

# 무선 센서 네트워크를 위한 셀룰러 오토마타 기반의 노드 스케줄링 제어

변희정\*, 손수국°

## Cellular-Automata Based Node Scheduling Scheme for Wireless Sensor Networks

Heejung Byun\*, Sugook Shon°

### 요약

무선 센서 네트워크는 일반적으로 에너지를 위해 배터리에 의존하는 밀집되게 배치된 센서 노드들로 구성된다. 이와 같이 여러 개로 밀집되게 배치된 센서 노드들은 에너지 낭비 및 센서 데이터의 높은 중복 전송을 야기한다. 상기 전원 관련 제약 및 높은 중복성과 같은 양자 문제는 센서 노드들 간의 적절한 노드 활동 스케줄링에 의해 해결될 수 있다. 본 논문에서는 우수한 커버리지 성능 보장 및 노드들 간 에너지 절약과 네트워크 수명의 연장을 위한 셀룰러 오토마타 (CA) 기반의 노드 스케줄링 알고리즘이 제안된다. 또한 CA 프레임워크에 기반하여 노드 스케줄링 알고리즘의 새로운 수학적 모델을 제안한다. 제안한 알고리즘은 스케줄링 결정을 위해 노드 내 지역 환경 조건의 변경 및 인접 노드들의 상태 정보를 이용한다. 본 논문은 제안한 방식을 적용한 시스템의 동작을 분석하고 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 알고리즘이 센싱 커버리지 품질을 유지하면서 유의한 에너지 절약을 갖춘 에너지 균형을 보장함을 확인하였다.

**Key Words** : Cellular automata, energy-efficiency, coverage, node scheduling, wireless sensor networks

### ABSTRACT

Wireless sensor networks (WSNs) generally consist of densely deployed sensor nodes that depend on batteries for energy. Having a large number of densely deployed sensor nodes causes energy waste and high redundancy in sensor data transmissions. The problems of power limitation and high redundancy in sensing coverage can be solved by appropriate scheduling of node activity among sensor nodes. In this paper, we propose a cellular automata based node scheduling algorithm for prolonging network lifetime with a balance of energy savings among nodes while achieving high coverage quality. Based on a cellular automata framework, we propose a new mathematical model for the node scheduling algorithm. The proposed algorithm uses local interaction based on environmental state signaling for making scheduling decisions. We analyze the system behavior and derive steady states of the proposed system. Simulation results show that the proposed algorithm outperforms existing protocols by providing energy balance with significant energy savings while maintaining sensing coverage quality.

\* 본 연구는 경기도지역협력연구센터(GRRC)사업의 일환으로 수행하였음 (GRRC SUWON 2014-B4)

• First Author : Suwon University Department of Information & Telecommun. Engineering, heejungbyun@suwon.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Suwon University Department of Information & Telecommun. Engineering, sshon@suwon.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2014-08-306, Received August 18, 2014; Revised September 23, 2014; Accepted September 23, 2014

## I. 서 론

무선 센서 네트워크는 목표물 추적, 인프라 보안, 전장 감시, 건강 모니터링 및 교통 통제와 같은 애플리케이션 등에서 사용하는 다양한 물리적 현상을 모니터링하며 감시하는 장치들을 연결한다. 무선 센서 네트워크는 일반적으로 배터리로 구동되는 매우 작은 여러 개의 센서 노드로 구성된다. 따라서 무선 센서 네트워크를 배치하는데 중요한 문제는 무선 센서 네트워크 고유의 에너지 제약 및 그 크기와 관련된 것이다. 첫 번째, 에너지 보존에 의한 네트워크 수명의 최대화는 무선 센서 네트워크의 중요한 문제이다. 기존의 무선 센서 네트워크용 매체 접근 제어 (medium access control (MAC)) 프로토콜은 주로 에너지 절약을 위해 설계되었다<sup>[1-4]</sup>. 일반적으로 활성 상태에 일부 센서 노드 집합만을 가동하고 나머지는 절전 모드로 두어 네트워크 수명을 연장할 수 있다. 특별히 무선 센서 네트워크의 토폴로지 제어는 주로 센싱 및 통신 작업을 위한 최소한의 노드 구성을 적용하여 네트워크의 수명을 연장하기 위해 사용된다. 둘째, 대규모 무선 센서 네트워크는 높은 수준의 자기 조직화 (self-organization)를 요구하는데 각각의 시스템 개체는 그들이 이웃 개체들과 지역적 상호작용에 근거하여 의사결정을 내리게 된다<sup>[5,6]</sup>. 최근에 무선 센서 네트워크의 에너지 효율 및 확장성의 실현을 위해 간단한 셀룰러 오토마타 (cellular automata (CA)) 구조가 많은 관심을 받고 있다<sup>[7-19]</sup>. CA에 있어서 각각의 셀은 그 자신의 상태를 자동으로 결정하며 다른 이웃 셀들의 상태를 다시 입력으로 받아들이는 오토마타로서 작동한다<sup>[7-10]</sup>. 따라서, 이웃 셀들의 상태들은 중심 셀의 새로운 상태를 계산하는데 사용된다. 이러한 단순한 CA 구조는 여러 분야 연구자들의 관심을 이끌었다. 특히 CA는 무선 네트워크의 채널 할당 및 토폴로지 제어와 같은 많은 애플리케이션들의 적절한 모델로서 제안되었다<sup>[11-19]</sup>. CA에 기반한 에너지 보존 방법<sup>[14-16]</sup>은 특정 시간 동안 중복 모니터링 작업을 수행하는 노드들의 전원을 꺼 네트워크 수명을 연장하도록 하였다.

