

논문 2015-10-43

# 무선 센서 네트워크를 위한 클러스터 내 노드 밀도 기반 트랜스포트 프로토콜

(A Robust Transport Protocol Based on Intra-Cluster Node Density for Wireless Sensor Networks)

백철현, 모상만\*

(Cheolheon Baek, Sangman Moh)

Abstract : The efficient design of a transport protocol contributes to energy conservation as well as performance improvement in wireless sensor networks (WSNs). In this paper, a node-density-aware transport protocol (NDTP) for intra-cluster transmissions in WSNs for monitoring physical attributes is proposed, which takes node density into account to mitigate congestion in intra-cluster transmissions. In the proposed NDTP, the maximum active time and queue length of cluster heads are restricted to reduce energy consumption. This is mainly because cluster heads do more works and consume more energy than normal sensor nodes. According to the performance evaluation results, the proposed NDTP outperforms the conventional protocol remarkably in terms of network lifetime, congestion frequency, and packet error rate.

Keywords : Wireless sensor network, Transport protocol, Congestion control, Node density, Energy efficiency

## 1. 서론

무선 센서 네트워크(wireless sensor network: WSN)는 배터리 전원으로 동작하는 센서 노드(sensor node)들이 무선 링크로 연결된 분산 네트워크이다. 센서 노드는 물리량을 감지하는 센서, 수집된 정보를 가공하는 프로세서, 이를 전송하는 소형 무선 송수신 장치 등으로 구성된다. 여러 센서 노드에서 수집된 데이터는 싱크 노드(sink node)로 전송된다. 싱크 노드 또는 기지국(base station)은 응용 분야에 따라 인터넷에 연결되기도 한다.

WSN은 사람들이 접근하기 어려운 장소에서의 물리 현상 감지뿐만 아니라 과학적, 의학적, 군사적,

상업적 및 실생활에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있다[1, 2]. WSN은 일반 네트워크와 달리 에너지 공급이 제한적이고 이로 인해 네트워크 수명이 짧다. 따라서, 센서 노드 및 프로토콜 설계의 가장 중요한 기준은 에너지 효율성이다[3].

WSN 트랜스포트 프로토콜(transport protocol)은 패킷 전송의 신뢰성 회복과 혼잡을 제어하는 중요한 역할을 한다[4]. 네트워크에서 메시지 송수신의 중단 노드는 전체 네트워크의 안정성을 보장하기 위해 반드시 혼잡 상황에 대해 반응해야 된다[5]. WSN에서의 프로토콜 역시 혼잡 제어를 효과적으로 수행해야 하고 신뢰성 있는 전송을 보장할 수 있어야 한다.

WSN 트랜스포트 프로토콜에서 신뢰성 기반으로 동작하는 프로토콜은 PSFQ (Pump Slowly Fetch Quickly)[6], RMST (Reliable Multi-Segment Transport)[7], ESRT (Event-to-Sink Reliable Transport)[8]가 있다. 이 프로토콜들은 혼잡제어 보다는 데이터의 온전한 전송을 목적으로 두고 전송하는 방식이다. 한편 혼잡제어 기반으로 동작하는

\*Corresponding Author(smmoh@chosun.ac.kr)

Received: 18 July 2015, Revised: 7 Sep. 2015,

Accepted: 4 Oct. 2015.

C. Baek, S. Moh: Chosun University

\* 이 논문은 2015학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

프로토콜은 크게 트래픽 기반 프로토콜과 자원 기반 프로토콜로 나뉜다. 트래픽 기반 프로토콜들은 CODA (COngestion Detection and Avoidance)[9], STCP (Sensor Transmission Control Protocol)[10], ECN (Explicit Congestion Notification)[11] 등이 있다. 자원 기반 프로토콜은 TARA (Topology-Aware Resource Control)[12], TADR (Traffic-Aware Dynamic Routing)[13], DCA (Duty-cycle based Congestion Avoidance)[14] 프로토콜이 있다. 트래픽 기반 프로토콜은 생성 트래픽을 낮춰서 혼잡을 제어하는 방식의 기법이고, 자원 기반 프로토콜은 데이터의 송수신량을 제어하여 혼잡을 제어하는 방식으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 주변의 물리 속성을 모니터링하는 클러스터 구조의 WSN에서 에너지 효율적이고 성능이 우수한 노드 밀도 기반 트랜스포트 프로토콜을 제안한다. 제안한 프로토콜은 NDTP (Node-Density-aware Transport Protocol)로 명명되며, 자원 기반 프로토콜로 분류될 수 있다. 클러스터 내에서 클러스터 헤드가 수신하는 데이터의 양을 줄임으로써 혼잡을 경감시키고 성능을 개선한다. 기존의 DCA 프로토콜은 자원 기반 프로토콜인 TARA와 TADR 프로토콜의 성능을 개선하여 만든 최근 프로토콜이므로, 본 논문에서 제안한 자원 기반 NDTP 프로토콜의 성능을 DCA 프로토콜과 비교 평가한다. 성능평가 결과에 의하면, 기존의 DCA 방식에 비해 클러스터 내의 패킷 전송률을 감소시키고 노드의 생존시간을 증가시킨다. 또한 노드 밀도가 높을수록 혼잡 빈도가 기존 방식에 비해 크게 감소한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2절에서는 무선 센서 네트워크에서 연구되어 온 종래의 트랜스포트 프로토콜을 검토 분석한다. 제 3절에서는 본 논문에서 제안한 노드 밀도 기반 트랜스포트 프로토콜의 원리와 동작을 상세히 기술한다. 제 4절에서는 시뮬레이션을 통한 성능 평가 결과를 기술하고 성능 향상 효과를 검증한다. 마지막으로 제 5절에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

