

# 중복 전송을 고려한 IEEE 802.15.4e 기반 무선 네트워크 제어 시스템 성능 평가

부 이 순 연\*, 이 원 희\*, 김 영 석\*, 유 명 식<sup>o</sup>

## Performance Evaluation of Wireless Networked Control System Based on IEEE 802.15.4e With Redundancy

Bui Xuan Yen\*, Wonhee Lee\*, Youngsuk Kim\*, Myungsik Yoo<sup>o</sup>

### 요 약

IEEE 802.15.4e은 산업용 네트워크 제어 시스템의 무선 네트워크 적용을 위해 개발된 통신 표준으로서, 기존 경쟁 기반의 MAC 프로토콜이 갖는 전송 지연의 문제를 해결하기 위해 비경쟁 기반의 MAC 프로토콜을 제시하고 있다. 이에 본 논문은 IEEE 802.15.4e 기반 무선 네트워크 제어 시스템에 적용 가능한 네트워크 모델과 제어 모델을 제시하고, 성능 평가를 목적으로 한다. 이를 위해 각 모델에 대한 수학적 분석을 토대로 모의실험 환경을 구성하였으며, 무선 네트워크 환경의 주요 환경 요소인 거리, 전송 전력을 변화시켜 패킷 손실에 대한 영향을 분석하였다. 특히 제안하는 모델의 명확성을 입증하기 위해 중복 전송을 고려한 네트워크 모델을 대표적인 비선형 실시간 모델인 역진자 시스템에 도입하여 성능 분석을 수행하였다. 그 결과 본 논문에서 제안하는 네트워크 및 제어기 모델이 사용 가능함을 확인하였고, 각 환경 변화에 따른 성능 추이를 살펴볼 수 있었다.

**Key Words** : Wireless Networked Control System(WNCS), Redundancy Transmission, IEEE 802.15.4e, Inverted Pendulum, Low Latency Data Network(LLDN)

### ABSTRACT

IEEE 802.15.4e is a prospective standard for low latency control application in industries. This paper proposes a framework to evaluate the closed loop IEEE 802.15.4e based WNCS performance. The framework consists of two models: closed loop control system model and network model. The network model focuses on the PHY parameters of wireless link and takes the channel parameters into consideration. The PHY model combining with MAC model gives the control system model the probability of packet loss in a super-frame. In addition, redundancy mechanism is considered in IEEE 802.15.4e to reduce to data frame loss probability. The simulation is implemented in Matlab, PHY model takes the channel parameters from empirical results. Hence our evaluation gives insight into behavior of WNCS in different environments and it provides us a tool to design wireless network to achieve a good performance for control system.

\* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2012R1A1A2042995)

♦ 주저자 : 송실대학교 정보통신 전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, buixuanyen@gmail.com, 학생회원

° 교신저자 : 송실대학교 정보통신 전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, myoo@ssu.ac.kr, 종신회원

\* 송실대학교 정보통신 전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, zsed50@ssu.ac.kr, 학생회원, kyjs77@ssu.ac.kr

논문번호 : KICS2013-06-258, 접수일자 : 2013년 6월 17일, 최종논문접수일자 : 2013년 6월 26일

## I. 서 론

최근 공장 자동화 환경에서 사용되는 통신 시스템들이 기존의 유선 네트워크에서 무선 네트워크로 점차 바뀌어가고 있다. 특히 무선 통신 기술의 적용은 생산성 향상, 설치비용의 절감은 물론 유선 통신 설치가 위험한 생산 환경의 문제점을 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이를 위해 근거리 무선 통신 표준인 IEEE 802.15.4<sup>[1]</sup>은 스마트 그리드(SmartGrid), 생산 자동화 공장 환경뿐만 아니라 홈오토메이션, u-Health 등의 생활 환경에서 적극 활용되고 있다<sup>[2]</sup>. 특히 IEEE 802.15.4는 낮은 데이터 속도를 제공하지만 저 전력 프로토콜을 통해 장기간의 안정적인 무선 통신 환경을 구축할 수 있어 그 활용 범위가 점차 증가하고 있다. 이러한 산업용 통신 시스템의 무선화 요구에 따라 IEEE 802.15.4, ISA100.11a, Wireless HART, IEEE 802.15.4e 등과 같은 다양한 무선 통신 프로토콜이 등장하였다.

