

무선 센서 네트워크에서 지연에 민감한 정보의 다중 홉 전송 기법

차재룡*, 김재현^o

Multi-hop Transmission Scheme for Delay-Sensitive Information in Wireless Sensor Networks

Jae-Ryong Cha*, Jae-Hyun Kim^o

요 약

본 논문에서는 무선 센서네트워크(wireless sensor network : WSN)에서 발생하는 두 가지 지연 요인인 큐잉 지연(queueing delay)과 랜덤 링크 스케줄링에 의한 지연(delay by random link scheduling)을 소개하고 이를 해결하기 위한 새로운 순차적 스케줄링 기법을 제안한다. 또한 모의 실험을 통하여 이용하여 제안한 다중 홉 전송 기법의 성능 평가를 수행하고, 이를 기존의 랜덤 링크 스케줄링 기법의 성능과 종단간 패킷 전송 지연의 관점에서 비교한다. 모의실험 결과에 따르면, 소스 노드(source node)와 목적지 노드(destination node) 사이의 홉 수(hop distance)가 증가할수록 제안한 스케줄링 기법과 기존의 랜덤 링크 스케줄링 기법의 지연 성능 차이가 증가함을 알 수 있었다. 소스 노드와 목적지 노드 사이의 평균 홉 수가 2.66, 4.1, 4.75 및 6.3 일 때, 제안한 스케줄링 기법은 기존의 랜덤 링크 스케줄링 기법에 비해 22%, 36%, 48% 및 55% 까지 지연 시간을 줄일 수 있었다.

Key Words : Multihop, Distributed, Sequential scheduling, WSN, 다중 홉, 분산, 순차적 스케줄링, 무선 센서 네트워크

ABSTRACT

This paper introduces two multi-hop delay factors which can be caused by conventional TDMA scheduling; queueing delay and delay by random link scheduling, and proposes a new sequential scheduling scheme to resolve these two factors. We also simulate the TDMA network with the proposed link scheduling scheme and compare it with conventional(random) link scheduling scheme in terms of end-to-end packet transmission delay. From the simulation results, the more the average hop distance increases, the more the difference of the delay performance of both scheduling schemes increases. When the average number of hops is 2.66, 4.1, 4.75, and 6.3, the proposed sequential scheduling scheme reduces the average end-to-end delay by about 22%, 36%, 48%, and 55% respectively when compared to the random scheduling scheme.

I. 서 론

무선 센서 네트워크(wireless sensor network :

WSN)에서의 대표적인 매체 접근 제어(media access control : MAC) 프로토콜은 비 경쟁 방식(time division multiple access : TDMA)과 경쟁

※ "본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (NIPA-2012-(H0301-12-2003))

※ "본 연구는 방송통신위원회의 방송통신인프라원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음"(KCA-2012-08-911-05-001)

◆ 주저자 : 아주대학교 전자공학과 무선 인터넷 연구실, builder@ajou.ac.kr, 정회원

◦ 교신저자 : 아주대학교 전자공학과 무선 인터넷 연구실, jkim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2011-11-573, 접수일자 : 2011년 11월 30일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 10일

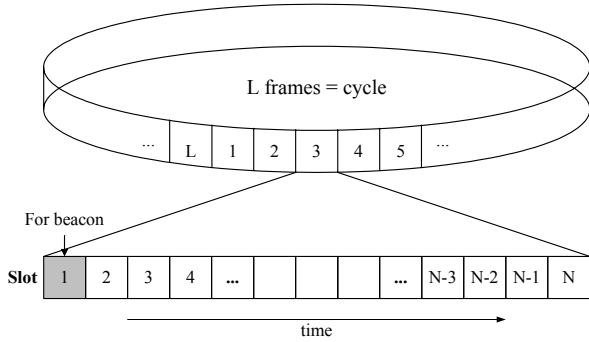


그림 1. DCH에서의 TDMA 프레임 구조
Fig. 1. TDMA frame structure in DCH

방식(carrier sensing multiple access : CSMA)으로 구분될 수 있다. 비 경쟁 기반의 MAC 프로토콜은 각 노드마다 전송 할 타임 슬롯(time slot)을 미리 할당하여 해당 슬롯에서 전송을 하는 방식이다. 따라서, 경쟁 기반의 MAC 프로토콜에 비해 충돌이 적으며, RTS/CTS(Request to Send/Clear to Send)와 같은 제어 패킷이 필요하지 않아 오버헤드가 적다는 장점이 있다. 그러나, 분산되어 있는 노드의 시간 동기를 유지해야 한다는 단점이 있다. 경쟁 기반 프로토콜은 매 홉마다 경쟁을 통하여 이웃 노드에게 패킷을 전달하는 방식이다. 그러나, 경쟁 기반 프로토콜은 패킷 충돌에 의한 재전송, 패킷 중계를 위해 항상 채널을 감시하는 오버헤어링, 센서 노드 간 정보 공유와 특정 목적을 위한 제어 패킷 전송, 또는 이웃 노드로부터 전송된 데이터를 수신하기 위해 항상 수신 모드를 유지해야 하는 유희청취등으로 인하여 무선 센서 네트워크와 같은 다중 홉 환경에서는 TDMA 기반 프로토콜에 비해 더 많은 오버헤드가 필요하여 에너지 소비가 크다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 비 경쟁 기반 프로토콜 중 대표적인 TDMA 스케줄링 기법을 중점적으로 다룬다.

