

생체 내 셀 간 신호 전달 체계를 모사한 지역적 협력 및 시스템 요구 성능 보장을 위한 무선 센서망의 노드 스케줄링 제어

변희정*, 손수국^o

A Node Scheduling Control Scheme in Wireless Sensor Networks Inspired by Inter-Cell Signaling

Heejung Byun*, Sugook Son^o

요 약

본 논문에서는 컴퓨팅 및 문제 해결 기술로 상당한 주목을 받고 있는 생체 모방 기술을 이용하여 무선 센서망에서 에너지 효율적이고, 요구 지연 시간이 보장된 노드 스케줄링 제어 방식을 제안한다. 특히 생체의 셀 간 신호 시스템과 무선 센서망 시스템 사이의 유사성을 도출하고, 무선 센서망의 특징을 고려하는 새로운 수학적 모델을 수립한다. 이러한 모델을 바탕으로 각 애플리케이션에 의해서 요구되는 QoS, 지역 환경 조건, 인접 노드들의 상태에 따라 센서 노드의 상태를 결정한다. 제어 이론을 바탕으로 분석을 수행하여 제안된 생체 모방 방식이 각 노드가 자율적으로 매개 변수들을 제어함으로써 시스템 안정성을 보장한다는 것을 보인다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방식이 기존 프로토콜과 비교하여 상당한 에너지 절감뿐만 아니라 요구되는 지연 시간을 만족함을 확인한다.

Key Words : bio-inspired algorithm, cell signaling, node scheduling, wireless sensor networks

ABSTRACT

In this paper, we propose an energy efficient and delay guaranteed node scheduling scheme inspired by biological systems, which have gained considerable attention as a computing and problem solving technique. With the identification of analogies between cellular signaling systems and WSN systems, we formulate a new mathematical model that considers the networking challenges of WSNs. The proposed bio-inspired algorithm determines the state of the sensor node, as required by each application and as determined by the local environmental conditions and the states of the adjacent nodes. A control analysis shows that the proposed bio-inspired scheme guarantees the system stability by controlling the parameters of each node. Simulation results also indicate that the proposed scheme provides significant energy savings, as well as reliable delay guarantees by controlling the states of the sensor nodes.

※ 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터 (GRRC SUWON 2013-B5) 사업의 일환으로 수행되었습니다.

• First Author : 수원대학교 정보통신공학과, heejungbyun@suwon.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : 수원대학교 정보통신공학과, sshon@suwon.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2013-08-379, Received August 30, 2013; Reviewed October 18, 2013; Accepted January 14, 2014

I. 서 론

무선 센서망은 목표 추적, 인프라 보안, 전장 감시, 건강 모니터링, 교통 제어 등의 여러 어플리케이션에 대해 물리적 현상들을 감지하고 모니터링 할 수 있는 장치들을 연결한다. 무선 센서망은 일반적으로 배터리 전원이 있는 다수의 작은 센서 노드들로 구성되어 있다. 따라서, 무선 센서망의 MAC 프로토콜은 주로 에너지 절감을 위해 설계되었다¹⁾. 그러나, 무선 센서망의 규모가 크기 때문에, 센서 노드를 조정함에 있어 상당한 한계를 나타낸다. 일반적으로 노드의 수가 증가함에 따라 대규모 무선 센서망의 성능은 열화되며 그들의 기능성과 성능을 일정한 수준으로 유지하는데 큰 어려움을 가진다. 따라서, 무선 센서망은 개별 노드에 대해 높은 수준의 self-organizing 기술을 요구한다. 최근의 생체 시스템 모방 기술은 컴퓨터 네트워크망의 견고성, 확장성 및 적응성의 실현을 위한 새로운 대안으로 상당한 주목을 받고 있다²⁻³⁾.

생체 시스템은 환경 변화에 자신을 적응시키고 각 개체는 이웃과 상호 작용을 기반으로 자신의 행동에 대한 결정을 내린다. 이러한 생체 시스템의 속성들을 모방하여 컴퓨터 네트워크 시스템에서 라우팅, 클러스터링, 노드 스케줄링, 타임 동기화, 네트워크 보안, 등의 많은 분야에서 생체 모방 알고리즘이 제안되어 왔다²⁻³⁾. 특히, 면역 시스템, 곤충 집단, 활성제-억제 물질 시스템, 그리고 셀 신호 시스템과 같은 시스템에서 유래한 개념과 원리는 무선 센서망 시스템의 self-organizing을 위해 활용되었다. 이러한 생체 모방 기술은 매우 강력하고, 중앙 집중화된 것 없이 신속하게 복구할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 생체 시스템의 각 구성 요소는 지역적으로만 상호 작용하고 시스템의 전체적인 속성에 대한 정보 없이 동작한다. 즉, 노드들 사이의 지역 상호 작용은 시스템의 특정 글로벌 행동으로 수렴되게 하지만, 그러한 글로벌 행동이 어플리케이션 별로 요구되는 QoS를 보장함을 의미하는 것은 아니다. 또한, 대부분의 생체 모방 알고리즘은 생체 시스템에서 파생된 동일한 구성 요소 디자인을 사용한다. 특히, 생체 모방 네트워크 프로토콜은 생물학적 모델과 동일한 방법론 및 수학 공식을 사용한다. 그러나, 네트워크 시스템의 특징이나 성능 문제로 인해 생체 시스템 모델이 네트워크 시스템에 동일하게 적용될 수 없다. 따라서 생체 시스템을 모방하여 무선 센서망 프로토콜 설계할 때 생체 시스템의 역학이나 구성 요소 동작들은 무선 센서망 문제에 맞게 재설계 되어야 한다. 또한, 기존의 생체 모방 시스템 및