기존 IEEE 802.15.4는 WPAN(Wireless Personal Area Network)로서 비콘(Beacon) 모드에서는 전용 전송을 위한 7개의 GTS(Guarantee Time Slot)를 지원할 수 있다. 그러나 산업용 통신망에서는 수십 ~ 수백의 수신 단말 장치가 존재하기 때문에 기존 통신 기술의 용량을 적합하지 않다. Wireless HART와 ISA100의 경우에도 메쉬 토폴로지를 기반으로 다수의 장치 간 통신 경로를 제공하나 10~14ms에 이르는 긴 타임 슬롯을 사용하기 때문에 산업용 모니터링 시스템에만 적합한 것으로 분석된다.

이러한 기존 무선 통신 기술 표준이 산업용 제어 시스템에서 갖는 문제점을 해결하기 위해 IEEE 802.15.4의 통신 방식을 개선한 폐 루프(Close-loop) 제어 기반의 IEEE 802.15.4e 통신 프로토콜이 개발되었다. IEEE 802.15.4e에서는 산업용 무선 제어 시스템의 가장 큰 요구 조건인 낮은 지연을 만족시키기 위해 LLDN(Low Latency Data Network) 방식을 채용하였다. LLDN은 짧은 타임 슬롯을 고정된 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식으로 관리하는 MAC 프로토콜로서 한주기의 슈퍼 프레임을 통해 다수의 GTS를 지원할 수 있는 특징을 가지고 있다.

이와 같은 새로운 규격의 무선 통신 기술을 토대로 본 논문에서는 LLDN 기반의 IEEE 802.15.4e 통신 규격의 성능 평가를 위해 네트워크 및 제어

모델에 대한 프레임워크를 설계하였다. 일반적으로 통신 규격에 대한 성능 평가는 모의실험 기반과 분석 기반의 프레임워크 환경을 구분된다. 먼저, True Time, SIMULINK, OPNET, NS2와 같은 모의실험 기반의 프레임 워크가 있지만, 해당 프레임워크들은 복잡한 제어 시스템 설계와 새로운 프로토콜의 등장에 따른 복잡한 코드 개발이 요구되고, 두 개의 다른 소프트웨어 플랫폼 기반의 프레임워크가 사용될 경우 호환성의 문제가 발생한다.

이에 본 논문에서는 분석 기반의 프레임워크 환경을 통해 IEEE 802.15.4e 통신 규격의 성능 평가를 목적으로 한다. 분석 기반의 프레임워크 분석 모델은 IEEE 802.15.4 표준 환경에서 다양하게 이루어진 바 있다. [3]에서는 마코프 체인 모델을 통해 슬롯화된 CSMA/CA 백오프 체계에 대한 링크 신뢰성, 지연 및 에너지 소비량을 분석한바 있으며, [4-5]에서는 무선 근거리 통신 기술의 불안정성이 저 전력 무선 링크에서 효율성과 관계가 있음을 분석하였다.

이와 같은 분석 기반의 프레임워크 설계를 위해서는 본 논문에서는 네트워크 모델과 제어 모델에 대한 프레임워크를 제안하고 이를 토대로 IEEE 802.15.4e<sup>[6]</sup> 통신 규격에 대한 성능 평가를 수행한다. 본 논문에서 제안하는 네트워크 모델에서는 슈퍼 프레임의 동작 과정에서 발생하는 패킷 손실을 분석하고, 채널 효과에 의해 패킷 손실 확률을 계산하기 위해 쉐도잉 경로 손실 모델(Log-normal Shadowing Path Loss)과 비트 오류 확률(Radio Bit Error Rate) 모델을 이용한다. 제어 모델의 경우 상태 피드백 제어기를 사용하여 폐 루프 제어 시스템을 사용한다. 이때 피드백 링크는 Bernoulli Sequence를 이용한다.