기존의 TDMA 스케줄링 관련 연구^[14]들의 목적은 네트워크 내의 노드들이 충돌 없이 통신을 하기 위해 가능한 한 작은 프레임 크기(슬롯의 수)를 갖도록 하는 스케줄링 기법(minimum length schedule)을 설계하는 것이었다. 그러나, 다수의 노드가 하나 또는 소수의 수신 노드에게 패킷을 전송하는 무선 센서 네트워크의 설계 목적이 지연에 민감한 이벤트 정보의 다중 홉 전송일 경우, 기존의 minimum length schedule은 다음과 같은 두 가지 제약 사항을 가지고 있다. 첫째, minimum length schedule은 큐잉 지연을 발생시켜 종단간 패킷 전송

지연을 증가시킬 수 있다. 둘째, minimum length schedule은 할당된 슬롯의 순서가 순차적이지 못할 수 있기 때문에 랜덤 링크 스케줄에 의한 추가적인 지연을 경험할 수 있다. 다중 홉 환경에서 홉 수가 길면 길수록 큐잉 지연과 랜덤 링크 스케줄에 의한 지연은 종단간 패킷 전송 지연에 더 큰 영향을 끼친다. 두 가지 제약 사항에 대한 세부 내용은 IV장에서 설명한다. 따라서, 본 논문에서는 기존 연구의 두 가지 제약 사항을 해결하여 지연에 민감한 이벤트 정보의 QoS를 보장하기 위한 다중 홉 전송 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 TDMA 스케줄링 관련연구를 설명하고 III 장에서 제안하는 다중 홉 전송 기법을 위한 시스템 모델을 설명한다. 제 IV장에서는 다중 홉 TDMA 환경에서 발생할 수 있는 두 가지 지연 요인을 설명하고, 이러한 문제를 해결하기 위하여 V장에서 순차적인 다중 홉 스케줄링 기법이 제안된다. VI장에서 모의실험을 통하여 기존의 랜덤 스케줄링 방식과 제안한 스케줄링 방식을 비교하고 VII장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

TDMA 스케줄링 기법은 타임 슬롯을 각 노드에 할당하는 방식과 타임 슬롯을 각 노드 간 링크에 할당하는 방식으로 구분될 수 있다. 동일한 채널을 사용한다고 가정할 경우, 타임 슬롯을 노드에 할당하는 방식은 2 홉 거리 이내에 있는 노드들이 같은 슬롯을 할당할 수 없다. 그러나, 타임 슬롯이 링크에 할당 된다면 2 홉 거리에 있는 노드들도 동시에 패킷의 전송 또는 수신이 가능하다^[1]. 또한, 타임 슬롯이 노드에 할당되면 패킷을 전송하는 노드의 모든 이웃 노드들은 해당 패킷을 수신한 후 자신에게 전송 된 것인지를 판단해야 하므로, 해당 패킷을 수신할 필요가 없더라도 트랜시버를 항상 켜두어야 한다. 그러나, 타임 슬롯이 노드 간 링크에 할당되면 한 노드만 그 슬롯에서 트랜시버를 켜고 패킷을 수신하면 되므로 슬롯을 노드에 할당하는 방식에 비해 상대적으로 에너지를 절약할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 타임 슬롯을 링크에 할당하는 방식을 기반으로 다중 홉 전송 기법을 제안한다. 일반적으로 타임 슬롯을 링크에 할당하는 방식은 그래프 이론에서 edge coloring problem과 밀접한 연관성을 가진다. Vizing 이론에 따르면, 한 그래프에서

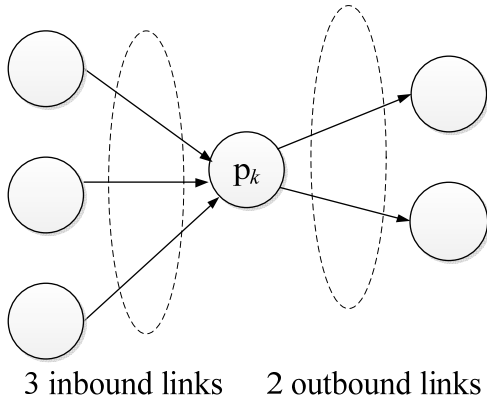


그림 2. 인바운드/아웃바운드 링크의 예
Fig. 2. Example of inbound/outbound links

유효한 edge coloring은 최대 $(\delta+1)$ color가 필요하다⁵⁾. 이 때, δ 는 그래프에서 한 노드의 maximum degree를 의미한다. 즉, 한 노드에 연결된 모든 독립된 edge 개수를 의미한다. 만일 그래프에서 유효한 edge coloring을 TDMA 스케줄링에 적용하면, 센서 노드를 위한 슬롯 할당은 그래프 이론에서 결정된 color에 각각의 타임 슬롯을 매핑하는 것과 등가로 생각할 수 있다. 기존 연구에서 Panconesi and Srinivasan은 최대 $(2\delta-1)$ 슬롯을 갖는 분산 스케줄링 알고리즘을 제안하였고, 이 후 기존의 알고리즘 보다 우수한 성능을 갖는 향상된 알고리즘을 제안하였다²⁾. 기존의 분산형 알고리즘 중 가장 좋은 성능을 보이는 것은 Grable and Panconesi이 제안한 randomized algorithm으로써 최대 $\delta(\epsilon+1)$ 만큼의 슬롯을 이용하여 네트워크의 노드가 충돌 없이 데이터를 전송할 수 있다. 이 때 ϵ 은 시스템 입력 파라미터이다³⁾. 그러나, Marathe는 모의실험을 통하여 randomized algorithm이 ϵ 값이 작을 경우 스케줄링에 실패할 수도 있다는 것을 검증하였다⁶⁾. Ramnathan은 다중 홉 환경에서 TDMA, FDMA(frequency division multiple access) 및 CDMA(code division multiple access)를 위한 프레임 워크를 제안하였다. Ramnathan이 제안한 스케줄링 알고리즘은 최대 $O(\Theta)$ 만큼의 슬롯이 필요하며, 이 때 Θ 는 플래너 그래프(planar graph)의 최소 개수를 의미한다⁷⁾. Gandham은 distance-1 coloring을 사용할 때 발생할 수 있는 히든 노드 문제(hidden node problem) 및 노출 노드 문제(exposed node problem)를 해결한 알고리즘을 개발하였고, Gandham이 제안한 스케줄링 기법은 cyclic 그래프에 대해 최대 $\delta+1$ 만큼의 슬롯이 필요하다.