알고리즘들은 시스템 안정성의 관점에서 이론적으로 분석되지 않았다. 생체 모방 알고리즘의 안정성 문제는 생체 시스템들의 복잡성으로 인해 대부분의 기존 연구 결과는 시뮬레이션으로 특정한 환경에서만 분석되어 왔다. 따라서 생체 모방 알고리즘을 사용하는 컴퓨터 네트워킹 시스템의 동작이나 성능을 정확하게 예상할 수 없었다.

이러한 문제들을 해결하기 위해, 우리는 생체 시스템을 모방하여 무선 센서망을 위한 센서 노드 스케줄링 제어 방법을 제안한다. 노드 스케줄링 기술은 센서 네트워크 운영의 모든 측면에 대해 영향을 주기 때문에, 무선 센서망에서 상당히 중요한 분야이다. 본 논문은 생체 시스템 중 셀 간 신호 전달 체계를 모방하여, 무선 센서망의 센서 노드 상태를 스케줄링 하기 위한 새로운 수학적 모델을 제안한다. 제어 이론을 바탕으로, 시스템 성능과 제안된 생체 모방 시스템의 평형점을 분석한다. 또한 제안된 생체 모방 제어 시스템에서 각 노드 별로 제어 매개 변수를 자율적으로 설정함으로써 시스템 안정성을 보장함을 보인다.

II. 관련 연구

자연에서 일어나는 많은 패턴 형성 프로세스들은 활성제-억제제 시스템으로 분류 된다⁴⁻⁷⁾. 활성제 및 억제제 서로간의 상호 작용 뿐만 아니라, 생산, 성능 저하, 그리고 확산 프로세스들은 컴퓨터 네트워크 시스템에 활용될 수 있는데 특히 에너지 성능 및 네트워크 수명을 향상시키기 위해서 주로 무선 센서망에서 노드 상태를 조절하는 알고리즘에 이용되어 왔다¹⁾. 활성제-억제제의 상호 작용을 기반으로 한 패턴 형성 모델은 센서 노드의 온-오프주기를 조정하는 데 사용되었다. 패턴 형성 프로세스의 미분 방정식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial t} &= \frac{k_a a^2}{i} - \gamma_a a + r_a + D_a \nabla^2 a \\ \frac{\partial i}{\partial t} &= k_i a^2 - \gamma_i i + r_i + D_i \nabla^2 i \end{aligned}$$

여기서 a 와 i 는 각각 활성제 및 억제제의 농도이다, k_a 및 k_i 는 해당 생산 속도를 나타낸다, r_a 및 r_i 는 저하 속도를 나타낸다. 위의 방정식에서 마지막 항은 활성제 및 억제제의 확산을 결정한다. 여기서, D_a 및 D_i 는 확산 상수들이다. $\nabla^2 f$ 는 라플라시안 함수 f 를 나타낸다. 활성제는 정해진 속도 r_a 에 a 와 i 모두에 의

존하는 속도를 더한 속도로 생산된다. 각 센서 노드는 위의 모델을 이용하여 활성화 및 억제제 농도를 계산한다. 주어진 임계 값을 초과하는 활성화 수치를 가진 센서 노드는 활성화 된다.

또 다른 방법은 생체 내 다중 셀 시스템의 셀 간 신호 체계를 기반으로 한다^[8-12]. 특정 생체 조직이 발달하는 동안에, 노치 단백질은 먼저 서로 간의 유사한 특성을 채택하고, 프로세서리 (감각세포를 만들기 이전 단계 세포) 패치 형성을 유발하기 위해 같은 지역에서 여러 셀들을 움직인다. 첫 번째 과정은 노치-신호 측면 유도에 의해 조절되고, 두 번째 노치-신호 측면 억제에 의해서 조절된다. 측면 유도는 특정 세포 분화되는 방향으로 향하는 셀은 같은 운명을 선택하도록 옆에 있는 셀들을 유도하는 프로세서리이다. 따라서, 측면 유도 과정은 세포의 이웃하는 지역에 초기 유사성을 증폭하여 피드백 루프를 통해 균일한 공간 패턴을 생성한다. 반면에, 측면 억제 과정은 특정 운명을 향하는 이웃하는 셀들이 같은 운명을 선택하는 것을 억제한다. 따라서 기능성 패치가 형성된 것 안의 세포들은 측면 유도를 통해서 언제나 분화 단계로 발달하고, 일부 세포들은 활성화된 상태로 남아 있지만, 나머지 세포들은 불활성 상태로 남게 된다. 이론 생물학자와 수학자들은 미분 방정식 (ODEs)을 사용하여 델타-노치 신호 과정을 모델링 하였다^[8-12]. 우리는 [9]에서 제안된 다음의 간단한 모델을 고려한다. i 번째 세포에 대해 $n_i \in [0,1]$ 는 노치의 활성화 수준을 나타내고 $d_i \in [0,1]$ 는 델타 활성화 수준을 나타낸다:

$$\begin{aligned} \dot{n}_i &= f(\bar{d}_i) - n_i \\ \dot{d}_i &= \mu \cdot (g(n_i) - d_i) \end{aligned}$$

μ 는 양의 상수이고, \bar{d}_i 는 i 번째 셀의 이웃 셀들의 평균적인 델타 활성을 나타낸다. $f(\bar{d}_i)$ 는 이웃하는 셀들에서 델타 활성화의 양이 증가함에 따라 노치 활성화의 생산 속도를 나타내는 함수이다. 함수 $f(\bar{d}_i)$ 가 함수 $g(n_i)$ 와 결합하여 측면 유도 혹은 측면 억제의 영향을 모델링 한다. 예를 들어, [9]에서 측면 억제를 위한 관련 기능이 다음의 함수에 의해서 주어진다.

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{x^k}{a + x^k} \\ g(x) &= \frac{1}{1 + bx^h} \end{aligned}$$

a 와 b 는 양의 상수이며, $k \geq 1, h \geq 1$ 이다. 셀 간의 상호 작용을 통해 셀들은 여러 클러스터로 그룹화되고 각 클러스터는 특정 조직으로 진화한다. 각 클러스터 내에서, 일부 셀들은 활성화 셀들로 결정되지만, 나머지는 비활성의 지원 셀들이 되고, 이 프로세서는 무선 센서망 내에서 노드 스케줄링 제어 알고리즘으로 모방될 수 있다. 셀 간 델타-노치 신호에 기반하여, [12]에서는 3 단계 프로토콜 (즉, 클러스터링, 노드 활성화 제어 및 클러스터-헤드 선출)을 포함하는 무선 센서망에 대한 도플로지 (통신망 구성) 관리 모델을 제안 하였다. 하지만 노드는 지역적으로만 상호 작용을 하기 때문에 임무 결정적 애플리케이션 (mission-critical applications)에 대한 QoS를 보장하지 못한다. 또한 기존의 생체 모방 알고리즘은 해당 생체 시스템에서 파생된 동일한 구성 요소 디자인을 사용한다. 하지만, 확장성 및 성능 문제의 충돌로 인해, 무선 센서망에 대한 고려 없이 동일하게 적용할 수 없고 안정성 측면에서 이론적으로 입증되지 않았다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 특정 애플리케이션의 QoS를 고려할 뿐만 아니라 지역 조건과 인접 노드의 상태를 고려하는 새로운 생체 모방 네트워킹 알고리즘을 제안한다. 특히 셀 간 신호 체계에 의해 모방된 방법론을 사용하여 무선 센서망 애플리케이션의 QoS를 고려한 노드 스케줄링 제어 모델 및 알고리즘을 제안한다.

III. 셀 간 신호 체계에 기반한 노드 스케줄링 제어

3.1 모델링

망 모델링을 위해 M 개의 센서 노드로 구성된 무선 센서망을 고려한다. $M = \{1, 2, \dots, M\}$ 은 무선 센서망에서 센서 노드의 집합을 나타낸다고 생각해 보자. 각 노드의 스케줄링 제어는 τ 마다 수행되며 이와 동일한 슬롯 기간을 가진 슬롯 $[n, n+1], n=0,1,\dots$ 으로 분할되는 이산 시간 모델을 개발한다.

$q_m(n)$ 이 시간 n 에 노드 m 의 버퍼 길이라고 하자. $w_m(n)$ 와 $c_m(n)$ 를 노드 m 에서 각각 입력과 성공적인 출력 패킷 수를 나타낸다고 하자. 시간 $(n+1)$ 에서 노드 m 의 버퍼 길이는 아래 방정식에 의해서 표현된다:

$$\begin{aligned} q_m(n+1) &= \text{Sat}_{q_c} \{q_m(n) + w_m(n) - c_m(n)\} \\ \text{Sat}_a\{x\} &= \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0, \\ a & \text{if } x > a, \\ x & \text{otherwise. } q_c \end{cases} \end{aligned}$$

는 버퍼 용량이다. 본 논문에서는 컨트롤러 타임 슬롯 당 하나의 활성 기간이 발생한다고 가정한다. 활성 기간, T_a 은 모든 노드에 대해 동일하다. 노드 m 이 상태가 활성화되는 경우, T_a 초 동안에 활성 모드에 머물고, 수면 모드로 들어간다. 그렇지 않으면, 전체 컨트롤러 타임 슬롯에 대해 수면 모드가 된다.