## II. 관련 연구

그림 1은 WSN 트랜스포트 프로토콜의 분류를 나타낸다. 크게 신뢰성 기반 프로토콜과 혼잡 제어 기반 프로토콜로 나뉘고 혼잡 제어 기반 프로토콜

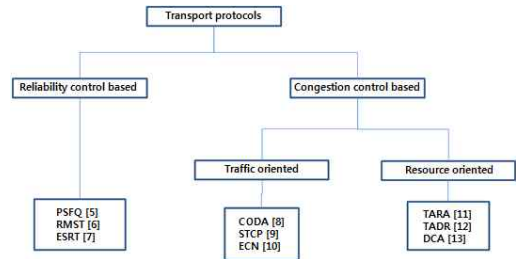


그림 1. WSN 트랜스포트 프로토콜의 분류

Fig. 1 Classification of transport protocols in WSNs

에서는 다시 트래픽 기반 프로토콜과 자원 기반 프로토콜로 나뉜다. 대표적인 신뢰성 기반 프로토콜에는 PSFQ, RMST, ESRT 등이 있고 트래픽 기반 프로토콜에는 CODA, STCP, ECN 등이 있으며 자원 기반 프로토콜에는 TARA, TADR, DCA 등이 있다.

### 1. 신뢰성 기반 프로토콜

PSFQ 프로토콜은 신뢰성 있는 전송을 최우선으로 고려한다[6]. PSFQ는 상당한 오버헤드가 존재하기 때문에 센서로부터 싱크로의 전송(upstream)이 아닌 싱크로부터 센서로의 전송(downstream)에서 주로 사용된다. 하지만 이 방식은 중간 노드에서 손실된 패킷이 완전히 복구될 때까지 손실 패킷 이후 전송된 패킷을 버퍼에 저장하기 때문에 버퍼 오버플로우 발생 가능성이 높다.

RMST 프로토콜[7]은 upstream 전송에 대해 신뢰성을 보장하는 프로토콜이다. 이 기법은 종단간(end-to-end) 데이터 패킷을 전송하는데 신뢰성을 제공하며 캐싱 및 복구를 위한 S-NACK (Selective Negative ACKnowledgement) 기반 프로토콜이다. RMST는 목적 노드까지의 경로가 설정되고 전송 중인 노드를 캐싱 모드인 경우와 비 캐싱 모드인 경우로 나누고 캐싱 모드가 재전송의 책임을 담당하도록 한다[15].

ESRT 프로토콜[8]은 기본적으로 센서 네트워크에서 모든 데이터가 센서 노드에서 싱크 노드로 집중된다는 상황을 가정한다. 무선 센서 네트워크에서 최소한의 에너지 소비와 혼잡 제어를 기반으로 신뢰성 있는 전송을 제공한다[16]. 싱크 노드의 관심사는 어떤 노드가 어떤 데이터를 보낸다는 것보다는 어떠한 이벤트가 발생했는가 하는 것이 된다. ESRT에서의 신뢰성은, 센서 노드들로부터의 알람에 의해 이벤트가 발생했다고, 싱크 노드가 확신할

수 있는 정도라고 할 수 있다.

## 2. 트래픽 기반 프로토콜

CODA 프로토콜은 upstream 전송 프로토콜이다 [9]. CODA는 현재의 버퍼 점유량과 무선 채널 부하 모니터링에 의해 혼잡 검출을 시도한다. 버퍼 점유량 또는 무선 채널 부하가 임계치를 초과하게 되는 것은 혼잡이 발생하였음을 의미한다. 혼잡을 검출한 노드는 open-loop hop-by-hop back pressure 방법으로 전송률을 감소시키기 위해 그 노드의 downstream 방향의 이웃한 노드들에게 피드백 메시지를 공지한다. CODA는 closed-loop end-to-end 기법을 통해 multi-source 속도를 노드 스스로 조절할 수 있다. 센서 노드는 싱크 노드로부터 전송률을 유지하기 위해 주기적으로 ACK를 받는다. 만약 혼잡이 발생되면 ACK를 정해진 시간 내에 받지 못하게 된다. 이 경우에 노드 스스로 전송률을 낮춘다.

STCP는 제어된 가변 신뢰성 및 혼잡 탐지와 회피를 제공하는데 있어서 싱크 노드가 대부분의 기능을 수행한다. 각 센서 노드는 트래픽 종류나 전송률, 요구되는 신뢰성 등을 고려하여 싱크 노드에게 데이터를 전송한다[10]. STCP는 응용마다 다른 특성을 고려하여 각 노드는 다양한 응용에 적합하도록 다양한 데이터 흐름을 제공하며, 혼잡 제어와 회피, 신뢰성 같은 기능을 추가적으로 수행한다. STCP는 센서 노드가 수집 데이터를 보내기 전에 세션 초기 패킷을 싱크 노드에게 전송한다. 세션 초기 패킷은 데이터 흐름, 로컬 시계(local clock) 정보, 트래픽 종류, 전송률, 신뢰성 등으로 구성된다. 싱크 노드에서는 세션 초기 패킷의 정보를 저장하고 ACK 신호를 각 센서 노드에게 전송하고, 이후 실제 센싱 데이터 전송이 이루어진다.

