

무선 센서 네트워크에서 듀티사이클 조절을 통한 혼잡 제어 기법

정희원 이 동 호*, 종신회원 정 광 수*

A Congestion Control Scheme Using Duty-Cycle Adjustment in Wireless Sensor Networks

Dongho Lee* *Regular Member*, Kwangsue Chung* *Lifelong Member*

요 약

무선 센서 네트워크에서는 다대일로 수렴하는 상향 트래픽의 특성으로 인해 네트워크의 혼잡이 빈번히 발생한다. 기존에 제안된 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어 기법은 혼잡 발생 시 전송 주기 변경을 통해 혼잡을 회피할 수 있으나 MAC(Medium Access Control) 계층의 듀티사이클 동작에 대한 고려가 부족하였다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어를 위하여 네트워크의 트래픽에 따라 센서 노드의 듀티사이클을 적응적으로 변화시키는 DCA(Duty-cycle Based Congestion Avoidance) 기법을 제안하였다. DCA 기법은 듀티사이클 조절을 이용하여 혼잡 발생 시 수신 노드의 패킷 수신율 증가를 통한 리소스 제어를 수행하고 송신 노드의 패킷 전송률 감소인 트래픽 제어를 수행하여 혼잡을 회피한다. 실험을 통해 DCA 기법은 듀티사이클 기반의 센서 네트워크에서 에너지 효율성으로 동작하며 혼잡 제어로 인해 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Wireless Sensor Networks, Congestion Control, Resource Control, Duty-cycle Adjustment

ABSTRACT

In wireless sensor networks, due to the many-to-one convergence of upstream traffic, congestion more probably appears. The existing congestion control protocols avoid congestion by controlling incoming traffic, but the duty-cycle operation of MAC(Medium Access Control) layer has not considered. In this paper, we propose DCA(Duty-cycle Based Congestion Avoidance), an energy efficient congestion control scheme using duty-cycle adjustment for wireless sensor networks. The DCA scheme uses both a resource control approach by increasing the packet reception rate of the receiving node and a traffic control approach by decreasing the packet transmission rate of the sending node for the congestion avoidance. Our results show that the DCA operates energy efficiently and achieves reliability by its congestion control scheme in duty-cycled wireless sensor networks.

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 기존 네트워크보다 많은

수의 노드로 구성되며 노드 배치의 밀집도가 높은 특징을 갖는다. 센싱 필드에 배치된 많은 센서 노드는 환경 정보, 혹은 이벤트를 탐지하여 이를 의미

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행된 연구(2008-S-041-01, u-City용 센서네트워크 PHY/MAC 개발)와 지식경제부, 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

* 광운대학교 전자통신공학과 컴퓨터통신 연구실(dhlee@adams.kw.ac.kr, kchung@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-10-523, 접수일자 : 2009년 10월 31일, 최종논문접수일자 : 2009년 12월 22일

있는 정보로 가공하고 멀티홉을 통해 소수의 싱크 노드로 전달한다. 이와 같은 통신 구조로 인해 무선 센서 네트워크는 기존 네트워크와는 상이한 트래픽 구조를 갖는다^[1].

무선 센서 네트워크의 대부분을 차지하는 트래픽은 센서 노드에서 싱크노드로 향하는 상향 트래픽으로 주로 센싱 등의 태스크 수행 결과를 전달하기 위하여 사용되며 다대일로 수렴하는 특성을 보인다. 상향 트래픽의 폭주로 인하여 네트워크 혼잡이 발생하게 되면 패킷 손실 및 높은 전송 지연을 야기한다. 이러한 현상은 전체 센서네트워크의 에너지 효율성을 떨어뜨리며 응용의 QoS(Quality of Service)에 영향을 미친다. 따라서 무선 센서 네트워크에서 상향 트래픽으로 인해 발생하는 혼잡을 제어하기 위한 기법은 반드시 필요하며 많은 연구가 진행되고 있다^[2].

기존의 혼잡 제어 기법은 트래픽 제어 기법과 리소스 제어 기법으로 나뉜다. 트래픽 제어 기법은 트래픽의 양이나 버퍼의 상태를 모니터링하여 혼잡을 감지하고 이를 센서 노드에게 통지하여 센서 노드의 트래픽을 조절을 통하여 혼잡을 완화시킨다^[3]. 트래픽 제어를 통한 혼잡 제어는 사용 가능한 리소스에 맞추어 적절히 혼잡 제어를 수행할 수 있으나 센서 네트워크 응용에서 요구하는 전송률을 변경하게 되므로 Fidelity를 위반할 수 있다는 단점이 있다. 리소스 제어 기법은 혼잡 발생 시 사용 가능한 리소스의 양을 요구되는 트래픽에 맞게 증가시켜 혼잡을 처리하는 기법이다. 이와 같은 리소스 제어 기법은 응용의 Fidelity를 위반하지 않고 혼잡을 제어할 수 있다^[4]. 하지만 리소스의 제약이 많은 무선 센서 네트워크에서 제어 가능한 리소스의 선택에는 한계가 존재한다. 기존 연구로 주로 유희 노드를 이용한 멀티홉스 기반의 리소스 제어 기법이 제안되었으나 이는 토폴로지의 특성에 따라 제어 가능 여부가 결정된다는 한계를 갖는다.