또한 Gandham은 acyclic 그래프에 대해서도 최대 $2(\delta+1)$ 만큼의 슬롯이 필요하다는 것을 분석하였고 모의실험을 통하여 검증하였다⁵⁾. 한편, Djukic는 슬롯 할당 순서로 인한 스케줄링 지연을 줄이기 위한 순차적 슬롯 할당 기법을 제안하였다. 그러나, 중앙 컨트롤러(또는 base station)가 항상 존재해야 하고, 링크 간 전송 순서가 사전에 결정되어야 한다는 가정을 필요로 한다⁸⁾. Trung가 제안한 기법은 Djukic의 슬롯 할당 방식을 멀티 채널환경으로 확장한 것으로, 여전히 중앙 컨트롤러를 필요로 한다⁹⁾. 위에서 언급한 연구 결과에서 알 수 있듯이, 기존의 TDMA 스케줄링 관련 연구의 목적은 주로 네트워크에 존재하는 모든 노드들이 충돌 없이 통신할 수 있도록 하기 위하여 가능한 한 작은 프레임 크기를 갖도록 하는 스케줄링 기법을 설계하는 것이다. 또한 순차적 스케줄링 기법의 경우에도 항상 중앙 컨트롤러가 존재해야 한다는 가정을 필요로 한다. 본 논문에서는, 기존의 연구들이 무선 센서 네트워크에 적용 될 때 두 가지 지연요인을 발생시켜 종단간 패킷 전송 지연을 증가시킬 수 있다는 사실을 보이고 이를 해결하기 위하여 분산 환경에서 라우팅과 결합된 순차적 스케줄링 기법을 제안한다.

III. 시스템 모델

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 센서 노드를 의미하는 점(vertex)과 무선 통신 링크를 의미하는 에지(edge)로 이루어지는 방향성 그래프 $G=(B,E)$ 로 모델링 한다. 이 때, $B=\{b_1, \dots, b_m\}$ 는 무선 센서 네트워크내의 모든 노드의 집합을 의미하며 $E=\{e_1, \dots, e_g\}$ 는 모든 방향성 링크의 집합을 의미한다. 만일 임의의 두 노드 u 와 v 가 $(u,v) \in E$ 이면 두 노드 u, v 는 이웃 노드라고 정의한다. 무선 센서 네트워크 내에 f 개의 플로우가 존재하며 각 플로우는 $R(f)=\{p_1, \dots, p_q\}$ 으로 정의된다. 이 때, $2 \leq q$ 이며, p_1 은 소스 노드(source node)를, $p_k(1 < k < q)$ 는 Relay Node를, p_q 는 목적지 노드(destination node)를 각각 의미한다. 본 논문에서 네트워크 내에서 사용되는 채널(channel)은 공용 채널(common channel : CCH)과 데이터 채널(data channel : DCH)로 구분되는데, 각 노드는 CCH에서 CSMA를 기반으로 슬롯 할당을 수행하고 슬롯 할당이 완료 되면 DCH에서 데이터를 전

송한다. 그림 1은 DCH에서의 제안한 스케줄링 기법을 위한 TDMA 프레임 구조를 나타낸다. DCH는 L 개의 프레임으로 구성되고, 각 프레임은 N 개의 슬롯으로 구성된다. 각 프레임에서 첫 번째 슬롯은 각 노드가 비컨(beacon)을 전송하기 위해 사용된다. 비컨은 다음과 같은 3가지 정보를 포함한다. $ST_m(n)$ 은 임의의 노드가 해당 슬롯에서 전송 노드인지, $SR_m(n)$ 은 임의의 노드가 해당 슬롯에서 수신 노드인지, 그리고 $NT_m(n)$ 은 해당 슬롯에서 임의의 노드의 이웃 노드가 전송 노드인지 여부를 나타낸다. 위의 세 가지 값들을 결정하는 방법은 다음과 같다.

- $ST_m(n)$ - 노드 m 이 슬롯 n 에서 데이터를 전송하면 이 값은 1, 아니면 0.
- $SR_m(n)$ - 노드 m 이 슬롯 n 에서 데이터를 수신하면 이 값은 1, 아니면 0.
- $NT_m(n)$ - 노드 m 의 이웃 노드가 슬롯 n 에서 데이터를 전송하면 이 값은 1, 아니면 0.

네트워크 내의 모든 노드는 주기적으로 위의 3가지 정보를 교환함으로써 서로의 슬롯 할당 정보를 알 수 있다. 각 노드는 슬롯을 할당할 때, $ST_m(n)$, $SR_m(n)$ 및 $NT_m(n)$ 값이 '0'인 슬롯을 선택하여 슬롯을 할당하고 슬롯 할당이 완료 되면 해당 값들은 '1'로 설정한다. 노드는 자신의 이웃 노드로부터 비컨을 수신할 때마다 자신의 $ST_m(n)$, $SR_m(n)$ 및 $NT_m(n)$ 정보를 업데이트 한다.