ECN은 통신망의 혼잡 발생 가능성을 미리 탐지하여 이를 송신측에 명시적으로 알려 전송 속도를 조절하는 방식이다[11]. 혼잡 발생이 예상되면 도착하는 패킷 헤더의 CE (Congestion Experienced) 비트를 1로 설정하고 전송 패킷이 목적지에 도착하면, 수신자는 중간 노드의 혼잡 정보를 송신자에게 알려주기 위해 CE 비트를 헤더에 존재하는 ECN-Echo 플래그에 그대로 복사하여 ACK 패킷을 전송한다. ECN-Echo 플래그가 설정된 ACK 패킷을 수신한 송신자는 자신의 송신 윈도우의 크기를 반으로 감소하는 등의 적절한 혼잡 제어 메커니즘을 수행하고 다음에 전송할 패킷에 CWR (Congestion Window Reduced) 플래그를 설

정하여 보냄으로써 혼잡에 대비하여 전송을 감소시켰다는 것을 수신자에게 알려주어, 수신자가 더 이상 혼잡을 예고하는 ACK를 보내지 않도록 한다.

## 3. 자원 기반 프로토콜

TARA는 자원 제어 기법을 사용한 혼잡 제어 기법으로 혼잡 제어를 위하여 휴면 중인 임의의 수의 노드를 활성화시켜 우회 경로로 사용한다[12]. 네트워크 상의 휴면 노드를 이용하기 위해서는 네트워크의 토폴로지를 인지하는 것이 중요하다. TARA는 다양한 혼잡 발생 토폴로지를 가정하여 그에 알맞은 트래픽 분산 방법을 제시한다. 토폴로지 인지를 위한 오버헤드가 크고, 트래픽 분산을 위한 정확한 알고리즘이 제시되지 않았다는 단점을 갖는다.

TADR은 트래픽 인지 동적 라우팅 알고리즘 네트워크에서 혼잡 발생시 혼잡 지점을 인식하여 이를 우회하는 경로를 사용하여 혼잡을 회피한다 [13]. 기본적인 라우팅 백본 설정을 위해 각 노드의 깊이를 사용하고 혼잡 감지 및 트래픽 인지를 위하여 큐의 길이를 사용한다. TADR은 혼잡의 회피를 위해 하나의 대체 경로만을 사용하게 되므로 네트워크 토폴로지 정보를 최대한 사용하지 못하는 단점을 갖는다.

DCA기법은 듀티 사이클(duty cycle) 조절을 이용한 혼잡제어 기법으로 MAC 계층의 수신 패킷 정보와 듀티 사이클 정보를 이용하여 동작한다[14]. DCA 기법에서의 MAC 프로토콜은 비동기 듀티 사이클에 기반을 둔 프로토콜로 가정한다. 또한 네트워크는 트리 기반의 토폴로지로 구성된다고 가정하여 부모 노드는 자식 노드들의 데이터 전송률에 기반을 두어 혼잡을 감지하고 자신의 듀티 사이클을 조정하거나 자식의 전송률을 조절하여 혼잡을 회피한다. 듀티 사이클은 활성 시간에 대한 활성 주기로 나타내는데, 활성 시간은 노드가 활성 상태를 유지하는 시간을 의미하고, 활성 주기는 두 활성 상태 사이의 시간 간격을 의미한다. 각 센서 노드는 주기적으로 활성 상태와 수면 상태를 반복하면서 전력을 공급하여 통신을 수행하고, 수면 상태일 때는 무선 송수신기의 전력을 차단하여 통신에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있다[17, 18].

## III. 노드 밀도 기반 트랜스포트 프로토콜

### 1. 듀티 사이클과 시스템 파라미터

듀티 사이클은 MAC 프로토콜에서 에너지 소모

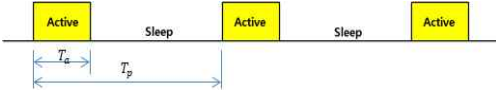


그림 2. 주기적인 센서 활성화

Fig. 2 Cyclic activation of sensors

표 1. 수식에 사용되는 파라미터

Table 1. Parameters used in the formula

Parameter	Description
$T_a(x)$	Active time of activation period of cluster head $x$ (sec)
$T_p(x)$	Activation period of cluster head $x$ (sec)
$T_{a_{max}}(x)$	Maximum active time of activation period of cluster head $x$ (sec)
$T_{a_{min}}(x)$	Minimum active time of activation period of cluster head $x$ (sec)
$T_{a_{next}}(x)$	Next active time of cluster head $x$ (sec)
$s(x)$	Service time required at node $x$ (sec)
$T_{inter-arrival}(i)$	Average inter-arrival time of packets received from node $i$ (sec)
$P(x)$	Number of packets transferred for $T_a(x)$ from cluster head $x$ to sink
$N(x)$	Number of member nodes of cluster head $x$
$d(x)$	Extra active time of cluster head $x$ (sec) ( $d(x) = T_a(x) - s(x)$ )
$E_{battery}(x)$	Residual anergy of cluster head $x$ (Joule)
$E_{avg}$	Average residual energy of cluster heads (Joule)
$Q_{length}(x)$	Queue length of cluster head $x$
$Q_{length_{next}}(x)$	Queue length of cluster head $x$ at the next activation period