3.2 혼잡 표시기 및 로컬 상태 표시기

센서 노드의 주변 환경 상태를 나타내기 위해서 각 노드의 로컬 상태 표시기를 소개한다. 무선 센서망에서는 트래픽 부하 변화 및 링크 품질 변동으로 인해 네트워크에서 혼잡이 종종 발생하고, 이로 인하여, 에너지 낭비, 처리량 감소, 충돌의 증가, 그리고 재전송을 유발하여 네트워크의 수명을 단축시킨다. 네트워크의 혼잡을 감지하고 측정하기 위해서, 본 논문에서는 각 센서 노드에서 버퍼 길이, 트래픽 부하 및 무선 채널 품질을 통해서, 네트워크 혼잡 수준을 측정하는 혼잡 표시기(h)를 제안한다.

$$h_m(n) = \alpha \bar{q}_m(n) + (1 - \alpha) \bar{l}_m(n)$$

$$\bar{q}_m(n) = \frac{q_m(n)}{w_m(n) + q_m(n - 1)}$$

$$\bar{l}_m(n) = \frac{r_m(n)}{r_m(n) + c_m(n)}$$

r_m 의 값은 재전송 횟수이다. \bar{q}_m 및 \bar{l}_m 의 값은 각각 큐 부하 및 채널 품질의 상태를 나타낸다. 매개 변수 α ($0 \leq \alpha \leq 1$), 는 \bar{q}_m 및 \bar{l}_m 의 영향을 조절한다. 버퍼가 비어짐에 따라, \bar{q}_m 은 거의 0에 가까워지고 패킷 드랍은 0에 가깝게 된다. 한편, 노드 m 은 혼잡함에 따라, 패킷 드랍이 증가하며 \bar{q}_m 값 역시 증가하게 된다. 채널 자체가 혼잡해짐에 따라 많은 재전송이 일어나게 되고 \bar{l}_m 값은 1에 가까이 가게 된다. 한편, 패킷들의 성공적 전송이 이어지는 경우 \bar{l}_m 는 0에 가깝다. 소비된 에너지 수준을 고려하기 위해 정규화된 에너지 소비 수준에 h_m 을 곱해서 혼잡 표시기를 수정한다. 즉, 노드 m 의 수정된 혼잡 표시기로서 \hat{h}_m 을 나타낸다.

$$\hat{h}_m(n) = e_m(n) \cdot h_m(n)$$

여기서, $e_m(n)$ 은 총 에너지에 대한 소비 에너지의 비

율이다. 따라서, 에너지의 소비가 증가하거나, 현재 혼잡 수준이 증가하면, \hat{h}_m 의 수치 또한 증가한다. 수정된 혼잡 표시기를 사용하여, 우리는 노드 m 의 지역 상태 표시기 (s_m)를 제안한다.

$$s_m(n + 1) = s_m(n) + \eta \left(g \left(\hat{h}_m(n) \right) - s_m(n) \right)$$

η 는 양의 상수이고, $g(x)$ 는 $b=1$ 인 함수이다. 혼잡 표시기 수준, \hat{h}_m 이 증가하면서 s_m 의 감소로 연결된다. 큐 부하, 링크 품질 및 소비된 에너지 수준과 같은 주변 환경 속성들이 좋을 때, 노드의 로컬 상태 표시기의 수치가 증가하며, 그 반대도 마찬가지이다. 로컬 상태 표시기 값을 계산한 이후에, 노드 m 은 s_m 을 그 이웃들에게 알린다. 센서 노드들이 그들의 로컬 상태 표시기들의 값을 이웃들의 값과 교환하고, 각 노드는 모든 이웃들의 로컬 상태 표시기들의 값을 저장하는 표를 유지한다고 가정한다.

3.3 활성 상태 표시기 및 노드 스케줄링

제안하는 노드 스케줄링 제어 방식은 나머지 노드가 수면 모드에 있는 동안에, 센서 노드들은 측면 억제를 통해서 경쟁해서 활성화된 상태를 얻게 된다. 애플리케이션 특정 요구 사항을 충족하기 위해, 우리는 기존의 셀 간 신호 체계 모델을 수정하여 노드 스케줄링 알고리즘을 위한 모델을 제안한다. 특정 애플리케이션이 중단간 지연 보장을 요구한다고 가정하자. 싱크 노드는 지연을 측정하고, 측정된 지연 및 지연 요구 사항 사이의 차이 값을 ACK 메시지에 실어서 센서 노드들에게 전송한다. 각 노드는 로컬 상태 표시기와 지연 정보를 이용하여 자신의 활성 상태 표시기 값을 계산한다. $a_m(n)$ 은 노드 m 의 활성 상태 표시기이며 다음과 같이 제안 한다.

$$a_m(n + 1) = a_m(n) + \nu \delta D(n) + \mu \left(g \left(\frac{\sum_{i \in \mathbf{N}_m} s_{mi}(n)}{s_m(n)} \right) - a_m(n) \right)$$