CA에 기반한 토폴로지 제어는 활성 이웃 노드들이 발견되는 시에만 네트워크 노드들을 활성화하고 그렇지 않으면 에너지 절약을 위해 유힬상태로 전환시켰다<sup>[17-20]</sup>. 그러나 기존의 CA 기반의 시스템들은 휴리스틱(heuristic) 방법에 근거하여 이웃 노드의 상태에 따라 새로운 노드 상태를 계산하였거나 또는 활성 이웃 노드 수를 계산하여 노드가 계속 유힬상태로 남을

것인지 아니면 활성 상태로 전환될지를 결정하였다. 또한, 기존의 시스템들은 네트워크의 에너지 불균형을 초래하는 지역 환경 품질의 변화를 고려하지 않았다. 더욱이 이들 시스템은 이론적으로 평형점의 관점에서 분석되지 않았고 이러한 문제점들이 해당 시스템들의 분석의 복잡성으로 인하여 단지 시뮬레이션 중 발견되었다. 따라서, 기존 시스템들은 CA기반 시스템들의 성능 상태를 정확하게 추정할 수 없었다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문은 에너지 절약의 균형을 유지하면서 무선 센서 네트워크의 우수한 커버리지 품질을 달성할 수 있는 CA 기반의 에너지 효율적인 노드 스케줄링 방법을 제안한다. CA 프레임워크에 기반하여 본 논문은 무선 센서 네트워크에서 센서 노드 상태를 조정하는 새로운 수학적 방정식을 개발한다. 제안한 알고리즘은 노드 스케줄링 의사결정을 위해 오직 지역적 정보만을 이용한다.

## II. 셀룰러 오토마타 기반 노드 스케줄링 알고리즘

### 2.1 셀룰러 오토마타

살아 있는 것 중 우리가 합리적으로 생각할 수 있는 가장 간단한 시스템은 생물학적 셀이다. 생명체 중 가장 복잡한 형태는 멀티셀룰러 유기로서 여러 셀들의 복합체로 구성된다. 멀티셀룰러 시스템은 그 상호작용으로 글로벌 동작을 생산하는 여러 기초 셀의 복사형태로 구성된다. 셀룰러 시스템은 다음과 같은 요소로 구성된다. 셀룰러 공간, 시간 변수, 상태 집합, 이웃, 및 상태 전이 함수 등이 그것이다. 가장 간단하고 많이 사용되는 셀룰러 시스템은 셀룰러 오토마톤 (Cellular Automaton)<sup>[7-9]</sup>이다. CA는 이차 식  $(C, S, N, f)$ 으로 정의되며  $C$ 는 셀들의  $d$ -차 배열을 표기한다.  $S = \{0, 1, \dots, s-1\}$ 는 각 셀이 가질 수 있는 상태 집합을 표기하며  $N$ 은 이웃 집합, 그리고  $f$ 는 전이 함수를 나타낸다. CA의 전이 함수  $f$ 는 결정론적 함수로서 시간  $t$ 에서의 해당 셀의 이웃  $N_i$  셀들의 상태에 대한 함수로서 시간 단계  $(t+1)$ 의  $i$ 번째 셀의 상태  $s_i(t+1)$ 을 결정한다.