를 줄이는 효과적인 방법으로 널리 사용되고 있다. 무선 센서 네트워크에서 에너지를 절약하기 위하여 센싱이나 전송을 하지 않는 시간 동안 주기적으로 노드를 수면 상태로 만들어 에너지 소모를 줄이게 되는데, 주기적으로 깨어날 때 활성화 되어 있는 시간을 주기 시간으로 나눈 값을 듀티 사이클(duty cycle)이라고 한다. 그림 2에서 듀티 사이클은  $T_a$ 와  $T_p$ 의 비율 즉  $T_a/T_p$ 이다. 백분율로도 표기하는데 이 경우  $T_a/T_p \times 100\%$ 이다.

그림 2에서  $T_a$ 는 노드의 활성화 상태로 이 시간만큼 노드는 작업을 수행한다. 그리고 수면 상태는 전력 공급이 중단되어 노드는 비활성 상태로 된다.

표 1은 기존의 듀티 사이클에서 사용되는 파라

미터와 본 논문에서 제시하는 트랜스포트 프로토콜의 파라미터가 모두 포함되어 있다.  $T_{a_{max}}$ 는 노드의 최대 활성화 시간이다. 노드의 작업량이 많아질 경우 최대  $T_{a_{max}}$ 까지 활성화 상태의 시간이 된다. 반대로  $T_{a_{min}}$ 은 노드의 최소 활성화 시간이다. 즉, 노드가 작업을 처리하는 최소의 시간이  $T_{a_{min}}$ 이 된다.  $T_{inter-arrival}(i)$ 는 클러스터 멤버 노드  $i$ 로부터 클러스터 헤드 노드로 전송되는 패킷들의 평균 도착 시간 간격이다. 이 값은 노드의 이벤트 발생 횟수 또는 혼잡 상태에 따라 변한다.  $P$ 는  $T_a$  시간 동안 처리할 수 있는 패킷의 수이다.

## 2. 클러스터 헤드에 의한 자원 제어

앞에서 언급한 바와 같이, 제안한 NDTP 프로토콜은 산불 감시 등과 같이 센서 네트워크 영역의 주변 물리 속성을 모니터링하는 응용 분야를 가정하고 클러스터 구조의 WSN에 적합하게 동작한다. 일반적으로 많은 센서 노드들의 센싱 면적이 중첩되어 분포되므로, 이벤트 발생으로 짧은 시간에 많은 센서 노드들로부터 데이터 전송량이 급증할 경우에 일부 데이터 전송이 실패하더라도 문제되지 않으므로 전송이 실패하여도 재전송을 하지 않는다. 클러스터 헤드의 큐 길이가 줄고 재전송을 하지 않지만, 위와 같은 네트워크 응용의 특성으로 인해 성능에 부정적 영향을 주지 않으며, 논문의 4절에서 시뮬레이션을 통한 성능 평가에서도 확인된다.

노드  $x$ 에서 요구되는 서비스 시간을  $s(x)$ 라고 하였을 때 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$s(x) = \sum_i^N \frac{1}{T_{inter-arrive}(i)} * T_a(x) * \frac{1}{P} \quad (1)$$

$$d(x) = T_a(x) - s(x) \quad (2)$$

식 (2)에서  $d(x)$ 가 0보다 작을 경우는 서비스 요구 시간이 활성화 시간을 초과하므로 혼잡이 발생 되었다고 볼 수 있다.  $d(x)$  계산 후에 클러스터 헤드는 다음의 두 수식에 나타난 바와 같이 네 가지 선택 중 하나를 수행한다.

$$\text{if } d(x) > 0 \begin{cases} T_{a_{next}}(x) = s(x) & , s(x) > T_{a_{min}}(x) \\ T_{a_{next}}(x) = T_{a_{min}}(x) & , s(x) \leq T_{a_{min}}(x) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{if } d(x) \leq 0 \begin{cases} T_{a_{next}}(x) = s(x) & , s(x) < T_{a_{max}}(x) \\ Q_{length_{next}}(x) = Q_{length}(x) * \frac{1}{2} & , s(x) > T_{a_{max}}(x) \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에 나타난 것처럼,  $d(x)$ 가 0보다 클 경우에는,  $s(x)$ 를  $T_{a\_min}(x)$ 와 비교하여  $s(x)$ 가 크면 다음  $T_a(x)$ 의 값은  $s(x)$ 가 되고 작거나 같으면 다음  $T_a(x)$ 의 값은  $T_{a\_min}(x)$  값이 된다. 반면에  $d(x)$ 가 0보다 작거나 같을 경우에는, 혼잡 상태로 보고  $s(x)$ 를  $T_{a\_max}(x)$ 와 비교하여  $s(x)$ 가 작으면 다음  $T_a(x)$ 의 값은  $s(x)$ 가 되고 크거나 같으면 클러스터 헤드 노드의 queue 크기를 줄여 많은 데이터를 받지 않도록 자원을 조절한다.

