

## 크리티컬한 제어 시스템용 고강건 무선 센서 액추에이터 네트워크

박관근\*

### Robust Wireless Sensor and Actuator Network for Critical Control System

Pangun Park\*

\*Associate Professor, Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134 Korea

#### 요 약

무선 링크의 불확실성과 임베디드 장치의 결함으로 인하여 무선 네트워크 기반 제어 시스템의 안정성을 보장하는 것은 여전한 도전과제이다. 본 논문에서는 시간, 채널 및 공간 자원의 다양성을 조합하여 계층적 클러스터 기반 고강건 무선 센서 액추에이터 네트워크(R-WSAN; Robust Wireless Sensor and Actuator Network)를 제시한다. R-WSAN은 무선 네트워크 자원 할당을 위한 스케줄링 알고리즘과 다중 플랜트의 제어 안정성을 보장하기 위한 제어 업무 공유 알고리즘을 포함한다. 또한, 제시된 프로토콜은 Zolertia RE-Mote 임베디드 하드웨어와 Contiki-NG를 기반으로 구현되고, 실험을 통하여 성능을 분석하였다. 실험 결과를 통해 R-WSAN이 무선 링크 및 노드의 결함에도 고강건성을 보장하는 것을 보여 주었다. 또한, 제시된 스케줄링 알고리즘과 제어 공유 알고리즘을 통해, 제어 노드의 결함에도 제어 시스템의 안정성을 보장할 수 있음을 보여주었다.

#### ABSTRACT

The stability guarantee of wireless network based control systems is still challenging due to the lossy links and node failures. This paper proposes a hierarchical cluster-based network protocol called robust wireless sensor and actuator network (R-WSAN) by combining time, channel, and space resource diversity. R-WSAN includes a scheduling algorithm to support the network resource allocation and a control task sharing scheme to maintain the control stability of multiple plants. R-WSAN was implemented on a real test-bed using Zolertia RE-Mote embedded hardware platform running the Contiki-NG operating system. Our experimental results demonstrate that R-WSAN provides highly reliable and robust performance against lossy links and node failures. Furthermore, the proposed scheduling algorithm and the task sharing scheme meet the stability requirement of control systems, even if the controller fails to support the control task.

**키워드** : 네트워크 최적화, 무선 네트워크, 강건성, 크리티컬 제어 시스템

**Keywords** : Network optimization, Wireless networks, Robustness, Critical control systems

Received 22 July 2020, Revised 15 August 2020, Accepted 20 August 2020

\* Corresponding Author Pangun Park(E-mail:pgpark@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-6862)

Associate Professor, Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.11.1477>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

산업 자동화 시스템 내 임베디드 무선 센서 액추에이터 네트워크는 설치비용 및 유지보수 비용을 크게 절감시킬 수 있는 이점을 가진다[1]. 이러한 이점으로 무선 네트워크는 생산 및 제조업계에서 많은 관심을 받고 있으며 크리티컬한 시스템의 모니터링 및 자동화 시스템의 기반 네트워크로서 적용되고 있다[1-3].

시간에 따라 변화하는 연속적인 성질을 갖는 플랜트의 안정성 및 성능을 보장하기 위해서는 센싱 정보와 제어 신호의 적시성이 항상 보장되어야 한다[3,4]. 하지만 무선 센서 액추에이터 네트워크는 링크의 불확실성과 예기치 못한 임베디드 장치의 결함이라는 문제에 노출되어 있다. 따라서 무선 임베디드 노드를 통해 다수의 플랜트를 제어하는 무선 네트워크 기반 제어 시스템의 안정성 및 성능을 보장하는 것은 여전히 도전과제로 남아있다.