$$s_i(t+1) = f(s_j(t) : j \in N_i). \quad (1)$$

### 2.2 노드 스케줄링 알고리즘

본 논문은  $M$ 개의 센서 노드들로 구성된 무선 센서 네트워크를 고려한다.  $\mathbf{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 를 무선 센서 네트워크의 센서 노드 집합이라고 하자. 본 논문에서

$N_i(i \in \mathbf{M})$ 는 노드  $i$ 의 모든 이웃 노드들 집합을 나타내며  $N_i$ 는 집합  $N_i$ 의 크기를 나타낸다.  $\mathbf{F}$ 는 네트워크의 모든 흐름의 집합을 나타내며 모든 데이터 전송은 싱크 노드를 향하고 있다. 본 논문에서 값들을 측정하거나 상태를 제어할 때 특정 시간에서 이뤄지며 여기서 제어 시간은 슬롯  $[t, t+1]$ ,  $t=0, 1, \dots$ 으로 분할되고 슬롯 지속 기간은  $\pi$ 와 같다. 본 논문에서는 에너지 소비와 관련된 지역 환경의 조건을 나타내는 노드  $i$ 의 지역 상태 표시기  $x_i (\forall i \in \mathbf{M})$ 를 제안한다. 매 제어 시간마다 노드  $i (\forall i \in \mathbf{M})$ 는 소모하는 에너지를 측정하고 다음과 같이  $x_i$ 의 값을 구한다.

$$x_i(t) = x_i(t-1) + \nu(g(e_i(t)) - x_i(t-1)) \quad (2)$$

여기서  $\nu(\leq 1)$ 는 양의 상수이며  $g(x)=1/1+x$ 이다. 식 (2)에 의해 노드  $i$ 의 소모되는 에너지 수준  $e_i$ 가 증가할수록  $g(e_i)$  값은 감소하며 이는 곧  $x_i$ 의 감소를 이끈다. 지역 상태 표시기 값을 구한 후 노드  $i$ 는 이웃 노드들에  $x_i$ 를 브로드캐스트 한다. 본 논문은 센서 노드들이 그들의 이웃 노드들과 자신의 지역 상태 표시기 값을 교환하며 각 노드는 모든 이웃 노드들의 해당 지역 상태 표시기 값이 저장된 테이블을 가지고 있다고 가정한다. 여기서  $s_i$ 는 노드  $i$ 의 활성 표시기를 나타낸다. 각 노드의 활성 표시기는 자신의 지역 상태 표시기와 이웃 노드들과의 지역 상태 표시기 값들을 비교하여 결정한다. 보다 자세하게는 이웃으로부터  $s_x$ 의 입력 정보를 수신 한 후 각 노드는 다음 식으로  $s_i$ 를 결정한다.

$$\lambda_i(t) = \lambda_i(t-1) + \eta \left( g \left( \frac{\sum_{j \in N_i} x_j(t-1)}{x_i(t-1)} \right) - \lambda_i(t-1) \right) \quad (3)$$

여기서  $\eta(\leq 1)$ 는 양의 제어 변수이다. 식 (3)에 의하면 그 이웃들에 비해 지역 상태 표시기가 높은 노드는 보다 높은 활성수준을 가지게 된다. 마찬가지로 센서 노드는 이웃 노드들의 지역 상태 표시기가 더 높으면 낮은 활성 표시기를 가지게 된다.  $\eta$ 와  $\nu$ 값을 증가하면 수렴 속도는 빨라지지만 그에 따라 값이 크게 되면 오실레이션이 발생하며 불안정한 동작을 보이게 된다. 활성 표시기 수준을 사용하여 각 노드는 다음 시간 슬롯의 출력 모드 즉 활성 또는 절전 모드인지를 결정한다. 출력 모드  $y_i(t)$ 는 활성 표시기 및 임계값  $\vartheta$ 의 함수이다.

$$y_i(t) = \Phi(\lambda_i(t) - \vartheta) \quad (4)$$

여기서  $\Phi$ 는  $[0, 1]$ 사이의 균일한 분포를 따르는 랜덤 값이다. 전이 함수  $\Phi(\cdot)$ 는 다음 조건으로 된 스텝 함수이다.