이러한 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 IEEE 802.15.4와 IEEE 802.15.4e의 주요 차이점을 분석하고, 3장에서는 본 논문에서 고려한 시스템 프레임워크 모델을 설명한다. 이어 4장에서는 다양한 변수 변화에 따른 IEEE 802.15.4e 통신 규격의 성능 평가를 분석하고, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

## II. IEEE 802.15.4와 4e 규격 비교

IEEE 802.15.4에서 적용된 슈퍼 프레임(Super-frame)은 그림 1과 같이 활성(Active) 및 비 활성(Inactive) 구간으로 구분된다. 활성 구간의 경

우 경쟁 구간(Contention Access Period; CAP)과 비경쟁 구간(Contention Free Period; CFP)으로 구분되며, 경쟁 구간의 경우 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)를 사용하며, 비경쟁 구간의 경우 TDMA(Time division multiple access)를 사용한다. 비콘 모드(Beacon Mode)에서 비콘 프레임은 첫 번째 타임 슬롯(Time Slot)에 주기적으로 전송되며, 슈퍼 프레임은 16개의 타임 슬롯으로 구성된다.

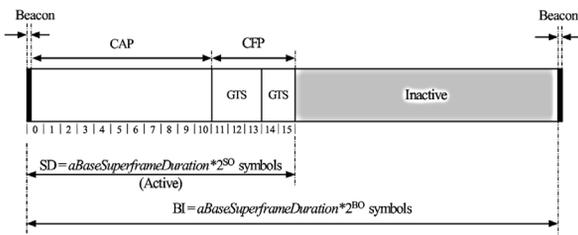


그림 1. IEEE 802.15.4의 슈퍼 프레임 구조  
Fig. 1. Super-frame of IEEE 802.15.4

기존 IEEE 802.15.4 슈퍼 프레임의 구조는 상황에 따라 GTS 구간을 최대 7개까지 증가시킬 수 있지만, 16개의 타임 슬롯은 고정되어있다. 따라서 7개 이상의 실시간 전송을 요구하는 단말기가 존재할 경우 이를 수용하지 못해 전송 지연의 증가가 불가피하다. 이러한 전송 지연의 증가는 산업용 제어 시스템의 성능 악화에 악영향을 초래해 시스템의 오작동 및 생산 제품의 불량률이 발생할 수 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 IEEE 802.15.4e에서는 타임 슬롯을 모두 TDMA 기반의 비경쟁 방식으로 사용하는 MAC 프로토콜을 도입하였다. 이 중 IEEE802.15.4e-LLDN(Low Latency Data Network)의 슈퍼 프레임은 그림 2와 같은 구조를 갖는다.

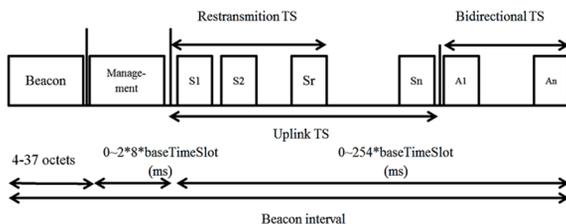


그림 2. LL MAC 슈퍼 프레임 구조  
Fig. 2. Structure of LL MAC Super-frame

IEEE 802.15.4e-LLDN의 슈퍼 프레임 구조는 기존의 IEEE 802.15.4의 슈퍼 프레임 구조와는 달리 타임 슬롯 수 및 길이를 고정하지 않고 네트워크상