기존의 혼잡 제어 기법은 듀티사이클 기반으로 동작하는 무선 센서 네트워크의 MAC(Medium Access Control) 계층에 대한 고려가 부족하다는 단점을 갖는다. 듀티사이클 기반의 MAC 프로토콜을 이용하는 센서 노드는 주기적으로 활성 상태와 수면 상태를 반복하면서 활성 상태일 때 무선 송수신기에 전력을 공급하여 통신을 수행하고 수면 상태일 때는 무선 송수신기의 전력을 차단하는 방식으로 동작한다. 듀티사이클 없이 MAC 프로토콜을 설계할 경우 Idle Listening으로 인한 에너지 낭비가

심각해지므로 듀티사이클은 센서 네트워크 설계 시 반드시 고려하여야 할 요소이다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어를 위하여 네트워크의 트래픽에 따라 센서 노드의 듀티사이클을 적응적으로 변화시키는 DCA(Duty-cycle Based Congestion Avoidance) 기법을 제안한다. DCA 기법은 듀티 사이클의 활성 상태 시간을 리소스로 간주하여 혼잡 발생 시 활성 상태 시간을 트래픽의 양에 맞게 조정하여 혼잡을 완화시킨다. 또한 활성 상태 시간 조정으로 모든 트래픽을 수용할 수 없을 경우 상향 전송 노드에서 트래픽 제어를 수행하여 혼잡을 처리한다. 이를 통해 DCA는 듀티 사이클 기반의 무선 센서 네트워크에서 네트워크 혼잡으로 인한 패킷 손실, 전송 지연을 줄이고 신뢰성 및 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다.

본 논문의 2장에서는 무선 센서 네트워크에서의 혼잡 제어 기법 및 듀티 사이클에 대한 관련 연구를 기술하였고 3장에서는 제안하는 DCA 기법에 대해 상세히 기술하였다. 4장에서는 DCA 기법의 성능을 평가하였으며 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

II. 관련 연구

2.1 혼잡 제어 기법

무선 센서 네트워크에서 혼잡이 일어나는 요인을 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 Incoming 트래픽이 Outgoing 트래픽을 초과하기 때문으로, 주로 싱크노드에 가까이 위치한 센서 노드에서 이러한 현상이 많이 발생하게 되는데 이것을 Sink Hot Spot이라고 한다. 두 번째 요인은 경쟁, 간섭, 비트 에러율의 측면에서의 링크 레벨 성능 때문이다. 품질이 좋지 않은 링크에서는 이러한 현상으로 인한 혼잡이 빈번히 발생한다.

무선 센서 네트워크에서의 혼잡은 에너지 효율과 응용의 QoS에 직접적인 영향을 끼친다. 예를 들어 혼잡은 매우 큰 큐잉 지연과 높은 패킷 손실을 발생시킬 수 있는 버퍼 오버플로우를 발생시킨다. 또한 발생한 손실에 대한 복구를 위해 에너지의 낭비가 발생한다. 따라서 무선 센서 네트워크에서 혼잡은 위와 같은 요인들을 완화하거나 피하는 방법으로 효율적으로 제어해야 한다.

기존의 혼잡 제어 기법은 트래픽 제어 기법과 리소스 제어 기법으로 나뉜다. 트래픽 제어 기법은 트래픽의 양이나 버퍼의 상태를 모니터링하여 혼잡을

감지하고 이를 센서 노드에게 통지하여 센서 노드의 트래픽을 조절을 통하여 혼잡을 완화시킨다. 트래픽 제어 기법에서의 주요 고려 사항은 리소스의 효율적인 이용과 플로우간 공정성이다. 그림 1(a)는 트래픽 제어 기법의 원리를 나타낸다. 두개의 플로우가 T1과 T2의 트래픽률로 송신을 할 때, 수신자의 리소스보다 트래픽률의 합이 크다면 혼잡이 발생된다. 이때 트래픽 제어에서는 수신자의 리소스인 Resource Line 안쪽으로 트래픽률을 이동시켜야 하며 각 플로우간 공정성을 보장해주기 위해 Fairness Line에 트래픽률을 위치시키게 된다.

리소스 제어 기법은 혼잡 발생 시 사용 가능한 리소스의 양을 요구되는 트래픽에 맞게 증가시켜 혼잡을 처리하는 기법이다. 그림 1(b)는 리소스 제어 기법의 원리를 나타낸다. 수신자에게 주어진 리소스보다 요구되는 트래픽이 더 많을 때 수신자는 리소스를 트래픽에 맞추어 증가시켜 혼잡을 회피한다^[4].