여기서 μ 및 ν 는 제어 매개 변수들이다. ΔD 는 싱크 노드에서 지연 피드백이고, 다음 식에 의해서 주어진다.

$$\Delta D(n) = D(n) - D_r$$

여기서, $D(n)$ 은 싱크 노드에서 시간 슬롯 $[n, n+1]$, 동안의 측정된 지연 평균이다. 그리고, D_m 은 애플리케이션 지연 요구 값이다. N_m 은 노드 m 에 대한 이웃 노드의 집합이며, s_{mi} 는 노드 i 의 로컬 상태 표시기이다. 이웃에 비해 더 높은 로컬 상태 표시기를 가진 노드는 더 높은 활성 상태 수준을 가지게 된다. 마찬가지로, 센서 노드가 이웃들보다 더 낮은 로컬 상태 수준을 가지고 있을 때, 활성 상태 수준 역시 낮아진다. 또한, 측정된 지연이 지연 요구 사항을 초과할 때, 로컬 상태 표시기의 수준에 상관없이 활성 상태 표시기의 값이 증가한다.

각 센서 노드는 $[0, 1]$ 내에 균일 분포에 따라 임의의 값 ω 을 독립적으로 생성한다. 만약 노드 m 의 a_m 의 활성 상태 표시기가 ω 미만인 경우, 그 노드는 수면 모드로 들어간다. 반면에, 만약 a_m 이 ω 보다 클 경우, 노드는 다음 컨트롤러 타임 슬롯에서 활성화 된다. 즉 노드 m 에 대한 모든 이웃들의 상대적 로컬 상태 표시기 값들이 증가하면서 노드 m 의 활성 상태 표시기도 더 작아진다. 따라서 활성 노드로서 선택될 확률은 이웃 노드들에 비해 작아지게 된다. 한편, 노드의 로컬 상태가 이웃의 상태들 보다 더 좋다면, 예를 들어, 이웃들이 링크 품질 측면에서, 트래픽 부하 측면에서, 에너지 측면에서 그 자신들이 선택되기에 알맞지 않는 경우, 노드는 활성 노드로서 선택될 가능성이 더 높다. 따라서, 셀 간 신호 체계의 경쟁적 억제 기작을 통해 센서 노드들의 일부분이 활성화 상태로 남고, 나머지는 에너지 절감을 위해 수면 상태에 머무른다. 또한 측정된 지연이 지연 요구 사항보다 더 커지면 관련된 모든 노드의 활성 상태 표시기 값은 증가되고, 더 높은 확률로 활성화 되게 된다. 결과적으로, 더 자주 패킷 전송을 수행함으로써 지연 시간이 감소된다. 이러한 방법으로, 제안된 제어기는 센서 노드가 애플리케이션 요구 사항 및 로컬 환경 조건을 모두 고려하여 자신의 행동을 결정하게 한다.

3.4 평형점 분석

다음과 같이 노드 m 의 모든 이웃 로컬 상태 표시기의 평균 수준으로 \bar{S}_m 을 정의한다:

$$\bar{S}_m = \frac{\sum_{\forall i \in N_m} s_{mi}}{|N_m|}$$

여기서, $|N_m|$ 은 N_m 내 노드 수이다. s_{mi} 는 N_m 내 노드 i 의 로컬 상태 표시기이고 다음과 같이 쓸 수 있다:

따라서 \bar{S}_m 은 다음과 같이 표현 된다:

$$s_{mi}(n+1) = s_{mi}(n) + \eta \left(g(\hat{h}_{mi}(n)) - s_{mi}(n) \right)$$

$$\bar{S}_m(n+1) = (1-\eta)\bar{S}_m(n) + \frac{\eta}{|N_m|} \left(\sum_{\forall i \in N_m} g(\hat{h}_{mi}(n)) \right)$$

$\delta_m(n) = s_m(n) - \bar{S}_m(n)$ 이라고 정의하면 δ_m 에 대한 식을 유도할 수 있다:

$$\delta_m(n+1) = (1-\eta)\delta_m(n) + \eta \left(g(\hat{h}_m(n)) - \frac{\eta}{|N_m|} \sum_{\forall i \in N_m} g(\hat{h}_{mi}(n)) \right)$$

즉,

$$\delta_{ms} = g(\hat{h}_{ms}) - \frac{1}{|N_m|} \sum_{\forall i \in N_m} g(\hat{h}_{mis})$$

$0 < s_{ms} \cdot \sum_{i \in N_m} s_{mis} / |N_m| < 1$, 이므로, 모든 $0 < \delta < \epsilon$ 에 대해 다음과 같은 관계가 성립되는 ϵ 를 가정하자:

$$s_{ms} - \frac{1}{|N_m|} \sum_{i \in N_m} s_{mis} = g(\hat{h}_{ms}) - \frac{1}{|N_m|} \sum_{i \in N_m} g(\hat{h}_{mis}) \leq \epsilon$$