본 논문에서는 계층적 클러스터 기반의 스케줄링 알고리즘과 제어 업무 공유 방법을 통하여 제어시스템의 안정성을 보장하는 고강건 무선 센서 액추에이터 네트워크(R-WSAN; Robust Wireless Sensor and Actuator Network)를 제시한다. R-WSAN은 각 플랜트와 관련된 무선 센싱 및 액추에이팅 링크의 상태에 따라 무선 자원을 효율적으로 할당한다. 또한, 제어 시스템의 불안정성이 예상될 경우 추가적인 링크를 할당하고 제어 업무 공유 알고리즘을 활성화할 수 있도록 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 무선 네트워크 기반 제어시스템 모델과 제어 안정성의 요구사항을 기술한다. 제 3장에서는 R-WSAN의 핵심 기술에 대해 설명한다. 제 4장에서는 실제 구현된 프로토콜의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델 및 요구사항

### 2.1. 무선 네트워크 기반 제어시스템 모델

무선 네트워크 기반 제어시스템은 크게 센서, 액추에이터, 제어기로 구성된다. 센서는 일정한 시간간격으로 플랜트의 상태를 계측하고 제어기에 플랜트 관련 정보를 전송한다. 그리고 제어기는 수신한 계측정보를 사용하여 제어신호를 계산하고 액추에이터에게 전송한다.

마지막으로 액추에이터는 수신된 제어신호에 맞게 동작하여 플랜트를 제어한다.

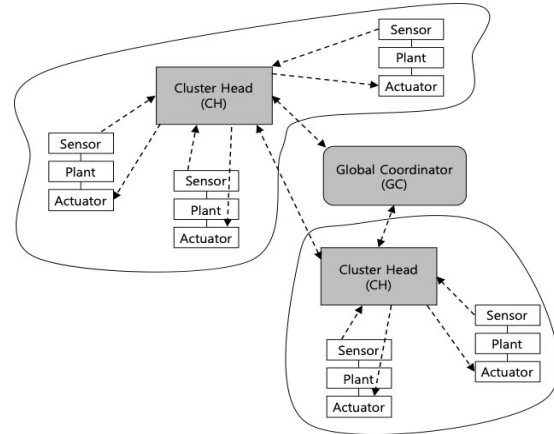


Fig. 1 General structure of wireless sensor and actuator network based control systems

본 논문에서는 일반적인 산업 자동화 시스템 내 넓은 서비스 범위와 다양한 요구사항을 만족시키기 위하여, 그림 1과 같이 클러스터 기반의 네트워크 시스템 모델을 고려하였다. 산업자동화와 같은 제어시스템의 서비스 범위를 여러 개의 클러스터로 나누고, 클러스터마다 제어기의 역할을 하는 클러스터 헤드(CH; Cluster Head)를 두어 다수의 플랜트를 관리한다. 또한 제어 시스템 내 모든 플랜트의 상태 및 클러스터 헤드의 상태를 모니터링하는 글로벌 코디네이터(GC; Global Coordinator)를 고려한 계층적 클러스터기반의 무선네트워크를 고려한다. 또한, 상대적으로 중요한 역할을 갖는 글로벌 코디네이터와 클러스터 헤드가 센서 및 액추에이터 보다 높은 컴퓨팅 성능을 갖는다고 가정한다.

### 2.2. 제어 안정성 요구사항

무선 네트워크 기반 제어시스템의 핵심 요소는 샘플링 주기, 패킷 손실, 패킷 지연시간으로 정의 된다 [1]. 일반적인 제어 시스템의 경우, 패킷 손실이 일어날 경우, 그 다음 샘플링 주기에서 새로운 패킷이 전송되기 때문에, 대부분의 연구에서는 패킷 손실을 샘플링 주기의 연장선으로 모델링한다[5,6]. 또한 패킷 손실 및 지연으로 인하여 센서는 고정된 샘플링 주기로 동작할지라도 제어기와 액추에이터는 시변(Time-varying) 샘플링 주기를 가지게 된다.