무선 센서 네트워크에서 혼잡 제어에 관한 기존 연구는 주로 트래픽 제어 기반의 혼잡 제어 기법을 제안하였다. ESRT(Event to Sink Reliable Transport)^[3]는 트래픽의 양을 변화시키며 그에 따른 신뢰도를 측정하여 가장 신뢰도가 높으며 혼잡이 발생하지 않는 최적의 동작 구간을 찾는다. 그 후, 네트워크 트래픽의 양이 너무 많거나 적을 때 최적의 동작 구간의 전송률로 점진적으로 변화하여 혼잡을 회피한다. STCP(Sensor Transmission Control Protocol)^[5]는 싱크 노드에서 동작하는 신뢰적인 전송 프로토콜로 다수의 응용에서 요구하는 전송률 및 신뢰성 정도에 따른 혼잡 제어를 수행한다. STCP는 중간 노드에서 트래픽을 모니터링하여 혼잡을 판별하고 이를 전송 패킷의 헤더에 Piggybacking하여 싱크 노드에게 혼잡의 발생을 알린다. 싱크 노드는 각 노드의 전송률 변경을 요구하여 혼잡을 회피한다. PCCP(Priority-Based Congestion Control)^[2]는 Hop-by-hop 기반의 혼잡 제어 프로토콜로 패킷의

Inter-arrival 시간과 서비스 시간의 차를 이용하여 혼잡을 측정한다. 혼잡이 측정되면 ICN(Implicit Congestion Notification)을 통해 혼잡을 통지하고, 통지받은 노드는 MAC 계층의 전송률을 조절하여 혼잡을 회피한다. PCCP는 또한 각 노드의 우선순위에 따라 다른 전송률을 제공하여 Weighted Fairness를 이룰 수 있다. 이와 같은 트래픽 제어 기반의 혼잡 제어 기법은 효과적으로 혼잡을 완화할 수 있으나 응용에서 의미 있는 정보 파악을 위해 요구하는 각 노드의 데이터 전송률을 변화시키게 되므로 정밀도가 떨어지게 되어 센서 네트워크는 제 기능을 발휘할 수 없게 된다.

TARA(Topology-Aware Resource Control)^[4]는 리소스 제어 기법을 사용한 혼잡 제어 기법으로 혼잡 제어를 위하여 휴면중인 임의의 수의 노드를 활성화 시켜서 우회 경로로 사용한다. 이와 같이 네트워크상의 휴면 노드를 이용하기 위해서는 네트워크의 토폴로지를 인지하는 것이 중요하다. 또한 다양한 혼잡 발생 토폴로지를 가정하여 그에 알맞은 트래픽 분산 방법을 제시한다. TARA는 응용의 Fidelity 요구를 만족시키면서 혼잡을 완화할 수 있으나 토폴로지 인지를 위한 오버헤드가 크고, 트래픽 분산을 위한 정확한 알고리즘이 제시되지 않았다는 단점을 갖는다.

TADR(Traffic-aware dynamic routing)^[6]은 포텐셜 기반의 트래픽 인지 동적 라우팅 알고리즘으로 네트워크를 포텐셜 필드로 정의하고 혼잡 발생 시 혼잡 지점을 인식하여 이를 우회하는 경로를 사용하여 혼잡을 회피한다. 기본적인 라우팅 백본 설정을 위해 각 노드의 깊이를 사용하고 혼잡 감지 및 트래픽 인지를 위하여 큐의 길이를 사용한다. 이와 같은 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법은 혼잡 발생 시 우회 경로를 사용하여 트래픽의 공간적 분산이 가능하며 또한 우회 경로가 없을 경우 전송 억제를 이용하여 트래픽의 공간적 분산이 가능하다. 하지만 TADR은 혼잡의 회피를 위해 하나의 대체경로만을 사용하게 되므로 네트워크 토폴로지의 리소스를 최대한 사용하지 못하는 단점을 갖는다.

리소스 제어 기반의 혼잡 제어 기법은 주로 유휴 노드의 통신 자원을 사용하여 혼잡이 발생할 때 트래픽을 대체 경로로 우회시켜 혼잡을 회피한다. 이는 대체 경로가 많이 발생할 수 있는 조밀한 네트워크를 가정한 것이나 토폴로지에 따라 대체 경로의 이용 가능성이 다를 수 있으며, 또한 대체 경로를 탐색하기 위한 비용이 높다는 단점이 있다. 따라

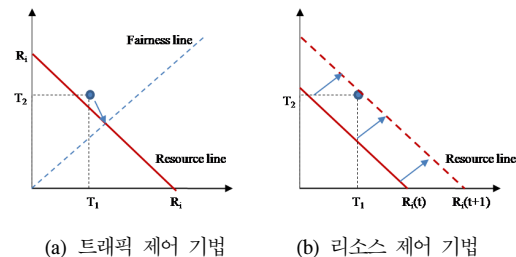


그림 1. 혼잡제어 기법의 원리

서 본 논문에서는 듀티사이클의 활성 상태 시간을 리소스로 간주하여 이를 통한 혼잡 제어를 수행한다. 듀티사이클의 활성 상태 시간은 지역적으로 변경 가능한 리소스이며 리소스 제어를 위한 추가 오버헤드가 크지 않다. 또한 듀티사이클 기반의 MAC 프로토콜이 사용되므로 에너지 효율적인 동작이 가능하다.