$(\hat{h}_m + 1) \approx \hat{h}_m$ 일 때 충분히 작은 ϵ 에 대해, 노드 m 의 에너지 소비는 모든 이웃들에 대해 평균 에너지 소비로 근사될 수 있다:

$$e_m \approx \frac{1}{|N_m|} \sum_{\forall i \in N_m} e_{mi}$$

결론적으로, 제안한 노드 스케줄링으로 각 노드의 로컬 상태 수준은 모든 이웃 노드에 대한 평균 수준으로 수렴되고, 이것은 모든 노드들의 에너지 소모 균형이 이뤄지게 한다. a_{ms} 는 a_m 의 정상 상태 솔루션을 나타낸다고 하자. a_{ms} 은 활성 이웃 노드들의 수와 측정된 지연과 지연 요구 사항의 차이에 의해 결정된다. $\mu \gg 1$, 일 때 우리는 다음과 같이 a_{ms} 를 얻는다:

$$a_{ms} \approx g(|N_m|) = \frac{1}{1 + |N_m|^h}$$

노드 m 의 이웃하는 노드들의 수가 커질수록 활성화 상태가 될 수 있는 확률은 더 작은 값으로 수렴된다. 그 반대도 마찬가지이다. 또한, 평균 지연은 요구되는 지연시간으로 수렴된다. 결국 인접 노드들의 환경과 애플리케이션 요구 사항에 따라 활성화 상태를 결정함으로써 에너지 절약뿐만 아니라 지연 보장을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 성능 평가

4.1 실험 환경

MATLAB 시뮬레이터를 사용하여 시뮬레이션 환경을 개발한다. 제안된 방식의 효과를 보이기 위하여, 생체 모방 기반의 노드 활성화 방식 (BI-NAS)^[12]과 비교한다. 100개의 센서 노드들이 100m × 100m의 환경을 가진 지역에서 무작위로 배포되는 시뮬레이션 토폴로지를 사용한다. 배포된 센서 노드들 사이에서, 3개의 노드들 (노드 1, 2, 3)은 직접적으로 싱크 노드에 연결되어 있다. 모든 센서들은 정적이며, 배터리 전원의 같은 양을 가지고 있다. 범위 내에서 노드는 모든 이웃에게 데이터 패킷을 전송할 수 있다. 소스 노드로부터 전송된 패킷들은 가능한 경로 중 하나를 따르고, 최종적으로 노드 1, 2, 3 중 하나를 통해서 싱크 노드에 도달한다. 모든 소스 노드들은 초 당 한 패킷의 평균 패킷 도착 속도로 포아송 분포의 패킷을 생성한다. 각 패킷은 100 바이트이며, 컨트롤러 타임슬롯은 일 초이다. 우리는 $T_a = 0.01$ 초, 그리고 $D = 200$ kbps로 설정한다. 전송 전력 및 수면 전력은 각각 $24.75mW$ 및 $15\mu W$ 로 설정되어 있다. 제안된 알고리즘의 경우, 우리는 다음의 매개 변수 값들을 선택한다: $h = 1$, $a = 0.5$, $\mu = 0.1$, $\nu = 0.01$, $\eta = 0.01$. BI-NAS에 대해, 활성화 상태 임계 값은 0.5으로 설정되어 있다.

4.2 실험 결과

그림 1은 동작 중 트래픽 속도가 변경될 때, 제안된 방식의 동작을 보여 준다. 초기에 초 당 하나의 패킷으로 패킷 도착 속도를 설정하고, 500초 이후에 초 당 6 패킷 까지 향상시켰다. 그림 1(a)에서 보여주듯이, 모든 노드의 활성화 상태 표시기는 20초 이후에 거의 같은 값인 0.3으로 수렴된다. 트래픽 속도가 500 초에서

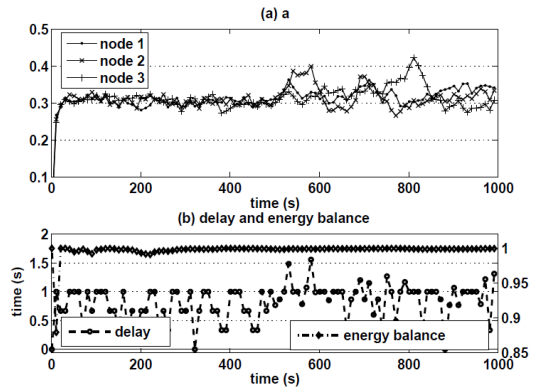


Fig. 1. Time behavior of the proposed algorithm varying traffic rates: (a) active indicator and (b) delay and energy balancing index