IV. 다중 홉 지연 요인

본 장에서는 무선 센서 네트워크에서 다중 홉으로 패킷을 전송할 때 발생하는 두 가지 지연 요인들을 설명한다. 우선 임의의 Relay Node가 두 개 이상의 인바운드 링크(inbound link)를 가지고 있을 때 발생하는 큐잉 지연을 설명한다. 또한, 각 노드가 플로우 내의 슬롯을 임의로 할당할 때 발생하는 랜덤 링크 스케줄링에 의한 지연을 설명한다.

4.1. 큐잉 지연

무선 센서 네트워크에서 기존 논문^{[14][4]}들의 목적은 네트워크 내의 노드가 가능한 한 작은 프레임 크기를 갖도록 하기 위하여 슬롯을 할당하는 것이다. Minimum length schedule은 단일 홉 통신에서

처리율이 높고 패킷 전송 지연 또한 작아서 효율적이다. 그러나, 무선 센서 네트워크와 같은 다중 홉 환경에서는 중계 노드가 두 개 이상의 인바운드 링크와 하나의 아웃바운드 링크(outbound link)를 가지기 때문에 큐잉 지연이 발생하며 소스 노드와 목적지 노드 사이의 홉이 증가하면 할수록 종단간 패킷 전송 지연이 증가한다. 이 때, 인바운드 링크란 임의의 노드가 존재할 때 그 노드와 그 노드에게 패킷을 전송할 노드들 사이의 모든 링크를 의미하며, 아웃바운드 링크란 임의의 노드가 존재할 때 그 노드와 그 노드가 패킷을 전송할 모든 노드들 사이의 링크를 의미한다. 일반적으로 무선 센서 네트워크는 한 1개 이상의 인바운드 링크가 존재하고 1개의 아웃바운드 링크가 존재한다. 그림 2는 인바운드 (inbound)/아웃바운드 링크의 예를 나타내고 그림 3은 무선 센서 네트워크에서 큐잉 지연이 발생하는 네트워크 구성의 예이다. 그림 3에서 노드 3과 노드 8은 두 개의 인바운드 링크를 가지고 있고, 노드 4, 노드 6, 노드 7 및 노드 SINK는 하나의 인바운드 링크를 가지고 있다. 또한 노드 SINK를 제외한 모든 노드는 하나의 아웃바운드 링크를 가지고 있다. 우선, 네트워크에서 minimum length schedule를 이용하여 슬롯을 할당한다고 가정하자. 또한, 그림 3의 Queueing point 1에서, 노드 1과 노드 2는 각각 첫 번째 슬롯과 두 번째 슬롯에서 노드 3에게 패킷을 전송하고, 노드 3은 노드 4에게 3 번째 슬롯에서 패킷을 전송한다고 가정하자. 만일

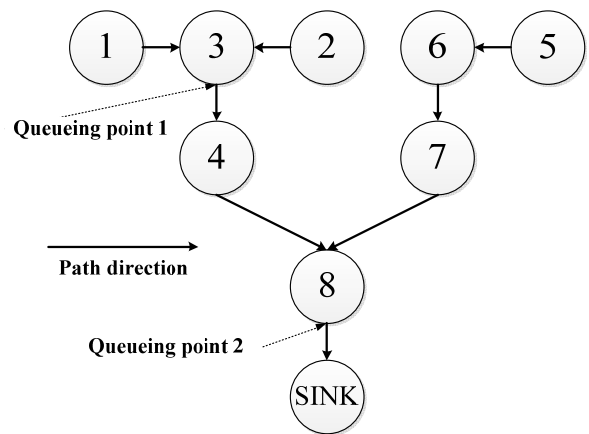


그림 3. 큐잉 지연이 발생하는 네트워크 구성
Fig. 3. Example network where queueing delay occurs

패킷이 각 프레임의 시작과 함께 생성이 된다고 가정하면, 노드 3은 3번째 슬롯의 시작 시점에서 노드 1과 노드 2로부터 두 개의 패킷을 수신한다. 그

러나, 노드 3의 아웃바운드 링크가 하나이고 매 프레임마다 노드 3은 노드 4에게 슬롯 3에서 패킷을 전송하기 때문에, 각 노드가 FIFO(first in first out) 큐를 사용한다고 가정하면, 노드 2로부터 전송된 패킷은 현재 프레임에서 전송되지 못하고 다음 프레임에서 전송되어야 한다. 직관적으로, 그림 3의 Queueing point 1에서 노드 3의 큐잉 지연을 해결할 수 있는 방법은, 동일한 프레임 내에서 노드 1과 노드 2가 패킷을 발생시키지 않도록 하는 것이다. 즉, 첫 번째 프레임에서 노드 1이 패킷을 생성하고 두 번째 프레임에서 노드 2가 패킷을 생성하면 노드 3이 노드 4에게 두 노드로부터 수신된 패킷을 전송할 때 큐잉 지연이 발생하지 않는다. 그러나, 이러한 방식으로 Queueing point 1에서는 큐잉 지연을 해결할 수 있지만, Queueing point 2에서 또 다른 큐잉 지연이 발생할 수 있다. Minimum length schedule은 중단간 홉 수가 2 홉 이상이면 큐잉 지연이 발생할 수 있고, 임의의 중계노드에서 인바운드 링크의 개수가 많을수록 또는 소스 노드에서 생성되는 패킷의 수가 많을수록 큐잉 지연에 의한 중단간 패킷 전송 지연은 증가하게 된다. 따라서, 지연에 민감한 정보 전송을 목적으로 하는 무선 센서 네트워크에서는 정보의 QoS를 보장하지 못할 수도 있다.

4.2. 랜덤 링크 스케줄링에 의한 지연

본 절에서는 랜덤 링크 스케줄링과 순차적 링크 스케줄링을 설명하고, 두 스케줄링 방식의 평가 지표로서 프레임 지연을 정의한다. 또한, 랜덤 링크 스케줄링이 중단간 지연에 미치는 영향을 평가하기 위하여 랜덤 링크 스케줄링에 의한 중단간 패킷 전송 지연을 분석한다.