2.2 듀티사이클 파라미터

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜에서는 낮은 듀티사이클 동작이 에너지 소모를 줄이는 효과적인 방법으로 널리 사용되고 있다. 듀티사이클을 이용하여 각 센서 노드는 주기적으로 활성 상태와 수면 상태를 반복하면서 활성 상태일 때 무선 송수신기에 전력을 공급하여 통신을 수행하고 수면 상태일 때는 무선 송수신기의 전력을 차단하여 통신에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있다^[7].

무선 센서 네트워크에서 듀티 사이클을 이용한 MAC 프로토콜을 동기 방식과 비동기 방식으로 구분할 수 있다. S-MAC^[7], T-MAC^[8], D-MAC^[9] 등이 주기적인 동기 신호에 따라 듀티 사이클을 관리하는 대표적인 동기 방식의 프로토콜이고 B-MAC^[10], WiseMAC^[11]은 Preamble Sampling을 통해 수신 노드를 깨우는 대표적인 비동기 방식의 프로토콜이다. 동기 방식에서의 센서 노드 간 듀티 사이클 동기화는 구현에 있어서 복잡성이 높으므로 비교적 구현이 단순한 비동기 방식의 MAC 프로토콜이 널리 이용되고 있다. 하지만 비동기 방식에서 수신 노드를 깨우기 위해 듀티 사이클의 수면 상태 시간만큼의 Long Preamble을 사용함에 따라 송신 지연의 문제가 발생할 수 있고, 잠재적 수신 노드들의 Overhearing으로 인해 추가적인 에너지 소모 문제가 발생할 수 있다.

AS-MAC^[12] 프로토콜에서는 듀티사이클을 정의하기 위해 두 가지 파라미터를 고려한다. Uptime은 노드가 활성 상태를 유지하는 시간을 의미하고, Wake-up Interval은 두 활성 상태 사이의 시간 간격을 의미한다. 이 두 가지 파라미터는 에너지 효율을 위하여 신중하게 정의되어야 한다. Uptime이 짧을수록 에너지 효율성은 증가하며 Wake-up Interval은 길수록 더 많은 시간동안 수면 상태를 유지할 수 있어 에너지 효율성이 증가한다.

본 논문에서는 듀티사이클의 파라미터를 세 가지로 정의한다. D_{ACTIVE} 는 활성 상태의 유지 시간으로 짧을수록 에너지 효율성이 증가하지만 한 사이클의

패킷 처리량은 감소한다. 따라서 D_{MIN_ACTIVE} 와 D_{MAX_ACTIVE} 를 Threshold 값으로 두어 최소한의 에너지 효율성 및 패킷 처리량을 보장한다. D_{CYCLE} 은 한 듀티사이클의 주기로 그 값이 증가할수록 에너지 효율성은 증가하나 전송률은 감소한다. T_{START} 는 활성 상태의 시작 시점을 의미하며 각 노드의 값의 차이에 의해 Sleep Delay가 증가하거나 감소할 수 있다. 그림 2는 본 논문에서 정의한 듀티사이클의 파라미터를 나타낸다.

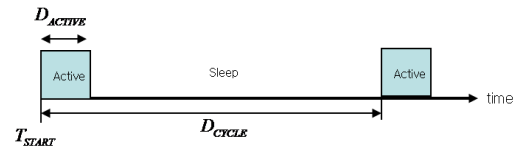


그림 2. 듀티사이클 파라미터

III. DCA(Duty-cycle Based Congestion Avoidance) 기법

3.1 DCA 동작 구조

혼잡 제어 기법은 일반적으로 혼잡 탐지, 혼잡 통지, 전송률 조절과 같은 세 가지의 동작 과정으로 이루어지며 제안된 기법마다 다양한 방식을 이용하여 세 가지 동작을 수행한다. 제안하는 DCA 기법은 듀티사이클 조절을 이용한 혼잡제어 기법으로 MAC 계층의 수신 패킷 정보와 듀티사이클 정보를 이용하여 동작한다. DCA 기법에서의 MAC 프로토콜은 비동기 듀티사이클에 기반을 둔 프로토콜로 가정한다. 또한 네트워크는 트리 기반의 토폴로지라고 가정하여 부모 노드는 자식 노드들의 데이터 전송률에 기반을 두어 혼잡을 감지하고 자신의 듀티사이클을 조정하거나 자식의 전송률을 조절하여 혼잡을 회피한다.