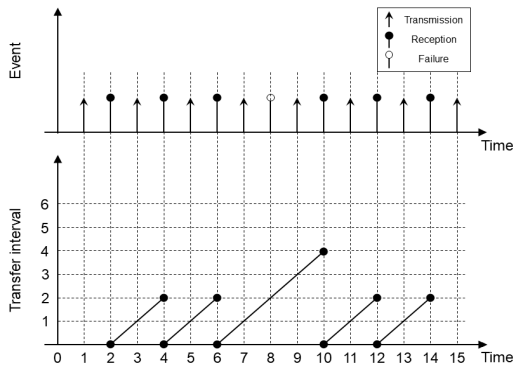


Fig. 2 Example of transfer interval with communication events

그림 2와 같이 성공적으로 수신된 패킷 사이의 시변 샘플링 주기를 전송 간격(TI; Transfer Interval)이라고 정의한다. TI는 샘플링 주기, 패킷 손실, 패킷 지연시간과 같은 무선 네트워크 기반 제어시스템의 주요요소간의 복잡한 상관관계를 효율적으로 표현하기 때문에, 제어 시스템 성능 분석에 있어서 중요한 요소이다[1,5,6]. 제어 시스템의 다양한 연구는 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 최대 허용 가능한 전송 간격(MATI; Maximum Allowable Transfer Interval)을 분석하는 연구가 진행되고 있다 [7,8].

### III. R-WSAN

R-WSAN은 제어 안정성의 요구사항을 보장하기 위하여 무선 네트워크 자원 스케줄링 및 클러스터 헤드 간 제어 업무 공유 모듈을 포함한다. R-WSAN은 슬롯 기반 접근방식과 채널 호핑 기법이 조합된 IEEE 802.15.4e 표준의 TSCH (Time Slotted Channel Hopping) MAC 계층을 기반으로 한다[1]. TSCH는 산업 자동화 시스템과 같은 크리티컬한 시스템의 모니터링 및 제어 업무의 실시간성을 고려하여 설계된 표준이나, 자원 스케줄링과 같은 알고리즘을 포함하지 않는다. TSCH 표준은 시간과 채널의 다양성을 활용하여 고신뢰성을 보장하는 프레임워크를 제시한다.

클러스터 헤드 간 제어 업무 공유 방법은 각 클러스터 내 링크 및 노드 결합을 상위 계층에서 효과적으로 해결할 수 있는 방안이다. 또한, 이 방법은 서로 다른 위치에

존재하는 클러스터 헤드를 사용함으로써 시간 및 채널의 다양성 이외에도 공간적 다양성을 활용하여 네트워크의 신뢰성을 향상시킨다.

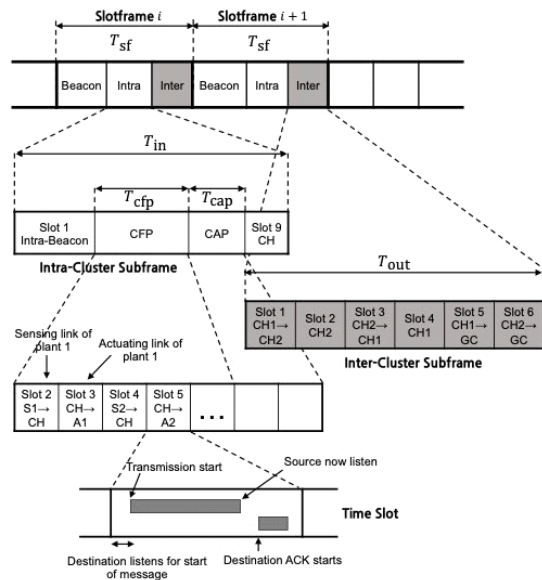


Fig. 3 Hierarchical slotframe structure of R-WSAN with cluster head and global coordinator

#### 3.1. R-WSAN 프레임 구조

그림 3은 R-WSAN의 계층적 슬롯프레임 구성요소를 보여준다. 이는 TSCH의 기본 통신 단위인 타임 슬롯과 이러한 타임 슬롯들을 묶어 논리적으로 구분한 서브 프레임, 그리고 이러한 서브 프레임이 모여 슬롯프레임이 구성됨을 보여준다.

R-WSAN 슬롯프레임은 비콘을 보내기위한 하나의 타임 슬롯과 클러스터 내의 통신 슬롯들을 묶은 인트라 클러스터(Intra-cluster) 서브프레임, 다른 클러스터와의 통신 슬롯들을 묶은 인터 클러스터(Inter-cluster) 서브프레임으로 나뉜다. 비콘 패킷은 글로벌 코디네이터와 클러스터 헤드간 시간을 동기화 하여 슬롯 기반 접근 방식을 가능하게 한다.