4.2.1. 랜덤 및 순차적 링크 스케줄링

다중 홉 환경을 특징으로 하는 무선 센서 네트워크는 앞 절에서 설명한 큐잉 지연뿐만 아니라 한 플로우에서 할당된 슬롯의 순서가 순차적이지 못할 경우 추가적인 패킷 전송 지연을 경험할 수 있다. 그림 4는 랜덤 링크 스케줄링과 순차적 링크 스케줄링의 예를 보여 준다. 그림 4(가)에서, p_1 , p_2 , p_3 및 p_4 는 한 플로우에 4개의 노드가 존재한다는 것을 의미한다. 이 때, p_1 은 소스 노드, p_2 및 p_3 은 Relay Node, p_4 는 목적지 노드를 의미한다. e_1 , e_2 및 e_3 는 각 노드 간 링크를 의미한다. 그림 4(나)처럼

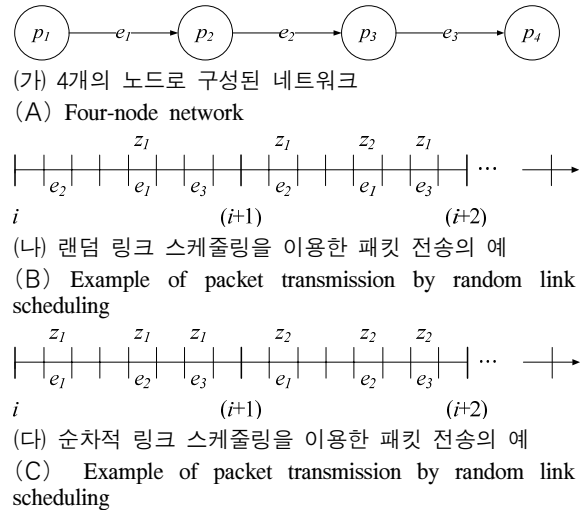


그림 4. 랜덤/순차적 링크 스케줄링을 이용한 패킷 전송의 예 Fig. 4. Examples of packet transmission by random/sequential link scheduling

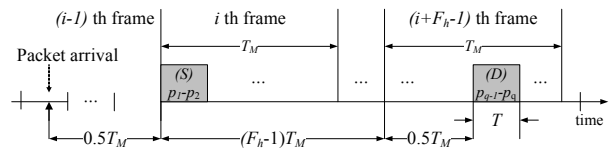


그림 5. 랜덤 링크 스케줄링의 지연 요소 Fig. 5. Delay components of random link scheduling

럼 임의의 플로우에 대한 슬롯 할당 순서가 $e_2e_1e_3$ 이라고 가정하자. 소스 노드 p_1 은 e_1 에 대한 슬롯 할당이 e_2 이후에 되었기 때문에, i 번째 프레임에서 패킷 z_1 은 p_2 까지 밖에 전송 되지 못한다. 결국, 패킷 z_1 은 $i+1$ 번째 프레임이 되어야 p_4 까지 전송이 될 수 있다. 소스 노드가 목적지 노드에게 패킷 한 개를 전송하기 위해 필요한 프레임의 개수를 ‘프레임 지연’으로 정의하면, 이 경우의 프레임 지연은 ‘2’이다. 그러나, 그림 4(다)에서처럼, 만일 $e_1e_2e_3$ 순으로 슬롯이 할당 된다면 p_4 는 i 번째 프레임에서 패킷 z_1 을 수신할 수 있다. 이 때 프레임 지연은 ‘1’이다. 따라서, 한 플로우에 대한 슬롯 할당을 수행할 때 각 링크에 대한 슬롯 할당이 랜덤 할 경우 프레임 지연이 증가되어 중단간 패킷 전송 지연 시간에 큰 영향을 줄 수 있다.

4.2.2. 랜덤 링크 스케줄링에 의한 지연 분석

본 논문에서는, 랜덤 링크 스케줄링에 의한 중단간 패킷 전송 지연을 수학적으로 분석하기 위하여 모든 소스 노드 및 목적지 노드 쌍(pair) 사이의 트

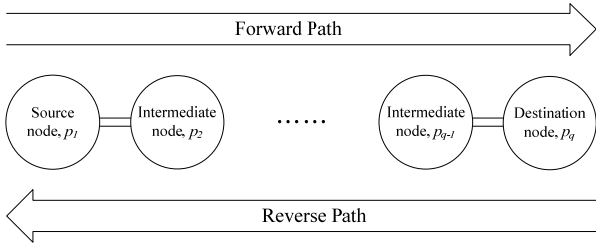


그림 6. 제안한 다중 홉 전송 기법을 위한 용어의 예
Fig. 6. Some terminologies for proposed multihop transmission scheme.

래픽 플로우는 균등하고 새로운 패킷 도착의 프로세스는 서로 독립적이라고 가정한다. 따라서, 본 논문에서는 한 노드의 특성에 중점을 두어 종단간 패킷 전송 지연 분석을 진행한다. 매 프레임마다 임의의 슬롯에서 패킷이 도착 한다고 가정하면, 하나의 패킷에 의한 종단간 패킷 전송 지연은 다음과 같이 3가지 요소로 정의 될 수 있다.

- (1) 한 프레임 내에서 패킷의 도착 시간과 그 프레임의 끝 사이의 시간.
- (2) 소스 노드에서 목적지 노드까지 하나의 패킷을 전송하기 위해 반복된 프레임의 수.
- (3) 하나의 패킷을 전송할 때 마지막 프레임의 시작 시점과 목적지 노드에서 해당 패킷의 수신 시점 사이의 시간.