DCA 기법의 내부 구조는 그림 3과 같다. 먼저 DCA는 MAC 계층에서 자식 노드들의 수신 패킷 정보를 이용하여 주기적으로 자신에게 요구되는 서비스 시간을 계산한다. 이때의 서비스 시간 계산 주기는 응용의 특성에 따라 다르게 정의할 수 있다. 예를 들어 네트워크의 변화에 민감한 응용일 경우 짧은 혼잡 제어 주기를 사용하여 혼잡으로 인한 손실을 줄일 수 있다. 계산된 서비스 시간을 근거로 해당 노드는 혼잡을 판별하고 그 결과에 따라 자신의 듀티사이클 조절이 필요할 경우 듀티사이클의 활성 상태 시간을 Threshold 값 내에서 조절한다.

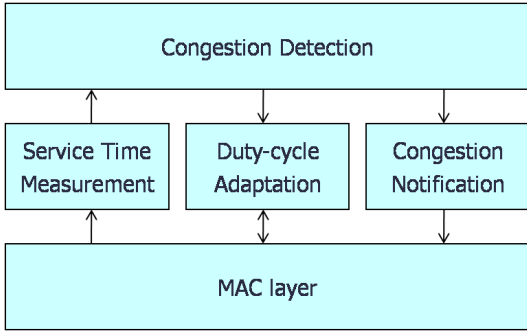


그림 3. DCA 기법 동작 구조

즉 요구되는 트래픽이 현재의 활성 상태 시간에서 처리가 불가능할 경우 요구되는 트래픽에 따라 활성 상태 시간을 증가시킨다. 반대로 요구되는 트래픽의 양이 현재의 활성 상태 시간에 비해 적을 경우 활성 상태 시간을 트래픽에 맞게 감소하여 에너지 효율성을 높인다. 이와 같이 DCA에서는 활성 상태 시간 조절을 통한 리소스 제어 기법을 사용하여 에너지 효율성을 고려하여 혼잡을 회피한다.

혼잡 판별 결과 Threshold 값 이상의 혼잡일 경우에는 활성 상태 시간을 최대 Threshold값으로 정하고 혼잡을 자식 노드에 통지하여 자식 노드의 전송률을 조절한다. 즉 리소스 제어만으로 해결할 수 없는 혼잡의 경우 트래픽 제어를 리소스 제어와 함께 수행한다. 최소한의 트래픽 제어를 수행하므로 트래픽 제어로 인한 Fidelity 위반 문제를 다소 해결할 수 있다.

3.2 혼잡 감지 및 리소스 제어

DCA 기법에서 혼잡 감지는 자식 노드들이 전송하는 패킷에 의해 계산된 요구 서비스 시간과 자신의 패킷 처리 시간의 차로 계산한다. 노드 x 에서 요구되는 서비스 시간인 $s(x)$ 는 식 1과 같다. $D_{CYCLE}(x)$ 는 노드 x 의 한 듀티사이클 주기를 의미하며 N 은 자식 노드의 집합을 의미한다. $T_{inter-arrival}(i)$ 는 i 노드로부터 수신되는 패킷의 평균 도달 시간 간격을 의미한다.

$$s(x) = D_{CYCLE}(x) \times \sum_i^N \frac{1}{T_{inter-arrival}(i)} \quad (1)$$

노드 x 에서의 혼잡 정도를 나타내는 $d(x)$ 는 식 2와 같다. 즉 x 의 패킷 처리시간인 활성 상태 시간과 $s(x)$ 의 차이를 통해 혼잡 정도를 나타낸다. $d(x)$ 값이 0 미만일 경우 트래픽이 초과되어 혼잡이 발생

할 수 있는 상태임을 알 수 있다.

$$d(x) = D_{ACTIVE}(x) - s(x) \quad (2)$$

혼잡 판별 후 활성 상태 시간 조절을 위한 노드의 판단은 식 3과 같이 세 가지로 나뉜다. 첫 번째로 $s(x)$ 값이 활성 상태 최대 시간 값인 D_{MAX_ACTIVE} 를 초과할 경우 새로운 활성 상태 시간 값은 D_{MAX_ACTIVE} 가 된다. 그와 동시에 자식 노드에 피드백을 하여 트래픽 제어를 수행하게 된다. 두 번째로 $s(x)$ 값이 D_{MIN_ACTIVE} 와 D_{MAX_ACTIVE} 사이의 값인 경우 새로운 활성 상태 시간 값은 $s(x)$ 가 된다. 즉 활성 상태 시간의 Threshold 내에서 리소스 제어를 수행하게 된다. 마지막으로 값이 활성 상태 최소 시간 값인 D_{MIN_ACTIVE} 미만일 경우 새로운 활성 상태 시간 값은 D_{MIN_ACTIVE} 가 된다. D_{MIN_ACTIVE} 는 최소한의 패킷 수신을 위한 시간으로 채널이 유휴 상태일 경우 네트워크를 유지하며 에너지 소모를 최소화하기 위해 사용한다. 새롭게 정의된 활성 상태 시간 값인 D_{NEW_ACTIVE} 는 다음 듀티사이클부터 적용되며 다음 혼잡 제어 주기까지 유지된다. 그림 4는 DCA의 혼잡 감지 및 리소스 제어 알고리즘을 나타낸다.