인트라 클러스터 서브프레임은 클러스터 내 비콘 정보를 제공하는 타임 슬롯이 있으며, 이어서 모든 플랜트에게 하나의 센싱 링크와 하나의 액추에이팅 링크를 할당하기 위한 CFP(Contention Free Period)로 구성된다. 추가적으로, 특정 플랜트가 불안정할 때에 모든 노드가

공유하여 사용할 수 있는 CAP(Contention Access Period)도 포함한다. CAP에서는 모든 노드가 경쟁 기반으로 통신하는 Slotted Aloha 메커니즘으로 동작한다.

인터 클러스터 서브프레임은 서로 다른 클러스터 헤드 간 제어 업무 공유를 위해 정보를 주고받는 슬롯과 클러스터 내 모든 플랜트의 정보를 모아 글로벌 코디네이터에게 전송하기 위한 슬롯으로 구성되어 있다.

R-WSAN 슬롯프레임 길이는 제어 안정성을 보장하기 위해 식 (1)와 같은 제약조건을 갖는다.

$$T_{sf} = T_{in} + T_{out} + 1 \leq \underline{h} \quad (1)$$

$T_{in}$ 은 인트라 클러스터 서브프레임 길이를  $T_{out}$ 은 인터 클러스터 서브프레임 길이를 뜻한다.  $\underline{h}$ 는 모든 플랜트의 MATI 중 최소 MATI를 의미하여 다음과 같이  $\underline{h} = \min_{1 \leq i \leq N_p} h_i$  정의된다.

### 3.2. 핵심기술

R-WSAN은 링크 및 노드의 상태에 따라 자원을 할당하는 스케줄링 방법과 특정 플랜트의 불안정성이 예상될 경우에 클러스터 헤드 간 제어 업무를 공유하는 핵심 기술을 갖는다.

먼저, 클러스터 헤드는 클러스터 내의 모든 플랜트들의 링크 상태와 MATI 대비 현재 TI 비율을 사용하여 식 (2)과 같이 플랜트  $i$ 의 스케줄링 중요도(Weight)  $P_i$ 를 계산한다.

$$P_i = \frac{Q_i}{R_{ij}}, \quad \forall i \in \varphi_j \quad (2)$$

여기에서  $\varphi_j$ 는 클러스터  $j$ 에 소속된 모든 플랜트 셋을 의미한다.

$$R_{ij} = R_{ij}^s R_{ji}^a \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{\tau_i}{h_i}, \quad \forall i \in \varphi_j \quad (4)$$

$R_{ij}$ 는 클러스터  $j$ 와 플랜트  $i$  사이의 링크 상태로, 식 (3)와 같이 센싱 링크의 성공적인 패킷 전송 확률 (PDR; Packet Delivery Rate)  $R_{ij}^s$  과 액추에이팅 링크의 PDR  $R_{ji}^a$ 의 곱으로 계산된다. 이는 센서로부터 전달받은 플랜트 계측정보에 의해 계산된 제어 신호가 액추에이터에게 문제없이 전송되어야만, 정상적인 제어가 가능하

기 때문이다.  $Q_i$ 는 플랜트  $i$ 의 현재 TI  $\tau_i$ 를 MATI  $h_i$ 로 나누어 플랜트  $i$ 가 얼마나 크리티컬한 상태인지를 나타내는 지표이고 식 (4)와 같이 계산된다.

알고리즘 1은 클러스터 헤드  $j$ 가 스케줄링 중요도  $P_i$ 를 계산하고, 무선 링크를 할당하는 스케줄링 알고리즘이다. 먼저 스케줄러  $S_1$ 은  $P_i$ 를 내림차순으로 정렬하여, 크리티컬한 플랜트부터 순차적으로 모든 플랜트에게 각각 하나의 센싱 링크와 액추에이팅 링크를 할당하는 스케줄러이다.