그림 1. 트래픽을 변화에 따른 제안된 알고리즘 성능: (a) 활성화 표시기 및 (b) 지연 및 에너지 균형 인덱스

빠르게 증가할 때, 활성화 상태 표시기가 약간 진동하지만 0.3 근처에 남아있다. 그림 5 (b)는 지연 및 에너지 균형 인덱스를 보여 준다. 지연은 런타임에서 트래픽 속도가 변함에도 불구하고, 지연 요구 사항 아래에 성공적으로 유지된다. 그림 1 (b)에서, 우리는 공정성 인덱스^[40]과 비슷한 에너지 균형 인덱스를 보여 준다. 최소 에너지 균형 지수는 $1/N$ 이고 최대 값은 1 이다. 여기서, N 은 노드의 수이다. 모든 노드의 에너지 소비가 동일해짐에 따라, 에너지 균형 인덱스가 1에 가까워지게 된다. 그림 1 (b)는 제안된 방식이 에너지 균형 인덱스를 1에 가깝게 유지함으로써 네트워크 변화 아래에 있는 노드들 사이의 에너지균형을 성공적으로 이룬다는 것을 보여 준다.

그림 2는 [0.5, 2] 초의 범위 내에서 지연 요구 사항을 변화 하면서, 제안된 알고리즘의 평균 성능을 보여 준다. 그림 2(a)는 로컬 상태 표시기, s , 및 활성화 상태 표시기, a , 를 보여준다. 지연 요구 사항이 더 느슨해짐에 따라 (예, 높은 값), 활성화 상태 표시기 값은 감소한다. 따라서 다음 컨트롤러 타임슬롯에서 노드가 활성화되는 확률을 낮춰준다. 이러한 낮은 활성화 확률은 수면 시간을 증가시켜 에너지 소모를 줄이게 된다. 반대로, 지연요구 사항이 더 엄격해짐에 따라 (더 낮은 값), 활성화 상태 표시기는 증가되고, 지연 요구 사항을 충족시키기 위해서 더욱 빈번한 패킷 전송을 하게 된다.

그림 2 (b) 로 부터, 우리는 지연이 변하는 지연 요구 값을 성공적으로 따른다는 것을 관찰할 수 있다.

그림 3은 변하는 트래픽을 환경에서 제안된 방식과 BI-NAS의 성능을 비교한다. 우리는 일 초당 [1,5] 패

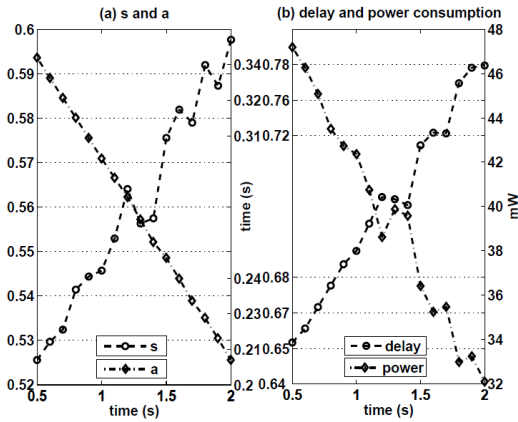


Fig. 2. Averaged performance of the proposed algorithm varying delay requirements : (a) local status indicator, active status indicator and (b) delay, consumed energy. 그림 2. 지연 요구 값 변화에 따른 제안한 알고리즘의 평균 성능: (a) 로컬 상태 지시기, 활성 상태 지시기 및 (b) 지연 시간, 전력 소비

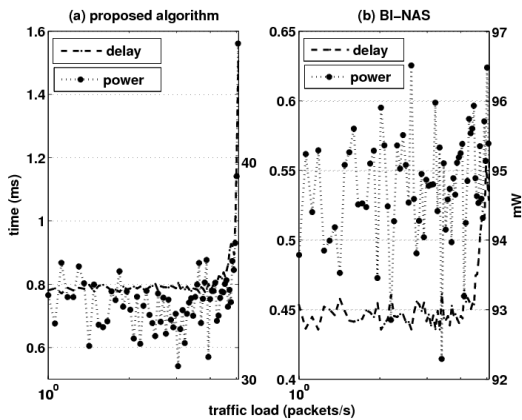


Fig. 3. Averaged performance varying traffic rates : (a) proposed algorithm and (b) BI-NAS. 그림 3. 트래픽을 변화에 따른 평균 성능: (a) 제안한 알고리즘 및 (b) BI-NAS

킷의 범위 내에서 트래픽 율을 다르게 한다. 그림 3에서 보여 지는 것처럼, 두 방식 모두 지연시간은 대체적으로 지연 요구 값 아래에 머무는 것을 확인한다. 특히, BI-NAS는 제안된 방식보다 훨씬 작은 지연을 보여준다. 그러나, 전력 소비는 제안된 방식의 거의 세 배이다. 이는 BI-NAS가 활성 상태를 제어 할 수 있도록 애플리케이션 특정 요구 사항을 고려하지 않기 때문에, 불필요하게 패킷을 전송하여 전력을 소모하기 때문이다. 제안된 알고리즘은, 트래픽 속도 변화에도 불구하고, 지연 요구 사항을 보장하면서, 많은 전력을 절약함을 보인다. 하지만 지연 시간 요구가 짧

은 경우 (0.5sec) 제안 방법은 요구 조건을 만족시키지 못함을 보인다. 반면에 지연 요구 시간이 2.0 sec 인 경우 지연 시간을 0.78 sec로 유지시킴으로 불필요하게 지연 시간을 감소시키는 경향을 보인다. 이는 파라미터 v 를 조절함으로써 지연 요구시간에 근접하게 지연 시간을 제어 할 수 있다. 본 연구는 고정 v 를 사용하지만 후속 연구에서 제어 파라미터 조절을 통해 최적화된 성능을 보이려고 한다.