노드들의 전송을 막는 방법이 아닌 클러스터 헤드의 queue 길이를 조절한다. 클러스터 내 노드의 수가 많아서 노드 밀도가 높아져도 클러스터 헤드에서는 정해진 양의 데이터만 받고 나머지 데이터를 무시하기 때문에 클러스터 헤드에 과부하가 걸릴 가능성이 적어진다. 또한 클러스터 헤드의 queue 길이를 줄이면 클러스터 헤드가 처리하는 데이터량이 감소되므로 그만큼의 에너지를 아낄 수 있다. 그리고 queue 길이가 최소가 되었을 때 클러스터 헤드에 과부하가 걸릴 경우 클러스터 내의 노드 밀도가 높은 것으로 인식하고 클러스터 내에서 임의의 노드들을 수면 상태로 만들어 혼잡을 조절한다. Queue 길이를 줄여서 수신되는 데이터가 감소하지만, 센싱 데이터의 중복성 특성으로 인해 주변의 센싱 데이터들을 파악할 수 있다. 트래픽이 과도한 클러스터 그룹은 대체로 노드들의 밀도가 높기 때문이다. 그래서 몇몇 클러스터 멤버 노드의 데이터를 받지 않더라도 주변의 다른 노드들의 데이터를 통해 충분히 주변 환경을 센싱할 수 있다.

그림 3은 이상의 설명을 순서에 따라 도식적으로 표현한 자원 제어 흐름을 보여준다. 혼잡 관련 파라미터를 계산한 후 수식에 따라  $T_{a\_next}(x)$ 를 변화시킨 후 데이터 송수신을 수행하고, 미리 설정한 일정한 주기에 따라  $s(x)$ 와  $d(x)$ 를 다시 계산하여 다음  $T_{a\_next}(x)$  값을 정한다. NDTP의 혼잡 제어 방식에는  $T_a$  값이 최대값이 될 경우 클러스터 헤드에서 받는 데이터를 절반으로 줄여 바로 혼잡을 피할 수 있다. 그림 4와 같이 클러스터 헤드가 몇몇 노드의 데이터를 받지 않고 무시함으로써 헤드에 오버플로우가 발생하지 않아 에너지 소모를 줄이고 궁극적으로 전송 성공률을 높일 수 있다.

3. 클러스터 헤드의 에너지 조절

에너지 효율은 무선 센서 네트워크에서 네트워크 수명에 큰 영향을 주기 때문에 가장 중요한 지

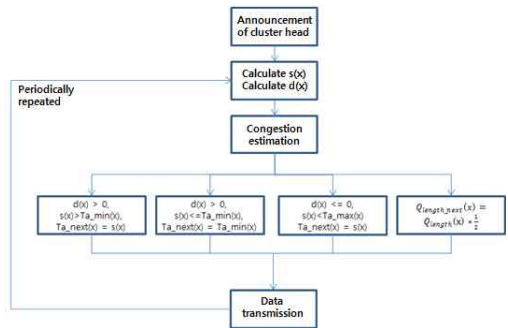


그림 3. 클러스터 헤드의 자원 제어

Fig. 3 Resource control of the cluster head

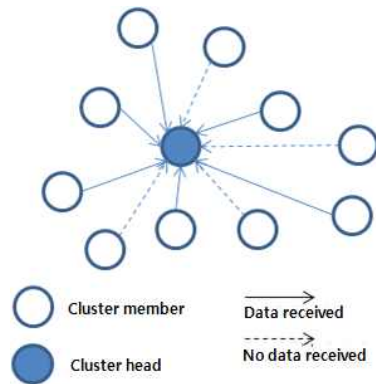


그림 4. 클러스터 헤드의 자원 제어

Fig. 4 Resource control of the cluster head

표중 하나이다[19]. 배터리로 동작하는 모든 센서 노드들이 동시에 수명이 다하는 것을 이상적으로 보고 있다. 그러므로 노드들의 에너지 잔량을 토대로 노드들에서의 에너지 소모 균형을 맞추는 게 중요하다.

그림 5와 같이 클러스터 헤드(CH)들은 주기적으로 싱크 노드에게 자신의 잔여 에너지 값을 전달한다. 즉, 클러스터 헤드가 싱크 노드에게 데이터를 보낼 때 에너지 값을 보내게 된다. 싱크 노드는 받은 에너지 값 데이터들을 비교하여 에너지 잔여량이 적은 클러스터 헤드에게 ACK 메시지에 1비트를 이용하여  $T_{a\_max}(x)$ 의 값을 줄이도록 제어한다. 싱크 노드에서 잔여 에너지의 값을 비교하여 ACK 메시지에 감소(1)또는 유지(0) 비트를 담아서 노드들의  $T_{a\_max}(x)$  값을 조절시킨다.  $T_{a\_max}(x)$  값을 줄인 클러스터 헤드는 다른 클러스터 헤드들에 비해 활성화하는 최대 시간이 적어지게 되어 다른 클러스터 헤드들과 에너지 균형을 유지하게 된다.