---

#### Algorithm 1: Scheduling algorithm of CH $j$

---

Input:  $\varphi_j, T_{in}, T_{cap}, N_{s,i}, N_{a,i}$  where  $i \in \varphi_j$

Output: Scheduling vector of plants, **S**

$$T_{cfp,j} \leftarrow \sum_{i \in \varphi_j} N_{s,i} + N_{a,i};$$

$$T_{in,j} \leftarrow 1 + T_{cfp,j} + T_{cap} + 1$$

Vector of size  $|\varphi_j| \times 1$ , **Q** where  $Q_i \leftarrow \frac{\tau_i}{h_i} \quad \forall i \in \varphi_j;$

Vector of size  $|\varphi_j| \times 1$ , **P** where  $P_i \leftarrow \frac{Q_i}{R_{ij}} \quad \forall i \in \varphi_j;$

$S_1 = \text{Sort}(\mathbf{P});$

if any( $\mathbf{Q} \geq Q_{thr}$ ) then

    while  $|\mathbf{S}_2| \leq T_{in} - T_{in,j}$  do

        for  $i \leftarrow 1$  to  $|\varphi_j|$  do

$\tilde{\mathbf{P}} \leftarrow \mathbf{P};$

$$\tilde{P}_i \leftarrow \frac{Q_i}{1 - (1 - R_{ij})^{v_i + 1}};$$

$E_i \leftarrow \max(\tilde{\mathbf{P}});$

$i^* \leftarrow \text{ArgMin}(\mathbf{E});$

$$P_{i^*} \leftarrow \frac{Q_{i^*}}{1 - (1 - R_{ij})^{v_{i^*} + 1}};$$

$v_{i^*} \leftarrow v_{i^*} + 1;$

            AddToSched( $i^*, \mathbf{S}_2$ );

            // redundant slot allocation

$\mathbf{S} \leftarrow [\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2];$

else

$\mathbf{S} \leftarrow \mathbf{S}_1$

---

#### Algorithm. 1 Scheduling Algorithm of Cluster Head $j$

알고리즘 1에서 스케줄러  $S_2$ 는 플랜트의 TI가 특정 임계점을 넘는 다음 조건  $Q_i \geq Q_{thr}, \forall i \in \varphi_j$ 이 만족되었을 때에 추가적으로 활성화되는 스케줄러이다.  $S_2$ 가 활성화되면 식 (5)과 같이 현재 할당받은 링크의 수  $v_i$ 에서 추가슬롯을 할당 받았을 때의 스케줄링 중요도인  $P_{i^*}$ 를 계산한다. 계산된  $P_{i^*}$ 의 최댓값을 최소화 할 수 있는 플랜트에게 추가 링크를 할당한다. 다시 말해,

추가 링크를 할당 받았을 경우에 제어 안정성을 보장할 수 있는 확률이 더 높은 플랜트에게 링크를 할당하는 것이다.

$$P_i^* = \frac{Q_i}{1 - (1 - R_{ij})^{v_i+1}}, \quad \forall i \in \varphi_j \quad (5)$$

추가적으로, R-WSAN의 제어 업무 공유 알고리즘은 플랜트의 상태를 나타내는  $Q_i$ 가 활성화 임계점  $\eta_i$ 를 초과할 경우 활성화된다. 제어 업무 공유는 센싱 링크에 대한 제어 업무 공유와 액추에이팅 링크에 대한 제어 업무 공유가 있다.

센서는 클러스터 헤드에게 전송하는 패킷에 대한 ACK패킷을 사용하여 TI를 측정한다. 센싱 링크에 대한 제어 업무 공유는 센서가 측정한 TI가 임계점을 넘었을 때에 활성화된다. 제어 업무 공유가 활성화 되면, 센서는 CAP에서 자신의 클러스터 헤드가 아닌 백업 클러스터 헤드에게 패킷을 전송하여 센싱 링크에 대한 강건성을 향상시킨다.

클러스터 헤드는 액추에이터에게 전송하는 패킷에 대한 ACK패킷을 사용하여 TI를 측정한다. 마찬가지로 클러스터 헤드가 측정한 TI가 임계점을 초과할 경우 활성화된다. 이 때 클러스터 헤드는 다른 클러스터 헤드에게 플랜트 정보를 공유하고, 이를 받은 클러스터 헤드가 대신하여 제어 신호를 전송하여 액추에이팅 링크에 대한 강건성을 확보한다.