$$D_{NEW_ACTIVE} = \begin{cases} D_{MAX_ACTIVE} & \text{if } s(x) > D_{MAX_ACTIVE} \\ s(x) & \text{if } D_{MIN_ACTIVE} \leq s(x) \leq D_{MAX_ACTIVE} \\ D_{MIN_ACTIVE} & \text{if } s(x) < D_{MIN_ACTIVE} \end{cases} \quad (3)$$

DCA 기법은 활성 상태 시간의 Threshold 이내

```

FOR EACH i IN Children
    s = s + (D_CYCLE * 1 / inter-arrival(i))
ENDFOR
d = D_ACTIVE - s
IF d > 0 THEN
    D_ACTIVE = max(D_MIN-ACTIVE, s)
ELSE
    IF s <= D_MAX-ACTIVE THEN
        D_ACTIVE = min(D_MAX-ACTIVE, s)
    ELSE
        D_ACTIVE = D_MAX-ACTIVE
        c = s / D_MAX-ACTIVE
        broadcast(c)
    ENDIF
ENDIF
    
```

그림 4. DCA 리소스 제어 알고리즘

에서 요구되는 서비스 시간과 활성 상태 시간의 값을 일치시킨다. 즉 해당 노드를 향하는 모든 트래픽에 따라 노드의 사용 가능한 리소스를 조정하여 혼잡 발생을 억제한다. 식 4와 같이 i 노드에서 t 시간에 요구되는 리소스를 t 시간에 수집한 트래픽에 일치시키는 것이 리소스 제어에 의한 추가 에너지 소모를 최소화 시키는 방법이다^[13].

$$R_i(t) = T_i(t) \quad (4)$$

3.3 혼잡 통지 및 트래픽 제어

해당 노드에 요구되는 서비스 시간이 D_{MAX_ACTIVE} 를 초과하게 되면 자신의 패킷 수신율 증가만으로는 요구되는 서비스 시간을 처리할 수 없다. 이때는 자식 노드에게 혼잡을 통지하여 자식 노드의 패킷 전송률을 조절한다. 혼잡 통지 메시지를 자식 노드 집합에 브로드캐스팅하면 수신한 자식 노드는 자신의 패킷 전송률을 조정하게 된다. 혼잡 통지 메시지의 구조는 그림 5와 같다.

혼잡 통지 메시지의 *type* 필드는 메시지가 혼잡 통지임을 나타내고 *src_id* 필드는 혼잡 발생 노드의 아이디를 나타낸다. D_{cycle} 과 D_{active} 필드는 혼잡 노드의 듀티사이클 정보를 알려주고 *change_inter-arrival* 필드는 자식 노드들이 전송하는 패킷 전송 주기의 변화 요구를 나타낸다. 즉 자식 노드의 패킷 시간 간격을 증가시켜 패킷 전송률을 낮추도록 한다. *change_inter-arrival*은 식 5와 같이 구할 수 있다. 부모 노드로부터 혼잡 통지 메시지를 수신한 노드는 *change_inter-arrival*값을 자신의 패킷 전송 주기에 곱하여 새로운 전송률로 패킷 전송을 수행한다. 이와 같은 혼잡 통지 기법은 브로드캐스트 메시지를 사용하므로 컨트롤 오버헤드가 작고, *change_inter-arrival*값을 이용하여 모든 자식 노드는 부모 노드의 리소스에 맞추어 동일한 비율로 자신의 전송률을 줄이게 되므로 경쟁 노드 간 공정성을 제공한다.

$$change_inter-arrival = \frac{s(x)}{D_{MAX_ACTIVE}} \quad (5)$$

DCA 기법은 혼잡 발생 시 수신 노드의 패킷 수

seq	type	src_id	D_cycle	D_active	change_inter_arrival
-----	------	--------	---------	----------	----------------------

그림 5. 혼잡 통지 메시지 구조

신율을 증가와 송신 노드의 패킷 전송률 감소를 함께 사용함에 따라 잦은 전송률 변화에 대한 요구를 줄일 수 있고 송신 노드로의 컨트롤 패킷 오버헤드를 줄일 수 있다. 또한 응용에서 요구한 전송률에 대한 변화를 최소화 할 수 있다. 그림 6은 DCA 기법의 전체 동작 과정을 나타낸다.