$$\Phi(\lambda_i(t) - \vartheta) = \begin{cases} 1 & \lambda_i(t) > \vartheta \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

만약 노드  $i$ 의 활성 표시기인  $\lambda_i$ 가  $\vartheta$ 보다 작으면, 해당 노드는 절전 모드로 된다. 반대로  $\lambda_i$ 가  $\vartheta$ 보다 크면 해당 노드는 다음 제어 시간 슬롯에서 활성 모드로 될 것이다. (2)-(5)식에 따르면 노드의 이웃 노드들의 지역 상태가 에너지 관점에서 여유가 많아지게 되면 노드의 활성 표시기는 작아진다. 즉, 노드의 이웃 노드들이 보다 좋은 환경 조건에 놓이게 되면 해당 노드가 활성 노드로 선택 될 확률은 점점 낮아진다. 반대로 노드의 지역 상태가 이웃 노드들의 에너지 상태보다 좋다면, 즉 이웃 노드들이 에너지 측면에서 활성 노드로 적합하지 않다고 판단된다면 해당 노드는 활성 노드로 선택될 가능성이 높아진다. 이와 같은 방식으로 센서 노드들의 부분 집합은 계속 활성 상태로 남으며 나머지 노드들은 절전 모드로 머물며 결국 에너지 절약을 이루게 된다.

### 2.3 셀룰러 오토마타 기반 노드 스케줄링

앞 절에서 대략적으로 묘사된 알고리즘을 CA 프레임워크에 기반한 노드 스케줄링 알고리즘으로 기술하려고 한다. 우선 하나의 활성 기간은 제어 시간 슬롯 내에서 일어난다고 가정한다. 활성 기간  $T_a$ 는 고정되며 이는 모든 노드에서 동일하다. 노드  $i$ 가 본인을 활성 상태로 결정한 경우  $T_a$ 초 동안 활성 모드로 머물며 그 후 다시 절전 모드로 진입한다. 그렇지 않으면 전체 제어 시간 슬롯 동안 절전 상태로 있게 된다. CA 규칙을 표현하기 위해 다음과 같이 함수 (3)은 양극성 활성 함수로 단순화된다.

$$\lambda_i(t) = \lambda_i(t-1) + \begin{cases} \eta & \text{if } g \left( \frac{\sum_{j \in N_i} x_j(t-1)}{x_i(t-1)} \right) > \lambda_i(t-1) \\ -\eta & \text{else if } g \left( \frac{\sum_{j \in N_i} x_j(t-1)}{x_i(t-1)} \right) < \lambda_i(t-1) \\ 0 & \text{else } g \left( \frac{\sum_{j \in N_i} x_j(t-1)}{x_i(t-1)} \right) = \lambda_i(t-1). \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에 의하면, 노드의 활성 수준은 해당 노드에 대한 모든 이웃 노드들의 상대적인 지역 상태 표시기 값들에 따라 적응하게 된다. 각 노드의 상태들을 기술하기 위하여 활성 표시기  $\lambda_i$  값이  $(\Gamma+1)$ 개의 고유한 요소로 분할하였다.

$$\Lambda = \{\bar{\lambda}_0, \bar{\lambda}_1, \dots, \bar{\lambda}_\Gamma\} \quad (7)$$

여기서  $\Gamma = \lceil 1/n \rceil$  및  $\lceil x \rceil$  는  $x$ 보다 큰 가장 작은 정수 값이다. 즉,  $\lambda_j$  ( $0 \leq j \leq \Gamma$ ) 값은  $(j \cdot n)$ 과 동일하게 된다. 본 논문에서 CA 상태 집합  $S = \{s^0, s^1, \dots, s^\Gamma\}$ 는  $\Lambda$ 의  $j$ 번째 요소에 대응하는 활성수준의 값들을 나타내는  $s_j$ 로서 정의된다. 식(6)에 의해 오직 업데이트 된 노드의 활성 수준의 전달한 차이에만 의존하는 간단한 CA 규칙을 만들었다. 시간 슬롯  $(t-1)$  에서 상태  $s_k$  임을 가정할 때 노드  $i$ 의 다음 상태는 다음 전이 규칙에 의해 결정된다.