#### IV. 성능 분석

본 논문에서는 제시된 프로토콜인 R-WSAN은 Zolertia RE-Mote 임베디드 하드웨어[9]와 Contiki-NG[10]를 기반으로 구현되었다. 또한, Contiki-NG에서 제공하는 CSMA, TSCH-Min, TSCH-RR 스케줄과 성능이 비교 분석되었다. TSCH-Min은 서브프레임의 길이는 7로 고정하고 하나의 타임 슬롯을 모든 노드가 공유하여 사용하는 기본적인 스케줄링 방식이다[11]. TSCH-RR 스케줄링은 라운드 로빈 방식으로 모든 노드에게 한 개씩 순차적으로 타임 슬롯을 할당한다. 성능 측정치로는 제어 안정성에 영향을 주는 TI의 95% 신뢰도 값을 가지는 95 퍼센타일 (Percentile)을 계산하고 이를 비교 분석한다.

실험은 2개의 클러스터가 각 8.0 m×6.6 m의 실험실

실내 공간에 설치되고, 각 클러스터 내 3개의 플랜트를 고려하였다. 각 플랜트는 1개의 센서와 1개의 액추에이터로 구성되어 총 12개의 센싱 및 액추에이팅 노드로 네트워크가 구성된다. MATI는 400 슬롯이고 스케줄러  $S_2$ 와 제어 업무 공유를 위한 슬롯이 활성화되는 임계점 (Threshold)은 0.5로 MATI의 절반에서 활성화된다. 송신 전력은 3dBm으로 설정하고, 슬롯의 길이는 10ms로 고정한다.

그림 4는 4가지 프로토콜 CSMA, TSCH-Min, TSCH-RR, R-WSAN의 95 퍼센타일 TI 값을 다양한 센싱 주기에 따라 표현한다. 세 가지 프로토콜 CSMA, TSCH-RR, R-WSAN은 센싱 주기에 비례하여 증가하는 모습을 보였다. TSCH-Min 스케줄은 하나의 타임 슬롯을 공유해서 사용하기 때문에, 가장 좋지 않은 성능을 보여주었다. 세 가지 프로토콜마다 조금의 차이가 있기는 하지만 R-WSAN이 링크 및 노드의 상태에 따라 자원을 할당하는 적응형 스케줄링 방법을 통하여, 가장 낮은 95 퍼센타일 TI 값을 보여 주었다. TSCH-RR의 경우 노드마다 각각의 전송 슬롯을 할당받아 센싱 간격이 짧아져도 성능이 크게 떨어지지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나, R-WSAN에 비해서 편차가 약 2-5배 큰 것을 볼 수 있으며, 이는 링크 및 노드의 결함으로 인한 상황을 R-WSAN이 효율적으로 극복한다는 것을 의미한다.

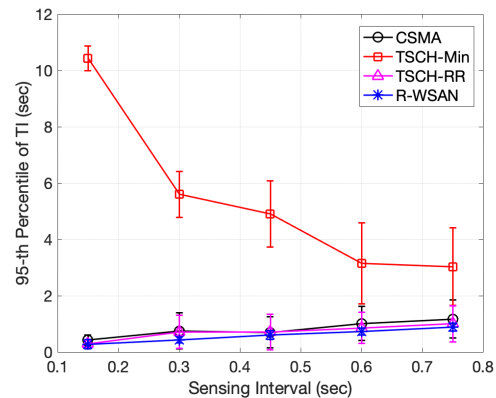


Fig. 4 95-th percentile of transfer interval

PDR을 분석 시 CSMA도 경쟁을 기반으로 한 프로토콜이기 때문에, TSCH-Min 스케줄링 방법과 마찬가지로 센싱 주기가 짧아져 패킷 전송량이 많아질 경우에 성능이 감소하는 모습을 보였다. 그러나 패킷 전송량에 비

해 전송 슬롯이 현저히 부족한 TSCH-Min 스케줄에 비해 좋은 성능을 보여준다.