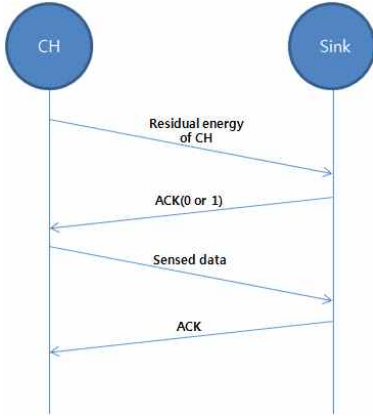


그림 5. 클러스터 헤드 에너지값 전송  
Fig. 5 Energy value transfer of the cluster head

### IV. 성능평가

본 절에서는 NDTP의 성능평가를 기술한다. LEACH 클러스터링 방식[20]을 적용시켜 같은 환경에서 NDTP 프로토콜을 기존의 DCA 방식과 비교한다. DCA 프로토콜은 자원 기반 프로토콜인 TARA와 TADR 프로토콜의 성능을 개선하여 만든 최근 프로토콜이므로, 본 논문에서 제안한 자원 기반 NDTP 프로토콜의 성능을 DCA 프로토콜과 비교 평가한다.

#### 1. 시뮬레이션 환경

성능평가를 위한 시뮬레이션 파라미터는 표 2에 요약되어 있다. 생존 노드의 수, 라운드당  $T_{a,max}$  도달 횟수, 클러스터 내 패킷 전송 실패율 등을 성능 척도로 평가한다. 본 실험에서는 LEACH 시뮬레이션 코드에 의해 제공되는 에너지 소비 모델[21]을 사용하였다. 시뮬레이션은 Java 프로그래밍과 Matlab을 이용하였다.

#### 2. 시뮬레이션 결과

그림 6과 7은 라운드 수(시간)에 따른 생존 노드의 수를 나타낸다. 초기 노드를 200개와 100개로 시작하여 비교하였다. 기존의 DCA에 비해 제안한 NDTP에서 노드들의 수가 좀 더 오래 생존함을 볼 수 있고 또한 에너지 소모 균형을 맞춰줌으로써 노드들의 에너지 고갈 시간이 비교적 고른 것으로 나타난다.

그림 8은 NDTP와 DCA의 라운드당  $T_{a,max}$  도달

횟수를 나타낸다. DCA 방식에서는 밀도가 높을수록  $T_a$ 가 최대값에 도달하는 횟수가 늘어나는 반면 NDTP에서는 앞에서 언급한 바처럼 밀도의 영향을 크게 받지 않고 혼잡이 상당히 제어됨을 볼 수 있다.

그림 9는 클러스터 내 노드 수에 따른 패킷 전송 실패율을 나타낸다. 두 프로토콜에 큰 차이가 없음을 볼 수 있는데, 그 이유는 같은 환경에서 NDTP와 DCA는 같은 전송 방식을 사용하고 NDTP는 패킷 전송 실패율을 낮추는 기법이 아니라 큐 길이를 조절하여 일부 데이터를 받지 않는 방식이기 때문에 클러스터 내 패킷 전송 실패율은 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

그림 10은 패킷 송신율에 따른 NDTP와 DCA의 라운드당  $T_{a,max}$  도달 횟수를 나타낸다. 초당 패킷 송

표 2. 시뮬레이션 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
$E_{da}$	5 nJ/bit/signal
$E_{elect}$	50 nJ/bit
$E_{sense}$	5 nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{mp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
Initial energy	2 J
Sink Location	(125, 75)
Network area	100 × 100m <sup>2</sup>
Number of nodes	100, 200
Transmission range	136 m
packet outgoing rate	1, 3, 5, 7, 9 packet/sec

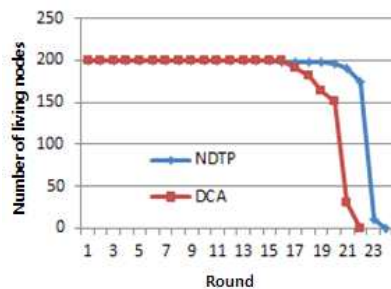


그림 6. 생존 노드의 수(초기 노드수 = 200)  
Fig. 6 The number of surviving nodes (200 initial nodes)

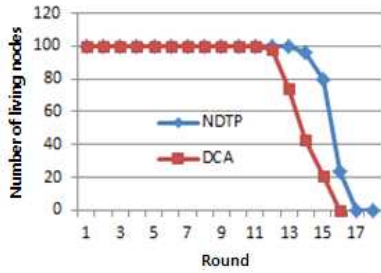


그림 7. 생존 노드의 수(초기 노드수 = 100)  
Fig. 7 The number of surviving nodes (100 initial nodes)

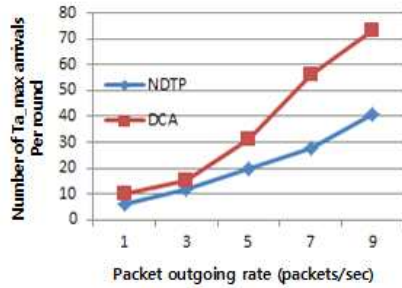


그림 10. 패킷 송신율에 따른 혼잡도  
Fig. 10 Congestion for different packet rates

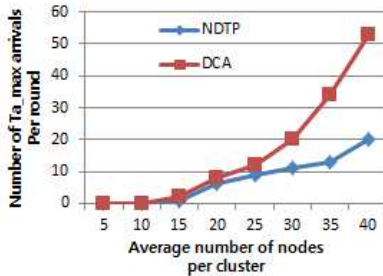


그림 8. 클러스터 내 노드 수에 따른 혼잡도  
Fig. 8 Congestion for the different number of nodes in a cluster