에 연결된 장치의 수에 따라 적응적으로 프레임의 길이와 구조를 변화시킬 수 있다. 이와 같은 슈퍼 프레임은 비콘 슬롯, 하향링크(Downlink) 및 상향링크(Uplink)를 관리하는 관리슬롯(Management Slot), 동일 크기의 데이터 타임 슬롯으로 구성된다. 데이터 타임 슬롯의 경우 0개에서 최대 254개의 데이터 채널 슬롯으로 구성할 수 있으며, 슈퍼 프레임의 지속시간( $t_{SF}$ )은 다음 수식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{SF} = N \times t_{TS} \quad (1)$$

이때 N은 타임 슬롯의 수,  $t_{TS}$ 는 타임 슬롯의 지속 시간이다.

이와 같은 IEEE 802.15.4e의 LLDN 방식은 무선 네트워크 환경에서의 패킷 손실 확률을 낮추기 위해서 동일 패킷을 연속적으로 보내며, 이를 중복 전송(Redundancy)이라고 정의한다<sup>[7]</sup>.

### III. 무선 네트워크 제어 시스템 모델

IEEE 802.15.4e 기반의 WNCS(Wireless Network Control System)의 성능평가를 위해 IEEE 802.15.4e 환경이 요구되는 네트워크와 제어 모델을 제안하였다. 그림 3은 본 논문에서 고려하는 시스템의 평가 절차를 나타낸다.



그림 3. 시스템 모델의 평가 절차  
Fig. 3. Evaluation Procedure

#### 3.1. 물리 계층 입력 및 상태 천이

물리계층을 결정하는 매개 변수(Parameter)는 네트워크 모델의 입력 값이라 할 수 있으며 이를 통해 서로 다른 환경과 거리에 따른 WNCS의 성능평가 방안을 마련할 수 있다. 물리 계층의 매개 변수의 경우 무선 환경 매개 변수인 변조기법, 부호화, 전송률, 전송 전력 등이 있으며, 채널 매개 변수로 경로 손실 지수(Path loss), 섴도잉 편차(Shadowing Deviation), 잡음(Noise)이 있다. 이를 통해 주어진 거리  $d$ 에 따라 패킷 수신율(Packet Receive Rate; PRR)을 평가할 수 있다. 결론적으로 주어진 거리  $d$ 에 따른 패킷 손실률은  $1-PRR$ 로 계산되며, 이를 기반으로 페루프 제어 모델에 대한 패킷 손실 확률을 계산할 수 있다.

IEEE 802.15.4e-LLDN은 하나의 코디네이터 (Coordinator) 또는 게이트웨이(Gateway)가  $N$ 개 디바이스(Device) 전체를 관장하는 구조인 스타 토폴로지(Star Topology)로서 운용된다. 따라서 디바이스가 데이터를 송/수신하기 전에 비콘 프레임을 통하여 코디네이터와 동기화가 되어야 한다. 만약 한 개의 디바이스라도 비콘 프레임을 받지 못한다면 데이터를 전송 할 수가 없기 때문이다. 디바이스는 비콘 프레임을 수신 하였을 때 디바이스의 상태가 Listen\_medium에서 Wait\_slot로 변한다. 디바이스가 Listen\_medium 상태 일 때는 데이터 전송을 하지 않고, 자신의 데이터 슬롯을 알기 위해서 비콘 신호만을 기다린다. 디바이스가 Wait\_slot 상태 일 때는 CSMA/CA 방식이 아닌 비경쟁 방식으로, 즉시 다른 디바이스에게 데이터 전송을 데이터를 전송한다. 그림 4는 디바이스의 상태에 따른 동작을 나타낸 그림이다.

코디네이터는 연결된 모든 디바이스에게 슈퍼 프레임 내의 타임 슬롯 스케줄링에 관한 정보를 알리기 위하여 슈퍼 프레임의 사이클 마다 첫 번째 타임 슬롯에 비콘 프레임을 전송해야 한다. 그리고 연결된 디바이스로부터 데이터를 수신 받으며, 코디네이터의 상태가 Wait\_slot일 때, 다른 디바이스로부터 데이터를 수신 받을 수 있다. 그림 5는 코디네이터의 상태에 따른 동작을 나타낸 그림이다.