$$s_i(t) = \begin{cases} s^{k+1} & \text{if } d\lambda_i(t) > 0 \\ s^{k-1} & \text{else if } d\lambda_i(t) < 0 \\ s^k & \text{else } d\lambda_i(t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $d\lambda_i(t) = \lambda_i(t) - \lambda_i(t-1)$ . 노드  $i$ 의 다음 상태가  $s_i$  로 결정되면 해당 활성 수준을 이용하여 출력모드 즉 활성 혹은 절전 모드를 결정한다.

$$y_i(t) = \Phi(\bar{\lambda}_p - \vartheta). \quad (9)$$

본 CA 모델은 유한 입력 집합, 유한 상태 집합, 유한 출력 집합, 및 현재 상태와 입력의 함수 및 현재 상태의 함수로서 현재 출력을 제공하는 출력 함수상태의 전이 함수로 이루어진 이산시간 시스템이다. 즉, 노드의 상태는 해당 노드의 이웃 노드들의 상태에 의해 결정된다. 그러나, 본 CA 기반의 모델링은 상태 시 발생한 이벤트들을 고려하지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 우리는 CA 모델을 5-tuple 모델  $(C, S, \Sigma, N, f)$ 로 수정되며 여기서  $\Sigma$ 는 상태에서의 이벤트 집합을 나타낸다. 이벤트 집합  $\Sigma$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Sigma = \{e_g^-, e_g^0, e_g^+, e_\eta^-, e_\eta^0, e_\eta^+\} \quad (10)$$

이벤트 집합과 함께 우리는 각 노드의 상태 집합을 다음과 같이 재정의 하였다.

$$S = \{S_0, \dots, S_\Gamma, S_0^g, \dots, S_\Gamma^g, S_0^{g^0}, \dots, S_\Gamma^{g^0}, S_0^{g^+}, \dots, S_\Gamma^{g^+}\}. \quad (11)$$

본 알고리즘의 목적은 각 노드의 활성 표시기 수준을 동일한 값으로 안정화시켜 에너지 불균형을 해소하기 위한 것이다. 제안한 CA 규칙에 따라 각 노드는 그들의 활성 수준에 적응하며 이로 인해  $g(\cdot)$  값은 안정된 상태에서 현재의 활성 수준에 수렴한다. 우리는 안정된 상태에서의 활성 수준을  $\lambda_p$ 로서 표기한다. 이때  $p$ 는 다음과 같다.

$$p = \{j : \bar{\lambda}_j \leq \frac{1}{1+N_i} \leq \bar{\lambda}_{j+1}\}. \quad (12)$$

### III. 실험

#### 3.1 실험 구성

우리의 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 MATLAB 시뮬레이터를 사용하여 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 제안한 알고리즘의 효과를 보이기 위하여 우리는 두개의 기존 방법 [18] 및 [19]와 제안한 알고리즘을 비교하였다. 기존의 방법 [18]에서 만약 주위에 활성 노드가 적을 때에만 네트워크 노드를 활성화하는 셀룰러 오토마타 토폴로지 제어 (Cellular Automata for Topology Control(CATC)) 기법이 제안되었다. 기존의 [19] 방법에서는 생물학에서 영감을 얻은 스케줄링 기법 (BISS)가 제안되었는데 이는 선택 적응에 기반한 스케줄링 기법으로 의사 결정시 지역 정보를 사용한다. 우리는 센서 노드들이 무작위로 반경 100m x 100m의 범위 내에 배치되는 시뮬레이션 토폴로지를 사용하였다. 모든 센서들은 초기에 동일하게 유한한 양의 배터리 동력을 가진다. 노드는 허용 범위 내 어떤 이웃에게도 패킷을 전송할 수 있다. 모든 소스 노드들은 초당 1개의 평균 패킷 도착률을 가진 포아송 분포의 패킷을 생성한다. 각 패킷은 100 바이트 크기이며 제어 시간 슬롯은 1초이다. 우리는 채널 용량을 200kbps로 설정하였다. 전송 전력 및 절전 전력은 각각 24.75mW 및 15μW로 설정되었다. 모든 노드들은 이웃에 대한 정보 없이 시작하였고 따라서 빈 이웃 테이블을 가지며 시작한다.

