원의 반지름이 2.5 m인 annulus에 균일하게(uniformly) 분포한다.
- ④ 시간은 슬롯화되어 있다.
- ⑤ 슬롯의 길이는 센서 노드가 한 슬롯 동안 패킷 하나를 전송할 수 있도록 설정된다.
- ⑥ 센서 노드가 패킷을 세 번 전송하기 위해 120 슬롯의 충전 시간이 필요하다^[9].
- ⑦ 센서 노드가 전송한 패킷은 싱크 노드에 도달할 때까지 식 (1)과 같은 경로 손실(path loss)을 겪는다.
- ⑧ 센서 노드가 전송한 패킷이 경험하는 신호 대 간섭 비가 일정 수준을 넘기지만 하면 싱크 노드는 반드시 이 패킷을 올바르게 수신한다. 즉, capture 현상이 일어난다.

그림 4는 감지 구간의 길이 c 에 따른 망 전체 throughput의 변화를 보여 준다. 이 그림에서 경로 손실 지수 γ 는 2로 설정되어있고 패킷의 올바른 수신을 판가름하는 SIR threshold는 4로 설정되어 있다. 그림 4로부터 망 전체 throughput은 감지 구간이 길어지면 급격히(steeply) 증가하다가 감지 구간의 길이가 특정 값을 넘어서면 오히려 감소함을 알 수 있다. 감지 구간이 짧아질수록 센서 노드가 전송한 패킷들 간 충돌이 보다 빈번히 일어나고 이로 인해 망 전체 throughput이 저하된다. 이와 반면에 감지 구간이

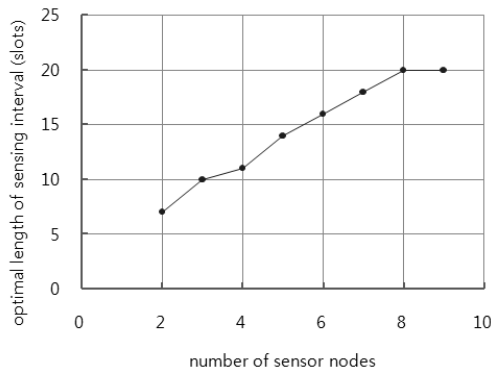


그림 5. 센서 노드의 수에 따른 감지 구간의 최적의 길이
Fig. 5. Optimal length of sensing interval with respect to number of sensor nodes.

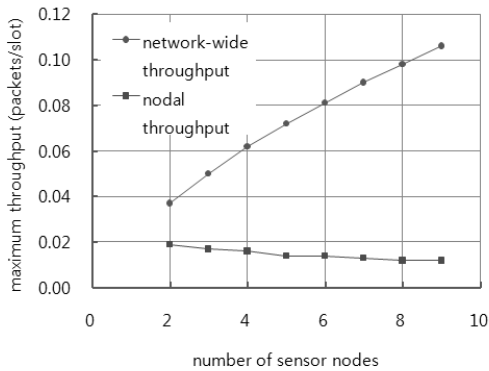


그림 6. 센서 노드의 수에 따른 최대 throughput
Fig. 6. Maximum throughput with respect to number of sensor nodes.

길어질수록 센서 노드가 패킷 전송에 사용하지 않는 슬롯이 늘어나고 결국 망 전체 throughput이 저하된다. 이러한 이유로 망 전체 throughput을 최대화하는 감지 구간의 길이가 존재한다.

그림 5는 그림 4의 환경에서 고려하는 MAC 방식이 최대의 망 전체 throughput을 얻을 수 있도록 하는 감지 구간의 최적의 길이를 보여 준다. 이 그림으로부터 센서 노드가 많아질수록 최대의 망 전체 throughput을 얻기 위해 감지 구간의 길이는 함께 길어져야 함을 알 수 있다.

그림 6은 그림 4의 환경에서 고려하는 MAC 방식이 취할 수 있는 최대의 망 전체 throughput과 센서 노드 당 throughput을 보여 준다. 이 그림으로부터 보다 많은 센서 노드를 설치할수록 더 높은 망 전체 throughput을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 센서 노드의 수가 늘어남에 따라 감소하는 센서 노드 당 최대의 throughput 곡선으로부터 투입한 센서 노드만큼 망 전체 throughput이 늘어나지는 않음을 또한 확인할 수 있다.

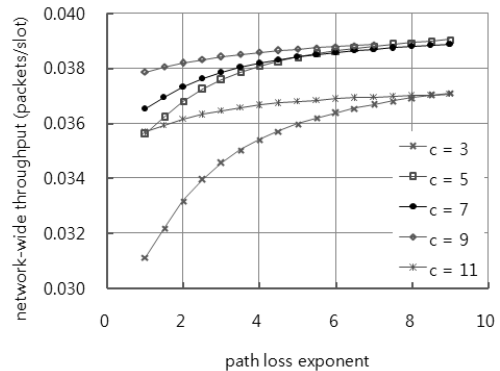


그림 7. 경로 손실 지수에 따른 망 전체 throughput
Fig. 7. Network-wide throughput with respect to path loss exponent.

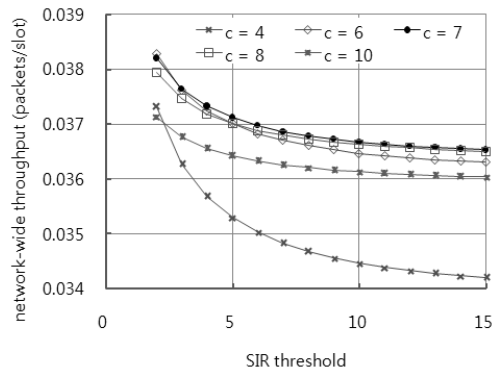


그림 8. SIR threshold에 따른 망 전체 throughput
Fig. 8. Network-wide throughput with respect to SIR threshold.