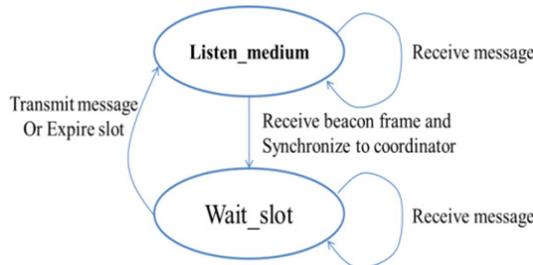


그림 4. 디바이스의 상태 천이도  
Fig. 4. Transmit state of Device

### 3.2. 네트워크 모델

IEEE 802.15.4e에서 모든 할당된 타임 슬롯은 비경쟁 방식의 GTS(Guarantee Time Slot)이며, 패킷 충돌이 발생하지 않는다. 이는 할당된 GTS 구간을 통해 패킷을 전송하는 동안 완전한 프레임 전송이 가능한 것으로 가정할 수 있으며, 이에 WNCS에서 분산된 디바이스에 대한 지연 및 손실에 대한 성능 평가를 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 고려한 네트워크 모델에서 GTS를 통한 무선 환경 및

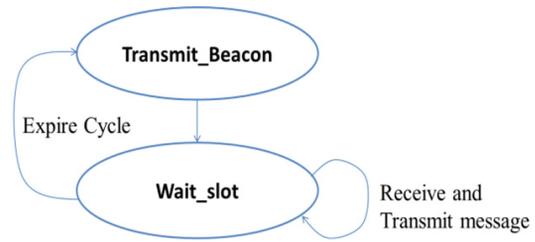


그림 5. 코디네이터의 상태 천이도  
Fig. 5. Transmit state of Coordinator

채널 상황에 따른 성능 평가 및 분석을 수행 하였다.

이를 위해 채널 모델은 롱-노멀 섀도잉 손실(Log-Normal Shadowing Path Loss) 모델을 사용하였으며, 일반적으로 사용되는 경로 손실지수  $n$ , 섀도잉 편차  $\sigma$ 을 사용하였다. 수식 2는 거리  $d$ 에 따른 경로 손실 전력( $PL(d)_{dB}$ )을 구하는 공식이다.

$$PL(d)_{dB} = PL(d_0)_{dB} + 10\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma [dB] \quad (2)$$

이때,  $X_\sigma$ 는 롱-노멀 섀도잉 손실 페이딩 요소이다. 수식 3은 전송 전력  $P_t$ , 거리가  $d$  일 때 SNR 값  $\gamma$ 를 나타낸 공식이다.

$$\gamma(d)_{dB} = P_t - PL(d) - P_n(dB) \quad (3)$$

이때,  $PL(d)$ 는 전송거리  $d$ 에서의 전력 감소,  $P_n$ 는 잡음(Noise)전력이다. 수식 (2~3)의 공식을 이용하여 특정 거리에서 인코딩 및 변조, 프레임 크기를 위한 PRR을 정의할 수 있다. 특히, FSK 변조와 NRZ 인코딩, 프레임 크기를 이용하여 다음 수식 4를 도출할 수 있다.

$$PRR(d) = \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma(d)}{2} \frac{1}{0.64}\right)\right)^{8f} \quad (4)$$

SNR 및 패킷 수신율  $PRR(d)$  사이의 관계는 다른 형태의 변조 방식 및 인코딩 방식으로 공식화시킬 수 있다. 이와 같은  $PRR(d)$ 는 하나의 슈퍼 프레임 주기에서 패킷 손실 확률을 결정하는데 사용된다.