그림 5는 TSCH 기반 세 가지 프로토콜 TSCH-Min, TSCH-RR, R-WSAN 네트워크 내 센서, 액추에이터, 클러스터 헤드의 듀티 사이클을 보여준다. CSMA의 경우 따로 슬립 모드가 없어 매우 에너지 비효율적이어서 본 그림은 이를 포함하지 않는다.

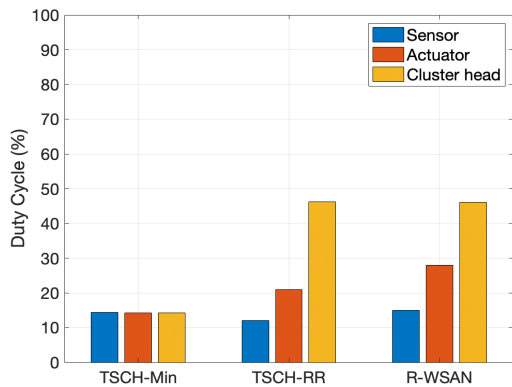


Fig. 5 Duty cycle of TSCH-Min, TSCH-RR, and R-WSAN

TSCH-Min의 경우 총 7개의 슬롯 중에서 1개의 슬롯만을 공유하여 경쟁하므로, 관련 슬롯에서만 Tx 상태를 유지하고, 나머지는 슬롯에서는 슬립모드로 설정되므로 모든 노드가 약 14%의 듀티 사이클을 보여주었다.

R-WSAN에서는 CFP를 통해 전달되는 패킷 이외에도, 스케줄러 및 제어 업무 공유를 위해 추가적인 타임 슬롯을 사용하므로 TSCH-RR에 비해서 약 0.5% 높은 듀티 사이클을 보인다. R-WSAN과 TSCH-RR의 액추에이터는 Rx 슬롯만을 가지기 때문에, 전송 패킷에 상관없이 할당된 타임 슬롯에서 항상 활성화 된다. 이에 비하여, 센서의 Tx 슬롯은 보낼 정보가 없으면, 정보를 보낼 필요가 없어 상대적으로 낮은 듀티 사이클을 보인다.

R-WSAN의 노드 결함에 대한 강건성을 확인하기 위하여, 노드 결함을 가정하여 클러스터 헤드의 전원을 차단한 후 실험하였다. 그림 6은 노드결함이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우로 나누어 R-WSAN의 95 퍼센타일 TI 값을 다양한 센싱 주기에 따라 표현한다. 정상 노드 동작 시 95 퍼센타일 TI 값은 센싱 주기에 비례하여 증가하는 그래프를 보인다. 그러나, 클러스터 헤드 결함 상황에서는 모두 2.4초 정도의 95 퍼센타일 TI 값을 나타내었다. 이는 MATI를 400 슬롯으로 설정한 실험에

대한 영향이다. 제어 업무 공유 알고리즘과 스케줄러  $S_2$ 가 활성화되는 수치를 0.5로 설정하여, 200 슬롯인 2초가 지난 후에 제어 업무가 다른 클러스터 헤드로 전환되기 때문이다.