그림 7은 경로 손실 지수 γ 에 따른 망 전체 throughput의 변화를 보여 준다. 이 그림에서 센서 노드의 수 M 은 2이고 SIR threshold τ 는 4로 설정되어 있다. 또한 (11)의 throughput 공식을 이용하여 망 전체 throughput이 계산되어 있다. 그림 7로부터 경로 손실 지수가 커질수록 망 전체 throughput이 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 경로 손실 지수가 커지면 싱크 노드가 가까운 센서 노드로부터 받은 전력과 먼 센서 노드로부터 받은 전력의 차이가 심화되어 capture 현상이 벌어짐에 기인한다. 또한 이 그림으로부터 경로 손실 지수가 망 전체 throughput을 최대화하는 감지 구간의 최적의 길이에 영향을 미침을 확인할 수 있다.

그림 8은 싱크 노드의 올바른 packet 수신을 평가하는 SIR threshold τ 에 따른 망 전체 throughput의 변화를 보여 준다. 이 그림에서 센서 노드의 수 M 은 2이고 경로 손실 지수 γ 는 2로 설정되어 있다. 또한 (11)의 throughput 공식을 이용하여 망 전체 throughput이 계산되어 있다. 그림 8로부터 SIR threshold가 커질수록

망 전체 throughput이 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 SIR threshold가 커지면 싱크 노드가 센서 노드들로부터 받은 전력의 차이가 상대적으로 작아져 capture 효과가 미미해짐에 기인한다. 또한 이 그림으로부터 SIR threshold가 망 전체 throughput을 최대화하는 감지 구간의 최적의 길이에 영향을 미침을 확인할 수 있다.

V. 결 론

무선 수동형 센서 망은 RF 소스가 센서 노드에게 에너지를 공급하여 배터리 없이 영원히 동작할 수 있는 망이다. 그러나 현실에서 무선 수동형 센서 망은 에너지의 희소성, 에너지 수신과 데이터 전송의 동시 불가능, 자원 할당의 비효율성 등 많은 문제를 안고 있다. 본 논문은 하나의 싱크 노드, 싱크 노드와 공재하는 하나의 RF 소스 그리고 싱크 노드 주변에 산재한 여러 센서 노드로 구성된 무선 수동형 센서 망이 packet 상설에는 관대하지만 패킷의 적시 전달을 요구하는 서비스를 제공하는 상황을 다루었다. 이러한 망에서 센서 노드들이 싱크 노드에게 패킷들을 전달하도록 현실적 제약을 인식하여 framed and slotted ALOHA에 기초한 경합형 MAC 방식을 고려하였다. 이어서 지리적으로 흩어져 있는 센서 노드들이 전송한 패킷들이 경로 손실을 겪고 결국 capture 현상이 빚어질 때 MAC 방식이 취할 수 있는 망 전체 throughput을 조사하였다. 특히 두 센서 노드가 망에 있는 경우 정확한 망 전체 throughput의 공식을 closed form으로 도출하였다. 마지막으로 throughput 공식과 모의 실험 방법을 통해 최대의 망 전체 throughput을 얻을 수 있도록 경합형 MAC 방식의 최적화를 시도하였다. 폭넓은 수치적 검토를 통해 감지 구간의 길이를 조절하여 최대의 망 전체 throughput을 취하도록 MAC 방식을 최적화할 수 있음을 확인하였다. 추가로 경로 손실 지수와 SIR threshold는 상대적으로 값이 작을수록 감지 구간의 최적의 길이에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다.

REFERENCES

[1] C. Choi and H. Seo, "Elementary MAC Scheme Based on Slotted ALOHA for Wireless Passive Sensor Networks," *Journal of IEIE*, vol. 53, no. 4, pp. 500-506, April 2016.

- [2] A. Bereketi and O. Akan, "Communication Coverage in Wireless Passive Sensor Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 133-135, February 2009.
- [3] O. Akan, M. Isik and B. Baykal, "Wireless Passive Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 8, pp. 92-99, August 2009.
- [4] H. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [5] F. Schoute, "Dynamic Frame Length ALOHA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 31, no. 4, pp. 565-568, April 1983.
- [6] R. Rom and M. Sidi, *Multiple Access Protocols-Performance and Analysis*. Springer-Verlag, 1990.
- [7] D. Agrawal and Q. Zeng, *Introduction to Wireless and Mobile Systems*. 4th edition, CL Engineering, 2015.
- [8] T. Ferguson, *A Course in Large Sample Theory*. Chapman and Hall, 1996.
- [9] H. Seo, J. Park, J. Ha, and C. Choi, "Method for Approximately Calculating Charging and Acting Times in Wireless Passive Sensor Networks," *Proceedings of IEIE Fall Conference 2015*, Wonju, Korea, pp. 863-865, November 2015.

저 자 소 개



최 천 원(정회원)

1986년 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사

1988년 서울대학교 대학원 전자공학과 석사

1996년 University of California at Los Angeles (UCLA)

Department of Electrical Engineering 박사

현재 단국대학교 공과대학 교수

<주관심분야: medium access control, resource management, sensor networks, RFID networks, MAN, queueing theory, game theory>



서 희 원(학생회원)

2010년 단국대학교 공과대학 전자컴퓨터공학부 학사

2012년 단국대학교 대학원 컴퓨터학과 석사

현재 단국대학교 대학원 컴퓨터학과 박사 과정

<주관심분야: medium access control, sensor networks>