그림 5는 랜덤 링크 스케줄링의 종단간 패킷 전송 지연 요소를 나타낸다. 먼저, 모든 프레임 길이가 동일하고 패킷이 한 프레임 내에서 임의로 도착한다고 가정하면, 첫 번째 구성 요소는 $0.5 T_M$ 이다. 이 때, T_M 은 하나의 프레임 크기를 의미한다. 다음으로 한 프레임 내에서 목적지 노드의 슬롯 할당이 랜덤하게 수행된다면 세 번째 구성요소의 값은 $0.5 T_M + T$ 이다. 이 때, T 는 단위 슬롯 크기를 의미한다. 마지막으로 평균 프레임 지연 $F_h (h \geq 2)$ 는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$F_h = \frac{\prod_{k=3}^{h+1} k}{h!} = \frac{h+1}{2}. \quad (1)$$

증명: 슬롯 할당이 랜덤하게 수행되고 홉(h) 수가 3이면, 랜덤하게 할당될 수 있는 모든 경우의 수는 $6(3!)$ 이다. 모든 경우의 수에 대하여 프레임 지연을 나열하면 프레임 내에서 각 링크의 할당 순서에 따라 $T_M(e_1 e_2 e_3)$,

$$2 T_M(e_1 e_3 e_2, e_2 e_1 e_3, e_2 e_3 e_1, e_3 e_1 e_2) \text{ 및}$$

$3 T_M(e_3 e_2 e_1)$ 이다. 그러므로, 소스 노드와 목적지 노드 사이의 홉 수가 3일 때의 프레임 지연 F_3 은 $12 T_M/3 = 2 T_M$ 이다. 모든 홉($h \geq 2$) 수에 대하여 프레임 지연을 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} F_2 &= 3 T_M/2!, \\ F_3 &= 12 T_M/3!, \\ F_4 &= 60 T_M/4!, \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 하나의 패킷에 의한 종단간 패킷 전송 지연 시간 D 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D &= 0.5 T_M + (F_h - 1) T_M + 0.5 T_M + T \\ &= F_h T_M + T. \end{aligned} \quad (3)$$

V. 제안하는 다중 홉 전송 기법

본 절에서는 무선 센서 네트워크에서 발생할 수 있는 두 가지 지연 요인을 해결하기 위한 순차적 스케줄링 기법을 제안한다. 먼저, 네트워크 내에 존재하는 모든 노드의 시간 동기가 일치한다고 가정한다. 제안하는 순차적 스케줄링 기법의 두 가지 주요 특징은 다음과 같다. 첫 째, 제안하는 스케줄링 기법은 아웃바운드 링크로 나가는 플로우마다 서로 다른 슬롯을 할당한다. 이러한 개별적인 슬롯 할당은 프레임 크기가 증가한다는 단점이 있지만 반대로 큐잉 지연을 제거할 수 있다는 장점이 있다. 두 번째, 제안하는 스케줄링 기법은 라우팅 과정에서 라우팅 테이블 정보를 기반으로 목적지 노드부터 슬롯을 할당하여 한 플로우 내에 있는 노드들이 그림 4(C)의 예와 같이 순차적으로 슬롯을 할당할 수 있도록 해준다. 이러한 슬롯 할당은 랜덤 링크 스케줄링에서 발생하는 프레임 지연을 최소화 시켜 종단간 패킷 전송 지연을 줄일 수 있다. 먼저, 초기 프레임 크기(슬롯의 수)는 네트워크 내의 모든 노드가 슬롯을 할당할 수 있을 정도로 충분히 크다고 가정한다. 본 논문에서는 다중 홉 슬롯 할당 과정을 수행하기 위하여 SA-REQ(slot assignment request) 패킷과 SA-RES(slot assignment response) 패킷이 이용되며 다음과 같은 용어들이 사용된다.

- Forward/Reverse Path : 목적지 노드/소스 노드의 패스
- TN/RN : 할당된 슬롯에서 한 노드와 그 노드의 이웃 노드 사이에서 전송 노드/수신 노드

Algorithm 1. Slot assignment in a destination node

```

1  if  $k = q$  then
2     $p_k$  reserves the slots for both  $p_{k-1}$  and  $p_k$  as a
      RN.
3     $p_k$  sends the SA-RES packet with Assigned
      Slot Index to  $p_{k-1}$ .
   end if
    
```

Algorithm 2. Slot assignment in an intermediate/a source node

```

1  if  $k = 1$  then
2    Based on Assigned Slot Index,  $p_1$  reserves the
      slots for both  $p_1$  and  $p_2$  as a TN.
3     $p_1$  begins to send data in the assigned slots.
4  else if  $1 < k < q$  then
5    Based on Assigned Slot Index,  $p_k$  reserves the
      slots for both  $p_k$  and  $p_{k+1}$  as a TN.
6     $p_k$  reserves the slots for both  $p_{k-1}$  and  $p_k$  as a
      RN.
7     $p_k$  sends the SA-RES packet with Assigned
      Slot Index to  $p_{k-1}$ .
   end if
    
```

- Assigned Slot Index : DCH에서 할당된 슬롯 인덱스
- Next Node : 임의의 노드가 Reverse Path에서 SA-RES 패킷을 전송할 이웃 노드, 또는 Forward Path에서 데이터 패킷을 전송할 이웃 노드
- Previous Node : Forward Path에서 자신에게 SA-REQ 패킷을 전송한 이웃 노드