### 3.2 실험 결과

그림 1은 모든 노드들이 사용한 평균 에너지 소모량과 에너지 균형 지수를 도시한다. 우리는 노드 개수를 30에서 100개의 범위 내에서 다양하게 변화를 주었다. 각각 다른 노드 개수마다 1000번의 시뮬레이션이 사용되어 에너지 소모량 평균 값을 구했으며 따라서 그래프의 각 점은 1000번의 실행 평균 값을 나타낸다. 그림 1(a) 및 (b)에 도시된 바와 같이 CATC 및 BISS는 소모 에너지량에 있어서 유사한 동작을 보였다. 각기 다른 노드 개수에서의 평균 소모 에너지량은 거의 일관되었다. 이는 모든 노드에서 전체 소모된 에

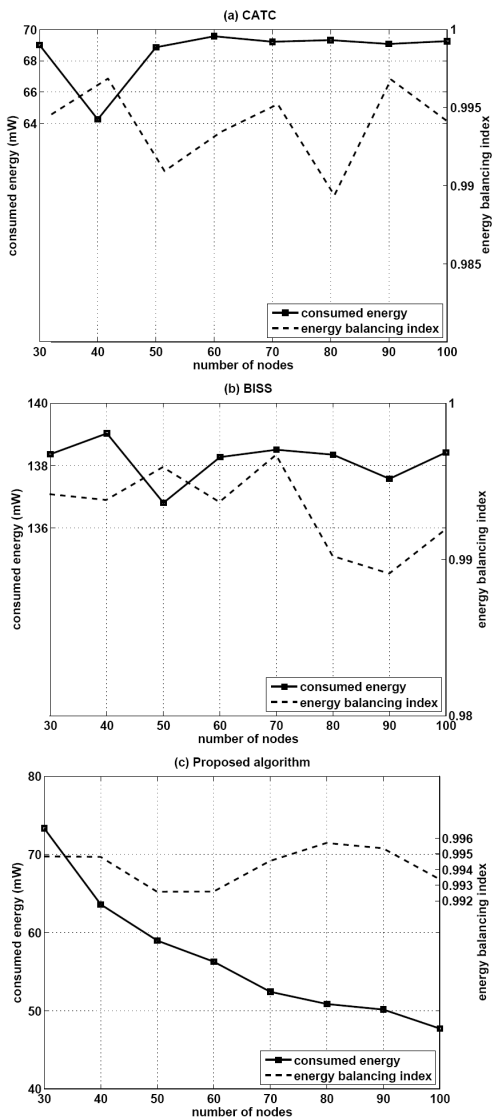


그림 1. 소모된 에너지와 에너지 균형 인덱스  
Fig. 1. Consumed energy and energy balancing index

너지량이 노드 개수에 비례하여 증가하기 때문이다. BISS에서 센서 노드들은 절전 모드, 스니프 (sniff) 모드 또는 활성 모드중 하나가 될 수 있다. 스니프 모드에서 센서 노드들은 특정 시간동안 통신 채널에 청취하여 활성 이웃들의 평가 결과를 수집한다. 평가 결과에 의해 스니프 모드에서의 센서 노드들은 절전 모드 또는 활성 모드로 전환한다. 활성 모드에서의 에너지 소모량이 가장 높고 다음 스니프 모드가기 때문에 BISS의 에너지 소모량은 CATC와 제안한 알고리즘의 그것보다 많았다. 제안한 알고리즘의 경우 그림 1(c)