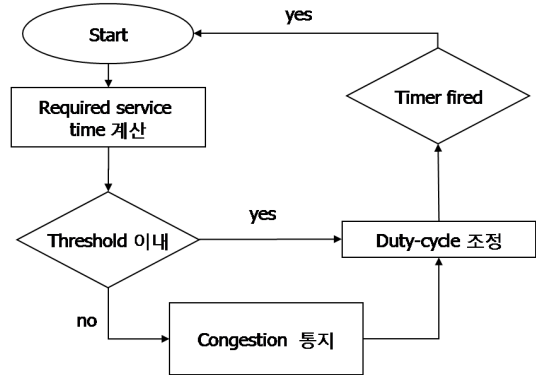


그림 6. DCA 동작 흐름도

IV. 성능 평가

4.1 실험 및 성능 평가

제안하는 DCA 기법의 성능을 평가하기 위해 NS-2^[14]를 이용하여 트래픽 제어 기반 혼잡제어 기법과 DCA 기법을 구현하여 실험을 수행하였다. 실험 환경은 Intersection Hot Spot에 의한 혼잡 현상을 명확히 관찰하고 각 혼잡 제어 기법에 의한 성능 비교를 쉽게 하기 위해 그림 7과 같이 멀티홉 트리 토폴로지를 구성하였다. 네트워크 규모가 증가해도 혼잡은 Intersection Hot Spot에 의해 발생하고 그 영향이 상위 노드로 전파되는 양상을 보인다. 송신 노드인 s1, s2, s3는 10pkt/s의 트래픽을 각각 300초, 500초, 900초부터 전송을 시작한다. 각 노드의 듀티사이클 파라미터는 D_{CYCLE} 을 2000ms로 설정하였고, D_{MIN_ACTIVE} 와 D_{MAX_ACTIVE} , 그리고 D_{ACTIVE} 를 각각 5ms, 10ms, 20ms로 설정하였다.

그림 8은 각 기법의 패킷 수신율을 비교한 그래프 단위 시간당 수신한 패킷의 수를 통해 나타낸다. 트래픽 제어 기법은 주어진 리소스에 맞춰 트래픽을 조절하므로 혼잡 발생 지점에서 패킷 수신율이 둔화되는 것을 알 수 있다. 반면 DCA는 트래픽의 증가에 따라 D_{MAX_ACTIVE} 까지 리소스를 증가시키므로 더 많은 패킷의 수신이 가능하다. DCA 역시 900초 이후에는 혼잡 통지를 통한 트래픽 제어

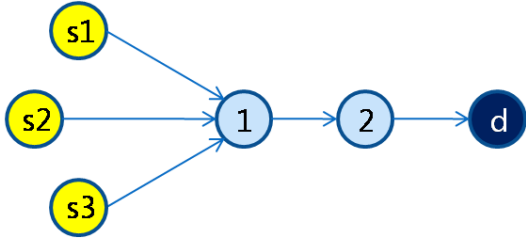


그림 7. 네트워크 토폴로지

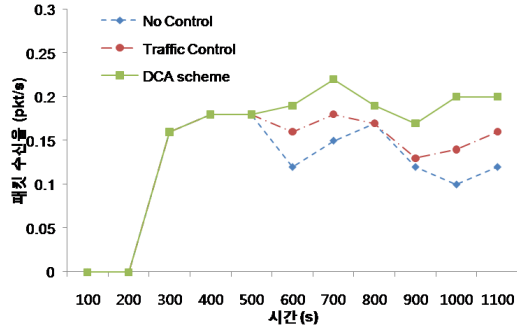


그림 8. 각 기법의 패킷 수신율 비교

를 병행하게 되므로 패킷 수신율이 다소 둔화되는 것을 알 수 있다.

그림 9는 전체 시간동안 각 노드의 패킷 손실률의 비를 통해 비교하는 기법의 신뢰성을 평가한 그래프이다. 혼잡 제어를 수행하지 않는 경우엔 혼잡 발생 시 많은 패킷의 손실이 일어나게 되므로 높은 손실률을 보인다. 반면 트래픽 제어 기법이나 DCA 기법은 혼잡 제어를 수행하게 되므로 패킷 손실을 줄일 수 있고 이에 따라 신뢰성을 높일 수 있다.

그림 10은 비교하는 기법의 에너지 효율성을 나타낸 그래프이다. 각 기법 모두 낮은 듀티사이클을 사용하므로 비교적 높은 에너지 효율성을 나타낸다. DCA 기법은 더 많은 패킷을 수신하기 위해 활성

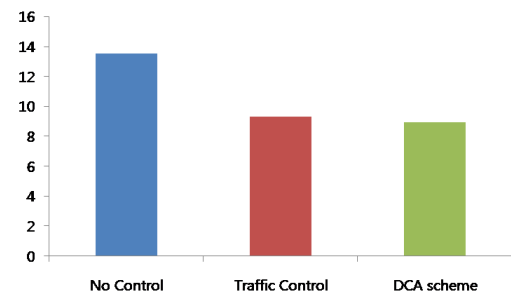


그림 9. 각 기법의 패킷 손실률 비교

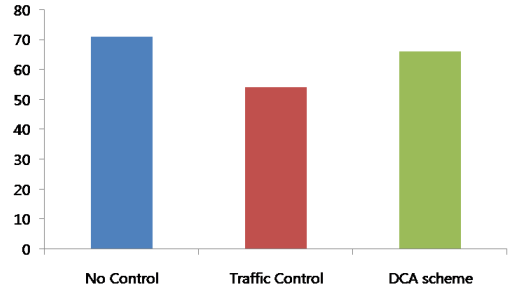


그림 10. 각 기법의 에너지 효율성 비교

상태 시간을 증가시키므로 더 많은 에너지를 소모하지만 추가 컨트롤 오버헤드는 기존의 트래픽 제어 기법과 비슷한 수준이다. DCA 기법에서의 에너지 효율성은 응용에 따라 D_{MAX_ACTIVE} 를 달리하여 적절한 수준으로 조절이 가능하다.