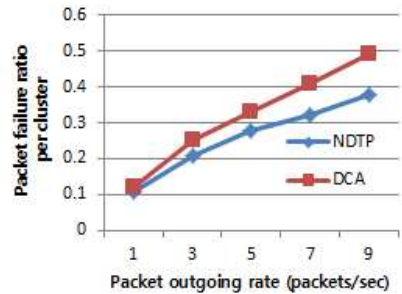


그림 11. 패킷 송신율에 따른 패킷 전송 실패율  
Fig. 11 Packet transmission failure rate for different packet rates

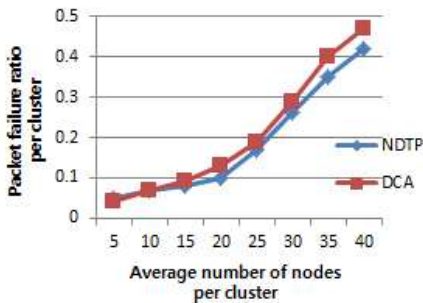


그림 9. 클러스터 내 노드 수에 따른 패킷 전송 실패율  
Fig. 9 Packet transmission failure rate for the different number of nodes in a cluster

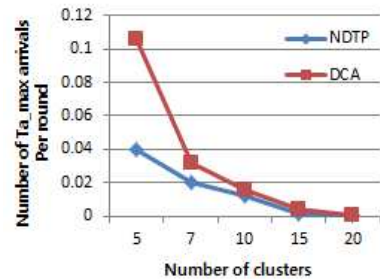


그림 12. 클러스터 수에 따른 혼잡도  
Fig. 12 Congestion on the different number of clusters

신량이 많아지게 될 경우 NDTP가 DCA 방식에 비해 라운드당  $T_{a,max}$  도달 횟수가 더 낮음을 알 수 있다. 즉, 제한한 NDTP가 혼잡을 덜 유발하는 우수한 성능을 갖는다.

그림 11은 패킷 송신율에 따른 패킷 전송 실패

율을 나타낸다. 초당 패킷 송신량이 많아지게 될 경우 NDTP가 DCA 방식에 비해 좀 더 낮은 패킷 전송 실패율을 보였다. 초당 패킷 송신량이 많아지게 되면 네트워크의 혼잡 빈도가 높아지게 되는데 이때 혼잡 제어를 효율적으로 하는 NDTP가 기존의 방식에 비해 낮은 패킷 전송률을 보이게 된다.

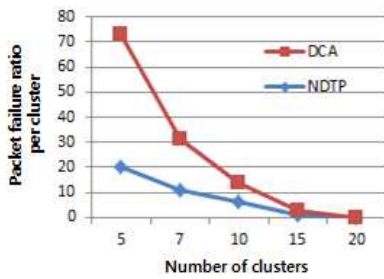


그림 13. 클러스터 수에 따른 클러스터 헤드의 패킷 전송 실패율

Fig. 13 Packet transmission failure rate for the different number of clusters

그림 12는 클러스터 수에 따른  $T_{a,max}$  도달횟수를 나타낸다. 클러스터 수가 적으면 그만큼 한 클러스터에 속한 멤버 노드 수가 많아지기 때문에 네트워크가 자주 혼잡하다. 그러나 큐 길이를 조절하여 혼잡 제어를 하는 NDTP가 기존의 DCA 방식보다 훨씬 더 안정된 네트워크 환경을 구성함을 알 수 있다.

그림 13은 클러스터 수에 따른 헤드와 싱크 노드간의 전송 실패율을 나타낸다. 멤버 노드가 클러스터 헤드에게 전송하는 정보보다 클러스터 헤드가 싱크에 전송하는 데이터가 더 중요성이 높기 때문에 클러스터 헤드 수에 따른 헤드의 패킷 전송 실패율을 측정하였다. 동일 네트워크 환경에서 클러스터 수(클러스터 헤드 수)가 적은 경우에는 상대적으로 멤버 노드 수가 많기 때문에 전송 실패율이 높은 편이고, 반대의 경우에는 멤버 노드 수가 적기 때문에 클러스터 헤드의 부하가 적어 전송 실패율이 낮아진다. NDTP는 DCA에 비해 노드 밀도에 크게 영향을 받지 않기 때문에 클러스터 헤드에 오버플로우 같은 무리가 가지 않아 전송 실패율이 현저하게 낮음을 볼 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 주변의 물리 속성을 모니터링하는 클러스터 구조의 WSN에서 노드 밀도를 참조하여 클러스터 내 혼잡을 제어하고 클러스터 헤드의 잔여 에너지를 고려하여 듀티 사이클의 최대 활성화 시간을 조절하는 새로운 트랜스포트 프로토콜(NDTP)을 제안하였다. 또한 제안한 NDTP 프로토콜에서는 큐 길이를 제어함으로써 혼잡 제어와 동

시에 클러스터 헤드와 싱크간의 데이터 전송 실패율도 낮춰준다. 성능 평가 결과에 의하면, 제안한 NDTP 프로토콜은 기존 방식에 비하여 에너지 소모를 줄여 네트워크 수명을 연장하였고 클러스터 내 혼잡을 완화하여 데이터 전송 성공률을 높이는 효과를 보였다. 또한 센서 노드 밀도가 높을수록 혼잡 빈도가 감소하고 헤드의 패킷 전송 실패율도 크게 감소하였다. 본 연구의 향후 과제로서 제안한 트랜스포트 프로토콜을 라우팅 프로토콜과 연계하여 시스템 성능을 대폭 개선하고 에너지 절감 효과를 더욱 증대시키는 통합 메커니즘을 연구할 예정이다.