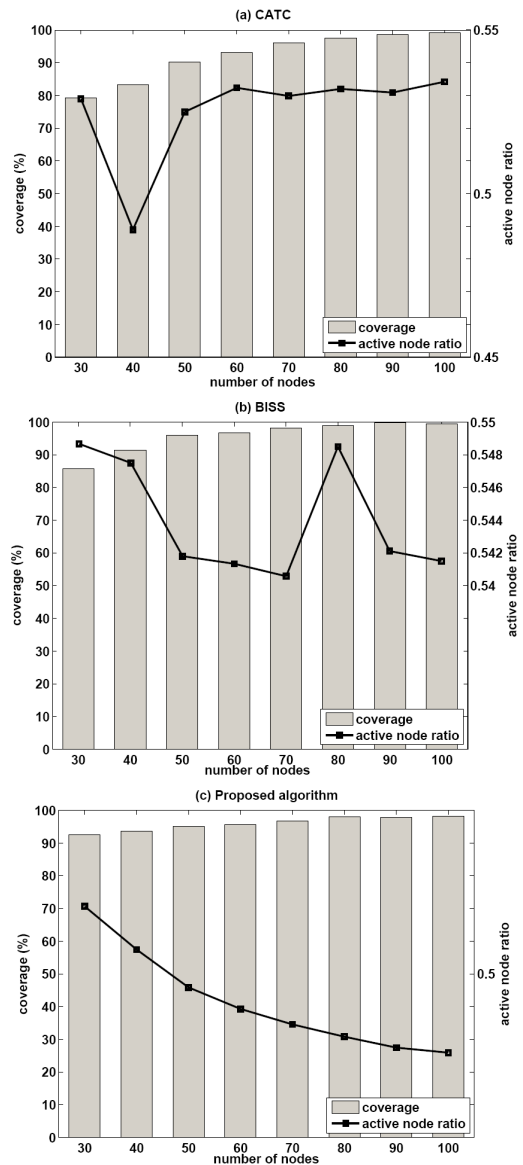


그림 2. 커버리지와 활성노드율  
Fig. 2. Coverage and active node ratio

에 도시된 바와 같이 평균 소모 에너지량은 노드 개수가 증가할수록 감소하였다. 이는 제안한 알고리즘이 전체 센서 노드의 개수에 상관없이 센싱 영역을 커버하는데 필요한 최소 노드 개수를 활성화시키기 때문이다. 결과적으로 노드의 개수가 증가하면서 제안한 알고리즘은 보다 많은 노드들이 활성 모드로 변경되지 않고 절전 모드로 전이하게 되고 이는 CATC 및 BISS에 비해 보다 적은 에너지 소비를 의미하게 된다.

에너지 균형 지수는 그림 1에 도시되어 있다. 비교한 방법들이 모든 노드에서 소모된 에너지량이 공평하게 배분되었음을 보여 주었으나 CATC와 BISS는 노드 개수가 변함에 따라 다소 불규칙적인 동작을 보였다. 비교 결과 제안한 알고리즘은 모든 노드 개수에서 거의 일정한 에너지 균형 지수를 유지하였다.

그림 2는 CATC, BISS 및 제안한 알고리즘이 달성한 커버리지 성능을 보여준다. 세 개의 모든 방법들은 노드 개수가 증가하면서 전체를 커버하는 성능을 자연스럽게 보여 주었다. 그러나 CATC의 커버리지는 노드 개수가 30 미만인 경우 대략 80% 미만이었고 노드 개수가 50이 될 때까지는 90%를 초과하지 못하였다. BISS의 경우 노드개수가 40이상일 때 커버리지의 90%를 달성하였다. 이와 비교하여 제안한 알고리즘은 모든 노드 개수에서 커버리지 90% 이상을 달성하였다. 활성 노드 비율 또한 그림 2에 도시되어 있다. CATC와 BISS의 경우 활성 노드 비율은 노드 개수가 다양하게 변하는 가운데 거의 일관된 모습을 보였다. 이는 전체 노드 개수가 증가할 때 활성 노드의 개수도 선형적으로 증가함을 의미한다. 본 결과는 노드 개수가 증가할수록 CATC와 BISS가 매우 높은 중복 센서 데이터 전송 및 에너지 허비를 가져옴을 의미한다. 반면 제안한 알고리즘은 전체 노드 개수가 증가할수록 활성 노드 비율은 감소함을 보여 주었는데 이는 전체 노드 개수와 상관없이 활성 노드 개수가 일관됨을 보여주는 것이다. 따라서 보다 많은 노드 개수가 활성화되기보다 절전 모드로 설정되게 되어 네트워크 수명이 연장되는 것이다.

결론적으로 커버리지 및 활동 노드 비율에 대한 모든 결과를 고려할 때 제안한 알고리즘이 보다 우수한 커버리지 성능을 보이며 활성 노드 개수를 최소화하면서 에너지 소비를 감소시키는 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

본 논문에서 우리는 무선 센서 네트워크에서 에너지 절약의 균형을 달성하고 우수한 커버리지 품질을

유지하기 위하여 셀룰러 오토마타 기반의 노드 스케줄링 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 완전히 분산적이며 노드에 의한 모든 의사 결정은 그들의 환경을 관측하여 지역 내에서 수행된다. 각각의 센서 노드는 이웃 노드들과 직접 상호