이와 같이 한 사이클 동안 패킷 수신 실패 및 손실이 발생하는 원인은 두 가지이며, 첫 번째는 디바이스가 비콘 프레임을 수신하지 못한 경우이고, 두

번째는 정해진 타임아웃 동안 슈퍼 프레임이 전송되지 못한 경우이다. 따라서 총 패킷 손실 확률 ( $P_{loss}$ )은 수식 5와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{loss} = P_{loss-beacon} + (1 - P_{loss-beacon})P_{link} \quad (5)$$

이때,  $P_{loss-beacon}$  는 디바이스가 비콘 신호를 받지 못할 확률,  $P_{link}$  는 채널 요소에 의한 데이터 타임 슬롯의 패킷 드롭 확률이다.

이와 같은 패킷 손실 확률은 IEEE 802.15.4e의 LLDN 방식이 지원하는 중복전송 타임 슬롯을 사용하여 전송 성공 확률을 향상시킬 수 있다. 중복전송 메커니즘(Redundancy Mechanism)은 데이터 전송 확률에 영향을 미치고, 이에 수식 6과 수식 7을 통해서 중복전송 메커니즘이 슈퍼프레임의 한 사이클 동안에 전체 패킷 손실  $P_{loss}$  에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

$$P_{data-frame-loss} = P_{re} P_{link} = P_{link}^v \quad (6)$$

이때,  $P_{data-frame-loss}$  는 중복전송 메커니즘이 적용되었을 때의 데이터 슬롯의 손실 확률,  $P_{link}$  는 2개 디바이스 사이의 거리와 수신단의 SNR에 의해 결정되며,  $P_{re}$  는 중복전송된 타임 슬롯의 개수이다. 또한  $P_{link}^v$  는 중복타임 슬롯 수  $v$ 에 대한 데이터 프레임의 손실 확률이다.

$$P_{loss} = \begin{cases} P_{loss-beacon} + (1 - P_{loss-beacon})P_{link} & , \text{if redundancy} = 0 \\ P_{loss-beacon} + (1 - P_{loss-beacon})P_{link} P_{re} & , \text{if redundancy} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

이때, 수식 7에서  $P_{re}$  는 같은 패킷의 전송 기회를 더 제공하여 한 사이클 동안 슈퍼 프레임의 데이터 패킷 손실을 줄인다. 그러나  $P_{re}$  는 비콘 손실 확률  $P_{loss-beacon}$  을 줄이지는 못한다. 따라서  $P_{loss-beacon}$  를 최대한 줄이는 것이 중요하며, 이를 위해 코디네이터와 디바이스 사이의 거리를 충분히 짧게 하거나 코디네이터의 송신 전력이 비콘 프레임을 수신하는 디바이스에서 SNR을 유지하는 것이 중요하다.

### 3.3. 제어 모델

그림 6은 페루프 기반의 무선 네트워크 제어 시

스템의 구조를 도시화하고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 페루프 기반 무선 네트워크 제어 시스템 구조의 구성은 제어기(Controller), 구동기(Actuator), 목표 시스템(Plant), 센서(Sensor),