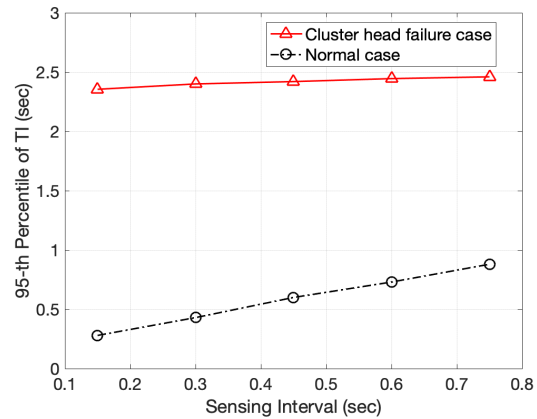


Fig. 6 95-th percentile of transfer interval

## V. 결론

본 논문에서는 다수의 크리티컬한 제어 시스템의 안정성을 보장하기 위한 네트워크 프로토콜인 R-WSAN을 제시하였다. 계층형 클러스터 기반의 R-WSAN은 적응형 자원 스케줄러와 제어 업무 공유 기법을 통하여 분산형 제어시스템의 고강건 성능을 보장한다. 적응형 스케줄러는 링크 및 노드상태에 따라, 크리티컬한 플랜트에게 우선적으로 무선 자원을 할당한다. 또한, 제어 불안정성이 예상될 경우 추가적인 무선 자원을 할당하여 강건성을 향상 시킨다. 제어 업무 공유 알고리즘은 클러스터 헤드 간 크리티컬한 플랜트의 제어 업무를 공유 가능하게 한다. 제시된 R-WSAN은 Contiki-NG 소프트웨어와 Zolertia RE-Mote 임베디드 하드웨어에서 구현되었으며, 프로토콜의 실효성을 분석하였다. R-WSAN은 실시간 보장성에 있어서 가장 적은 성능 편차를 보여 무선 링크의 상태에 대하여 고강건성을 가지고 있음을 확인하였다. 특히, R-WSAN은 주요 노드에 결함이 발생하여도 제어 시스템의 실시간 요구사항을 만족시켰다.

REFERENCES

[ 1 ] P. Park, S.C. Ergen, C. Fischione, C. Lu, and K.H. Johansson, "Wireless network design for control systems: A survey," in *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 978-1013, Secondquarter 2018.

[ 2 ] Z. Pang, M. Luvisotto, and D. Dzung, "Wireless High-Performance Communications: The Challenges and Opportunities of a New Target," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 20-25, Sep. 2017.

[ 3 ] P. Park, P. D. Marco and K. H. Johansson, "Cross-Layer Optimization for Industrial Control Applications using Wireless Sensor and Actuator Mesh Networks," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 3250-3259, April 2017.

[ 4 ] B. Park and P. Park, "Proactive Network Optimizer for Critical Applications," in *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 9, pp. 1250-1256, Aug. 2018.

[ 5 ] T. Watteyne, M. R. Palattella, and L. A. Grieco, "Using IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) in the Internet of Things (IoT): Problem Statement," in *IETF Standard RFC7554*, May. 2015.

[ 6 ] M. C. F. Donkers, W. P. M. H. Heemels, N. van de Wouw, and L. Hetel, "Stability Analysis of Networked Control Systems Using a Switched Linear Systems Approach," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, no. 9, pp. 2101-2115, Sep. 2011.

[ 7 ] S. H. J. Heijmans, R. Postoyan, D. Nei, and W. P. M. H. Heemels, "Computing minimal and maximal allowable transmission intervals for networked control systems using the hybrid systems approach," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 56 - 61, Jul. 2017.

[ 8 ] S. Heijmans, R. Postoyan, D. Nei, N. Noroozi, and M. Heemels, "Stability analysis of networked linear control systems with direct-feedthrough terms," in *Automatica*, vol. 96, pp. 186 - 200, 2018.

[ 9 ] M. Nistor, E. L. Daniel and J. Barros, "Hardware abstraction and protocol optimization for coded sensor networks," in *IEEE/ACM Transactions on Networks*, vol. 23, no. 3, pp. 866-879, June 2015.

[10] A. Dunkels, B. Gronvall, and T. Voigt, "Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors," in *IEEE International Conference on Local Computer Networks*, FL, USA, pp. 455-462, 2004.

[11] S. Duquennoy, B. Al Nahas, O. Landsiedel, and T. Watteyne, "Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled TSCH," in *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, New York, USA, pp. 337 - 350, 2015.



박판근(Pangun Park)

2005년 8월 아주대학교 전자공학부 학사  
 2007년 11월 Royal Institute of Technology 무선시스템공학과 석사  
 2011년 3월 Royal Institute of Technology 정보통신공학과 박사  
 2011년 3월~2011년 9월 Royal Institute of Technology 박사후 연구원  
 2011년 9월~2013년 8월 University of California, Berkeley 박사후 연구원  
 2013년 9월~2015년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원  
 2015년 3월~2016년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
 2016년 3월~현재 충남대학교 전자정보통신공학과 부교수  
 ※관심분야 : 무선 제어 네트워크, 사이버물리시스템, 네트워크 제어시스템