작용하며 그들의 에너지 수준과 커버리지에 동적으로 변화하며 반응한다. 보다 상세히 각 노드는 자신의 소비 에너지 수준에 근거하여 지역 상태 표시기를 구하며 이웃 노드들에 대해 상대적인 지역 상태 표시기에 따라 활성 표시기 수치를 결정한다. 지역 상태 표시기와 활성 표시기를 이용하여 우리는 제안한 알고리즘과 같은 새로운 수학적 CA 모델을 개발하였고 제안한 CA 모델은 지역 환경 조건의 변경 및 이웃하는 노드들의 상태에 따라 스케줄링 의사 결정을 하였다. 따라서 센서 노드의 일부 부분 집합만이 활성화되면서 나머지는 절전 모드로 남아 에너지를 절약할 수 있었다. 시뮬레이션 결과는 우리의 제안한 방식이 무선 센서 네트워크에서 보다 많은 에너지 절약과 에너지 균형은 물론 우수한 센싱 커버리지 품질을 제공하여 기존의 CA기반의 프로토콜보다 우수한 성능을 보여주었다.

#### 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] S. C. Ergen and P. Varaiya, "PEDAMACS: Power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 5, no. 7, pp. 920-930, 2006.
- [3] C. J. Merlin and W. B. Heinzelman, "Duty cycle control for low-power-listening MAC protocols," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 9, no. 11, pp. 1508-1521, 2010.
- [4] X. Wang, X. Wang, G. Xing, and Y. Yao, "Dynamic duty cycle control for end-to-end delay guarantees in wireless sensor networks," *Int. Workshop Quality of Service (IWQoS)*, pp. 1-9, Beijing, Jun. 2010.
- [5] F. Dressler and O. B. Akan, "A survey on bio-inspired networking," *J. Computer Networks*, vol. 54, no. 6, pp. 881-900, Apr. 2010.

- [6] T. Nakano, "Biologically inspired network systems: A review and future prospects," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Appl. and Rev.*, vol. 41, no. 5, pp. 630-643, 2011.
- [7] S. Wolfram, "Universality and complexity in cellular automata," *J. Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 10, no. 1-2, pp. 1-35, Jan. 1984.
- [8] P. Sarkar, "A brief history of cellular automata," *J. ACM Computing survey*, vol. 32, no. 1, pp. 80-107, Mar. 2000.
- [9] A. Ilachinski, *Cellular Automata: A Discrete Universe*, World Scientific, 2001.
- [10] S. Torbey, "Towards a framework for intuitive programming of cellular automata," M.S. Thesis, School of Computing, Queen's University, ON, Canada, 2007.
- [11] W. Zhang, J. Yuan, Z. Yu, Z. Xu, and X. Shan, "Study of the global behavior of wireless sensor networks based on cellular automata," *J. Physics*, vol. 57, no. 11, pp. 6896-6900, 2008.
- [12] W. Li, A. Y. Zomaya, and A. Al-Jumaliy, "Cellular automata based models of wireless sensor networks," in *Proc. ACM Int. Symp. Mobility management and wireless access*, pp. 1-6, 2009.
- [13] Y. Baryshnikov, E. Coffman, and K. Kwak, "High performance sleep-wake sensor systems based on cyclic cellular automata," in *Proc. Int. Conf. Inf. Process. in Sensor Networks*, pp. 517-526, 2008.
- [14] S. Adabi, A. Zadeh, A. Data, and S. Adabi, "Cellular automata based method for energy conservation solution in wireless sensor network," in *Proc. Int. Conf. Wirel. Commun., Networking and Mobile Computing*, pp. 1-5, 2008.
- [15] I. Banerjee, S. Das, H. Rahaman, and B. Sikdar, "An energy efficient monitoring of ad-hoc sensor network with cellular automata," in *Proc. Int. Conf. systems, man and cybernetics*, vol. 6, pp. 5100-5105, 2006.
- [16] R. O. Cunha, A. P. Silva, A. A. F. Loureiro, and L. B. Ruiz, "Simulating large wireless sensor networks using cellular automata," in *Proc. 38th Annual Simulation Symp.*, pp. 323-330, 2005.
- [17] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, *Energy efficient robust sensing coverage in large sensor networks*, UCLA Technical Report, 2002.
- [18] S. Athanassopoulos, C. Kaklamanis, P. Katsikouli, and E. Papaioannou, "Cellular automata for topology control in wireless sensor networks," in *Proc. 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf.*, pp. 212-215, 2012.
- [19] C. Cheng, C. K. Tse, and F. C. M. Lau, "A bio-inspired scheduling scheme for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 223-227, 2008.
- [20] 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 Shon)**



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