이와 같이 DCA는 듀티사이클의 활성 시간을 리소스로 삼고 이에 대한 조절을 통해 기존의 트래픽 제어 기법보다 혼잡 발생 시 더 많은 패킷을 수신할 수 있다. DCA는 듀티사이클이 적용된 MAC 프로토콜에서 쉽게 동작이 가능하며 Threshold의 변경을 통해 에너지 효율성과 Throughput을 응용에 맞게 조절할 수 있다.

V. 결 론

무선 센서 네트워크에서는 다대일로 수렴하는 상향 트래픽의 특성으로 인해 네트워크의 혼잡이 빈번히 발생한다. 기존에 제안된 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어 기법은 혼잡 발생 시 전송 주기 변경을 통해 혼잡을 회피할 수 있으나 MAC 계층의 듀티사이클 동작에 대한 고려가 부족하였다. 듀티사이클 동작은 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 위하여 구현 시 반드시 고려되어야 할 중요한 요소이다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어를 위하여 네트워크의 트래픽에 따라 센서 노드의 듀티사이클을 적응적으로 변화시키는 DCA 기법을 제안하였다. DCA 기법은 혼잡 발생 시 수신 노드의 패킷 수신율을 증가를 통한 리소스 제어와 송신 노드의 패킷 전송률 감소인 트래픽 제어를 함께 사용함에 따라 잦은 전송률 변화에 대한 요구를 줄일 수 있고 송신 노드로의 컨트롤 패킷 오버헤드를 줄일 수 있다. 또한 응용에서 요구한 전송률에 대한 변화를 최소화 할 수 있다. 실험을 통하여 제안한 DCA 기법은 에너지 효율적으로 혼잡 제어를 수행

할 수 있음을 확인하였다.

향후 DCA 기법과 기존의 리소스 제어 기법에 대한 성능 비교를 하고자 한다. 또한 다양한 응용에 따른 QoS 요구사항을 고려한 QoS 기반의 혼잡 제어 기법에 관한 연구를 하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communication Magazine*, Vol.40, No.8, pp.104-112, August 2002.
- [2] C. Wang, K. Sohrawy, V. Lawrence, B. Li, and Y. Hu, "Priority-based Congestion Control in Wireless Sensor Networks," *IEEE SUTC'06*, Vol.1, pp.22-31, June 2006.
- [3] Y. Sankarasubramaniam, O. Akan, and I. Akyildiz, "ESRT: Event-to-sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *ACM MOBIHOC'03*, pp.177-188, June 2003.
- [4] J. Kang, Y. Zhang, and B. Nath, "TARA: Topology-Aware Resource Adaptation to Alleviate Congestion in Sensor Networks," *IEEE Transaction on Parallel and Distributed System*, Vol.18, issue. 7, pp.919-931, July 2007.
- [5] Y. Iyer, S. Gandham, and S. Venkatesan, "STCP: A Generic Transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE ICCCN'05*, pp.449-454, October 2005.
- [6] T. He, F. Ren, C. Lin, and S. Das, "Alleviating Congestion Using Traffic-Aware dynamic Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE SECON'08*, pp.233-241, June 2008.
- [7] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol.12, No.3, pp.493-506, June 2004.
- [8] T. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *ACM SENSYS'03*, pp.171-180, November 2003.
- [9] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," *IEEE IPDPS'04*, pp.224-231, April 2004.
- [10] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," *ACM SENSYS'04*, pp.95-107, November 2004.
- [11] A. El-Hoiydi and J. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks," *IEEE ISCC'04*, Vol.1, pp.244-251, June 2004.
- [12] B. Jang, J. Lim, and M. Sichertiu, "AS-MAC: An Asynchronous Scheduled MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE MASS'08*, pp.434-441, September 2008.
- [13] J. Kang, Y. Zhang, and B. Nath, "Analysis of Resource Increase and Decrease Algorithm in Wireless Sensor Networks," *IEEE ISCC '06*, pp.585-590, June 2006.
- [14] The Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

이 동 호 (Dongho Lee)

정회원



2006년 2월 광운대학교 컴퓨터 소프트웨어학과
2006년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정
<관심분야> 무선센서네트워크, 임베디드시스템, ad-hoc 네트워크

정 광 수 (Kwangsue Chung)

종신회원



1981년 2월 한양대학교 전자공학과
1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1991년 2월 미국 University of Florida 전기공학과 박사
1983년 3월~1993년 2월 한국

전자통신연구원 선임연구원
1993년 3월~현재 광운대학교 전자공학부 교수
<관심분야> 인터넷 QoS, 유.무선 비디오 스트리밍, 센서 네트워크