## References

- [1] N. Aschenbruck, "STMP - Sensor data Transmission and Management Protocol," Proceedings of IEEE on Local Computer Networks, pp. 475-483, 2011.
- [2] J.-H. Moon, U.-M. Jung, L.-J. Park, and T.-Y. Chung, "A Wireless Sensor Network for Artificial Structure Monitoring," Journal of IEMEK, Vol. 7, No. 6, pp. 331-338, 2012 (in Korean).
- [3] V.C. Gungor, "A Real Time and Reliable Transport (RT)<sup>2</sup> Protocol for wireless Sensor and Actor Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 16, No. 2, pp. 359-370, 2008.
- [4] F. Yunus, "Proposed Transport Protocol for Reliable Data Transfer in Wireless Sensor Network," Proceedings of IEEE on Modeling Simulation and Applied Optimization, pp. 1-7, 2011.
- [5] B. Song, "A Study on the New TCP Congestion Control for High-Speed Internet," Ph.D. Thesis, Dept. of Electronic Communication Eng., Kwangwoon Univ., 2004 (in Korean).
- [6] C. Wan, A. Campbell, L. Krishnamurth, "Pump-slowly, Fetch-Quickly (PSFQ): A Reliable Transport Protocol for Sensor Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, No 4, pp. 862-872, 2005.
- [7] F. Stann, J. Heidemann, "RMST: Reliable



- Data Transport in Sensor Networks," Proceedings of IEEE Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, pp. 102-112, 2003.
- [8] Y. Sankarasubramaniam, O. Akan, L. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," Proceedings The 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, pp. 177-188, 2003.
- [9] C. Wan, S. Eisenman, A. Campbell, "CODA: Congestion Detection and Avoidance in Sensor Networks," Proceedings of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 266-279, 2003.
- [10] Y.G. Iyer, S. Gandham, S. Venkatesan, "STCP: A Generic Transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE International Conference of Computer Communications and Networks, pp. 449-454, 2005.
- [11] K.K. Ramakrishnan, S. Floyd, D. Black, "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP," RFC 3168, Proposed Standard, Sep. 2001.
- [12] J. Kang, Y. Zhang, B. Nath, "TARA: Topology-Aware Resource Adaptation to Alleviate Congestion in Sensor Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 18, No. 7, pp. 919-931, 2007.
- [13] T. He, F. Ren, C. Lin, S. Das, "Alleviating Congestion Using Traffic-Aware Dynamic Routing in Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking, 2008, pp. 233-241, 2008.
- [14] D. Lee and K. Chung "A Congestion Control Scheme Using Duty-Cycle Adjustment in Wireless Sensor Networks," Journal of KICS, Vol. 35, No. 1, pp. 154-161, 2010 (in Korean).
- [15] W. J. Lee and S. C. Kim, "A Method for a Reality Increase in Ubiquitous Sensor Network," Proceedings of Symposium of KICS, pp. 1353-1356, July 2008 (in Korean).
- [16] H.-J. Park and J.-B. Jang "Congestion Detection and Avoidance for Reliable Data Transmission in Wireless Sensor Networks," Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 343-350, June 2010 (in Korean).
- [17] B. Jang, J. Lim, M. Sichitiu, "AS-MAC: An Asynchronous Scheduled MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems, pp. 434-441, 2008.
- [18] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 12, No. 3, pp. 493-506, 2004.
- [19] D. Kim, J. Cho. "A Method to Support Mobile Sink Node in a Hierarchical Routing Protocol of Wireless Sensor Networks," Journal of KICS, Vol. 33, No. 1, pp. 48 - 57. 2008 (in Korean).
- [20] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proc. of Hawaii Int. Conf. on System Science, pp. 1-10. 2000.
- [21] W. Bo, H. Hu, F. Wen. "An Improved LEACH Protocol for Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks," Proceedings of International Conference on Computer and Electrical Engineering, pp. 398-401, 2008.

**Cheolheon Baek (백철현)**

He received the B.E. and M.E. degrees in computer engineering from Chosun University, Gwangju, Korea in 2014 and 2015, respectively. He is currently a software engineer

at Logifocus Inc., Seoul, Korea. His research interests include wireless sensor networks, information security, and mobile programming.

Email: guhoot@nate.com

**Sangman Moh (모상만)**

He received the Ph.D. degree in computer engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea in 2002. Since late 2002, he has

been a professor in the Dept. of Computer Engineering at Chosun University, Korea. Until 2002, he had been with Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Korea, where he served as a project leader, since he received the M.S. degree in computer science from Yonsei University, Korea in 1991. His research interests include mobile computing and networking, ad hoc and sensor networks, cognitive radio networks, and parallel and distributed computing systems.

Email: smmoh@chosun.ac.kr