V. 결론

본 논문은 무선 센서망의 에너지 절감 및 요구 지연 시간 보장을 위해 생체 내 셀 간 신호 전달 체계를 바탕으로 노드 스케줄링 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방식에서는 노드들의 지역적 환경 특성에 의해서 결정되고, 애플리케이션 특정 글로벌 요구사항에 의해 결정되는 로컬 상태 지시기 및 활성 상태 지시기를 제안하였다. 또한 생체 시스템 중 셀 간 신호체계의 측면 억제 모델을 기반으로 센서 노드의 상태를 제어 할 수 있는 새로운 수학 공식을 개발하였다. 각 노드는 로컬 상태 지시기 값을 계산하고, 제안된 활성 상태 지시기 모델에 의해 센서 노드의 일부분만 활성화되고, 나머지 수면 모드에 머무르면서 에너지를 절약하게 된다. 시뮬레이션 결과는 우리의 제안된 방식이 신뢰할 수 있는 지연 보장뿐만 아니라 더 큰 에너지 절감을 제공하여 기존의 생체 모방 일정 프로토콜보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

References

- [1] A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. K. Leung, "MAC essentials for wireless sensor networks," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, 2010.
- [2] F. Dressler and O. B. Akan, "A survey on bio-inspired networking," *Comput. Netw.*, vol. 54, no. 6, pp. 881-900, Apr. 2010.
- [3] T. Nakano, "Biologically inspired network systems: A review and future prospects," *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics - Part C: Appl. Rev.*, vol. 41, no. 5, pp. 630-643, 2011.
- [4] F. Dressler, "Self-organized event detection in sensor networks using bio-inspired promoters and inhibitors," *ACM/ICST Int. Conf. Bio-*

Inspired Models of Netw., Inf. Comput. Syst. (Bionetics 2008), 2008.

- [5] F. Dressler, "Bio-inspired feedback loops for self-organized event detection in SANETs," *IEEE/IFIP Int. Workshop on Self-Organizing Syst. (IWSOS 2008)*, vol. LNCS 5343, pp. 256-261, 2008.
- [6] K. Hyodo, N. Wakamiya, E. Nakaguchi, M. Murata, Y. Kubo, and K. Yanagihara, "Experiments and considerations on reaction-diffusion based pattern generation in a wireless sensor network," *IEEE Int. Symp. World of Wirel., Mobile and Multimedia Netw.(IEEE WoWMoM 2007)*, pp. 1-6, 2007.
- [7] G. Neglia and G. Reina, "Evaluating activator-inhibitor mechanisms for sensors coordination," *IEEE/ACM Int. Conf. Bio-Inspired Models of Netw., Inf. and Comput. Syst. (IEEE/ACM BIONETICS 2007)*, 2007.
- [8] N. A. Monk, J. A. Sherratt, and M. R. Owen, "Spatiotemporal patterning in models of juxtacrine intercellular signalling with feedback," *Inst. Mathematics and Its Appl.*, vol. 121, pp. 165-193, 2001.
- [9] J. R. Collier, N. A. Monk, P. K. Maini, and J. H. Lewis, "Pattern formation by lateral inhibition with feedback: A mathematical model of delta-notch inter-cellular signalling," *Theoretical Biology*, vol. 183, no. 4, pp. 429-446, 1996.
- [10] S. D. Webb and M. R. Owen, "Oscillations and patterns in spatially discrete models for developmental intercellular signalling," *Mathematical Biology*, vol. 48, no. 4, pp. 444-476, 2004.
- [11] C. Charalambous and S. Cui, "A bio-inspired clustering algorithm for wireless sensor networks," in *Proc. 4th Annu. Int. Conf. Wirel. Internet*, 2008.
- [12] C. Charalambous and S. Cui, "A biologically inspired networking model for wireless sensor networks," *IEEE Netw.*, vol. 24, no. 3, pp. 6-13, 2010.
- [13] J. Son, S. Shon, and H. Byun, "Bio-inspired energy efficient node scheduling algorithm in

wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 38A, no. 6, pp. 528-534, 2013.

변희정 (Heejung Byun)



1999년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 졸업
 2005년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석/박사
 2010년 2월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원
 2010년 3월~현재 : 수원대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야> 네트워크 제어

손수국 (Sugook Son)



1982년 2월 : 서울대학교 전기공학과 졸업
 1984년 2월 : 서울대학교 전기공학과 석사
 1996년 2월 : University of Texas at Austin 공학박사
 현재 : 수원대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야> 임베디드 시스템, 네트워크