그림 6은 앞서 언급한 용어들 중 Forward/Reverse Path에 대한 개념도를 나타낸다. 예를 들어 그림 6의 Forward Path에서 $q \geq 3$ 일 때, 임의의 노드 p_k 에 대해서 p_{k-1} 은 p_k 의 Previous Node이고 p_{k+1} 은 p_k 의 Next Node이다. 다중 홉 슬롯 할당 과정을 설명하면 다음과 같다. 만일 소스 노드가 전송할 패킷이 있으면 SA-REQ 패킷을 브로드캐스팅(broadcasting)한다. SA-REQ 패킷 전송 방식은 IEEE 802.11s에서 사용되는 PREQ(path request) 패킷의 전송 방식과 동일하다^[10]. 만일 임의의 노드가 SA-REQ 패킷을 수신하면, Reverse Path 테이블을 생성한 후 해당 패킷을 브로드 캐스팅 한다. Reverse Path 테이블은 소스 노드 주소, 목적지 노드 주소, Previous Node 주소를 포함한다. Reverse Path 테이블에 포함된 Previous Node 주소는 노드가 추 후 Reverse Path로 SA-RES 패킷을 전송할 때 Next Node 주소로 활용된다. 임의의 Relay Node는 하나 이상의 Previous Node가 존재

할 수 있는데, Relay Node는 자신에게 가장 먼저 SA-REQ 패킷을 전송한 Previous Node의 주소를 추 후 SA-RES 패킷을 전송할 때의 Next Node 주소로 설정한다. SA-RES 패킷은 Assigned Slot Index와 Next Node 주소를 포함한다. Algorithm 1은 Forward Path에서 임의의 목적지 노드가 SA-REQ 패킷을 수신하였을 때의 다중 홉 슬롯 할당 과정을 나타낸다. Algorithm 2는 Reverse Path에서 임의의 소스 노드 또는 Relay Node가 SA-RES{Next Node 주소, Assigned Slot Index} 패킷을 수신하였을 때의 다중 홉 슬롯 할당 과정을 나타낸다. 임의의 소스 노드 또는 Relay Node는 이웃 노드로부터 SA-RES 패킷을 수신하면 Algorithm 2를 실행하여 슬롯을 예약한다. 제안한 슬롯 할당 방식은 목적지 노드가 프레임 내에서 가용한 슬롯 중 가능한 한 오른쪽 슬롯을 먼저 할당하고, 이 후 SA-RES 패킷을 수신한 노드들은 SA-RES 패킷 내의 Assigned Slot Index 보다 왼쪽에 위치한 슬롯을 할당함으로써, 소스 노드부터 목적지 노드로의 슬롯 할당이 순차적이 되도록 한다.

VI. 성능 평가

본 장에서는 제안한 순차적 스케줄링 기법의 성능을 OPNET 모의실험을 통하여 평가하고, 랜덤 링크 스케줄링 방식과 종단간 패킷 전송 지연의 관점에서 비교 한다.

6.1. 모의실험 시나리오

본 절에서는 제안한 순차적 스케줄링 기법과 기존의 랜덤 스케줄링 기법의 성능을 평가하기 위한 모의실험 시나리오를 설명한다. 네트워크 크기는 가로, 세로 각각 200미터이며 총 100개의 노드가 임의로 분포된다. 네트워크의 밀집도(density)를 변경하기 위하여 노드의 통신 거리를 60 미터에서 25 미터까지 가변 시킨다. 노드의 통신 거리가 감소하면, 간접 노드의 수가 감소하고 결과적으로 프레임 크기가 작아진다. 표 1은 통신 거리에 따른 프레임 크기를 나타낸다. 네트워크 내의 모든 노드가 일정 시간 동안 다중 홉 슬롯 과정을 모두 완료 하면, 하나의 패킷을 생성하여 할당된 슬롯에서 패킷을 전송한다. 만일 Relay Node가 임의의 플로우에 대해 Previous Node로부터 패킷을 수신하면, 해당 플로우를 위해 할당된 슬롯에서 수신한 패킷을 Next Node에게 전송한다. 본 논문에서는, 랜덤/순차적 스

케줄링 기법의 성능 평가를 위하여 5종류의 서로 다른 밀집도와 10개의 서로 다른 랜덤한 토폴로지를 생성하여 모의실험을 수행하고, 도출된 결과의 평균값을 성능 지표로 정한다.

6.2. 성능 평가 결과

그림 7은 소스 노드와 목적지 노드 사이의 평균 홉 수가 증가함에 따라, 제안하는 스케줄링 기법과 기존의 랜덤 스케줄링 기법의 종단간 패킷 전송 지연을 나타낸다. 그림 7에서 N 은 프레임 크기를 의미한다. 모의실험 결과에 따르면, 평균 홉 수가 2.02일 때 제안한 기법이 랜덤 스케줄링 기법보다 더 큰 종단간 평균 지연을 보임을 알 수 있다. 제안한 스케줄링 기법은 다중 홉 슬롯 할당 과정을 수행할 때 순차적인 슬롯 할당을 위해 프레임의 가장 오른쪽에 존재하는 빈 슬롯을 우선적으로 할당한다. 따라서, 평균 홉 수가 2.02홉 일 때 랜덤 스케줄링에 의한 지연 영향이 작아 랜덤 스케줄링 기법의 지연 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 그러나, 평균 홉 수가 증가함에 따라 랜덤 스케줄링에 의한 지연이 증가하기 때문에 제안하는 스케줄링 기법의 종단간 패킷 전송 지연 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 한편, 그림 7에서 평균 홉 수가 증가함에 따라 제안하는 스케줄링 기법의 종단간 패킷 전송 지연이 감소하는 특징을 보임을 알 수 있다. 본 논문에서는 통신 거리를 감소시킴으로써 소스 노드와 목적지 노드 사이의 평균 홉 수를 증가시킨다. 통신 거리가 감소하면 노드의 평균 이웃 노드의 수가 감소한다. 따라서, 간섭을 주는 노드의 수가 감소하게 되므로 프레임 크기가 감소한다. 랜덤 스케줄링 기법을 사용할 때도 프레임 크기가 감소를 하지만, 랜덤 스케줄링 기법은 평균 홉 수가 증가함에 따라 큐잉 지연과 랜덤 스케줄링에 의한 지연 영향이 훨씬 더 크기 때문에 종단간 패킷 전송 지연이 증가하는 특성을 보인다.

VII. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 발생 가능한 두 가지 지연 요인을 해결하기 위하여, 지연에 민감한 이벤트 정보의 다중 홉 전송을 위한 순차적 링크 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 큐잉 지연을 해결하기 위하여 인바운드 링크에 존

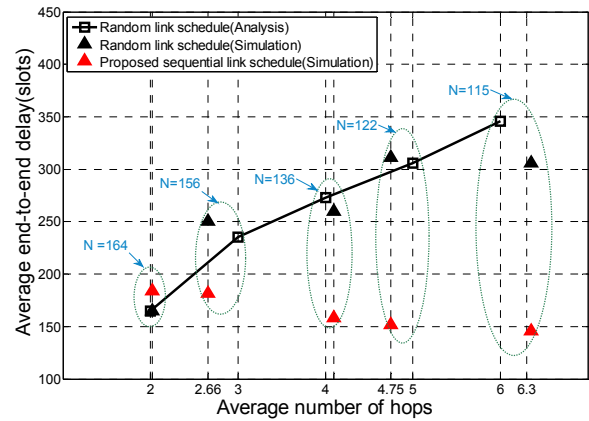


그림 7. 평균 홉 수에 따른 종단간 패킷 전송 지연
Fig. 7. End-to-end delay vs. average number of hops

표 1. 통신 거리에 따른 프레임 크기
Table 1. Frame sizes for communication ranges.

| Communication range (meters) | 60 | 50 | 40 | 30 | 25 |
|------------------------------|------|------|------|------|-----|
| Avg. hop distance | 2.02 | 2.66 | 4.1 | 4.75 | 6.3 |
| One-hop degree | 22.6 | 16.8 | 11.5 | 6.6 | 4.5 |
| Frame size | 164 | 156 | 136 | 122 | 115 |

재하는 플로우 개수 만큼 슬롯을 할당하고, 랜덤 스케줄링에 의한 지연을 해결하기 위하여 라우팅 정보를 이용한 다중 홉 슬롯 할당 과정을 수행한다. 성능 분석 결과, 제안하는 순차적 스케줄링 방식의 종단간 패킷 전송은 한 프레임 내에서 가능하지만, 랜덤 링크 스케줄링 기법은 평균 홉 수가 증가함에 따라 종단간 패킷 전송 지연이 증가함을 알 수 있었다. 소스 노드와 목적지 노드 사이의 평균 홉 수가 2.66, 4.1, 4.75, 및 6.3일 때 제안하는 순차적 스케줄링 기법은 랜덤 스케줄링 기법에 비해 종단간 패킷 전송 지연이 각각 22%, 36%, 48%, 및 55% 감소함을 알 수 있었다.

References

- [1] S. Gandham, M. Dawande, and R. Prakash, "Link scheduling in sensor networks: distributed edge coloring revisited," in *Proc. INFOCOM*, pp. 2492-2501, Mar. 2005.
- [2] A. Panconesi and A. Srinivasan, "Improved distributed algorithms for coloring and Network decomposition problems," in *Proc. ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 581-592, May 1992.
- [3] D. A. Grable and A. Panconesi, "Nearly optimal

distributed edge colouring in $O(\log \log n)$ rounds," in *Proc. ACM SIAM symposium on Discrete algorithms*, Jan. 1997.

- [4] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. Pottie, "Protocols for selforganization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 5, pp. 16-27, 2000.
- [5] J. Misra and D. Gries, "A constructive proof of vizing's theorem," *Information Processing Letter*, vol. 41, pp. 131-133, Mar. 1992.
- [6] M. V. Madhav, A. Panconesi, and L. D. Risinger, "An experimental study of a simple, distributed edge coloring algorithm," in *Proc. 12th annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures*, pp. 166-175, Oct. 2000.
- [7] S. Ramanathan, "A unified framework and algorithm for channel assignment in wireless networks," *Wireless Networks*, pp. 81-94, Apr. 1999.
- [8] P. Djukic and S. Valaee, "Delay aware link scheduling for multi-hop TDMA wireless networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 17, no. 3, Jun. 2009, pp. 870-883.
- [9] M. Trung and J. H. Mo, "A multichannel TDMA MAC protocol to reduce end-to-end delay in wireless mesh networks," *ETRI Journal*, vol. 32, no. 5, pp. 819-822, Oct. 2010.
- [10] IEEE 802.11s. Draft Amendment: ESS Mesh Networking, Nov. 2006.

차 재 룡 (Jae-Ryong Cha)



2004년 아주대학교 전자공학부 졸업
 2006년 아주대학교 전자공학부 석사
 2006년 3월~현재 아주대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> RIFD, 네트워크 코딩, WLAN, 무선망 QoS, Ad-hoc, WMN, WSN 등.

김 재 현 (Jae-Hyun Kim)



1987년~1996년 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사 졸업
 1997년~1998년 미국UCLA 전기전자과 박사 후 연수
 1998년~2003년 Bell Labs, Performance Modeling and

QoS Management Group, 연구원
 2003년~현재 아주대학교 전자공학부 교수
 <관심분야> 무선인터넷 QoS, MAC 프로토콜, IEEE 802.11/15/16/20, 3GPP, 국방 기술네트워크 등.