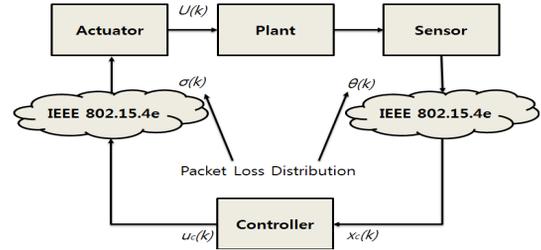


그림 6. 페루프 기반 무선 네트워크 제어 시스템 구조  
Fig. 6. Wireless Networked Control System

무선 네트워크(IEEE 802.15.4e)로 연결된 구조를 가진다. 이때 본 논문에서 제안하는 제어 모델의 각 패킷은 샘플링 시간 안에 정확히 전송된다고 가정한다. 이에 따라 시간  $k$ 일 때 센서를 통해 제어기로 송신되는 궤환 값은 성공적으로 전송 되었을 경우인  $P[\theta(k)=1]=\alpha$ ,  $P[\sigma(k)=1]=\beta$ ,  $\alpha=\beta$  로 가정하고 이를 만족시키는 2진 베르누이 랜덤 프로세스(Bernoulli Random Process)값  $\theta(k)$ ,  $\sigma(k)$ 을 통하여 제어 모델 환경을 구축하였다. 수식 8은 제어기로 궤환 되는 값을 결정하고 무선 환경을 구축하기 위한 식이다.

$$x_c(k) = \theta(k)x(k) + (1-\theta(k))\theta(k-1)x(k-1) + \dots + (1-\theta(k))\dots(1-\theta(k-p+1))\theta(k-p)x(k-p) + \dots \quad (8)$$

수식 9는 제어기에서 구동기 동작을 위한 제어 데이터 값을 계산하기 위한 식이다. 이때  $K$ 는 피드백에 대한 이득을 의미한다.

$$u_c(k) = -Kx_c(k) \quad (9)$$

수식 8과 수식 9를 이용하여 시스템 동작을 위한 제어 값을 계산하기 위한 식은 수식 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = \sigma(k)u_c(k) + (1-\sigma(k))\sigma(k-1)u_c(k-1) + \dots + (1-\sigma(k))\dots(1-\sigma(k-q+1))\sigma(k-q)u_c(q) + \dots \quad (10)$$

결론적으로 무선 네트워크 환경 시스템에서의 궤환 루프 제어 시스템은 무선 환경의 불안정성으로

인한 패킷 손실 및 지연에 의한 오차율이 매우 크다. 그러므로 실시간성 있는 운용을 위해서는 보상 기법이 필요하기 때문에 제어기는 허용 오차 이내의 보상 범위를 결정해야 하는 것이 중요하다. 따라서 오차 범위에 대한 예측(Prediction) 기법이 필요하며, 이를 위해 본 논문에서는 사이클 타임 동안의 센서를 통해 제어기로 케환 되는 상태 값을 결정하는 일반식인 수식 11을 이용하여 계산한다.

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (11)$$

수식 12은 다음 상태 예측을 위한 수식 11에 제어기로 케환 되는 값을 계산하기 위한 수식 7과 구동기가 목표 시스템 동작을 위한 제어 값을 계산 하는 수식 10의 대입을 통해 도출한 계산식이다.

$$x(k+1) = A_d x(k) - B_d K \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q a(i,j) b(i) x(k-i-j) \quad (12)$$

$$\begin{cases} a(0,j) = \theta(k-j); b(0) = \sigma(k); 0 \leq j \leq q; \\ b(j) = \prod_{s=0}^{j-1} (1 - \sigma(k-s)) \sigma(k-j); 0 < j < q; \\ a(i,j) = \prod_{s=j}^{i+j-1} (1 - \theta(k-s)) \theta(k-i-j); \\ 0 < i < p; 0 \leq j \leq q; \\ a(p,j) = \prod_{s=j}^{p+j-1} (1 - \theta(k-s)); \\ b(q) = \prod_{s=0}^{q-1} (1 - \sigma(k-s)); 0 \leq j \leq q; \end{cases}$$

#### IV. 환경 및 성능 평가

##### 4.1. 모의실험 환경

본 논문에서 고려한 모의실험 환경은 IEEE 802.15.4e 기반의 다수 디바이스 운용을 위해 그림 7에서와 같이 한 개 코디네이터가 3개 디바이스를 제어하는 구조를 가정하였다. 또한 슈퍼 프레임의 주기는 15ms, 타임 슬롯 길이는 1ms, 15개 타임 슬롯을 갖고 있다. 슈퍼 프레임의 필드 구성은 1개의 비콘, 데이터 전송을 위한 6개 타임 슬롯, 8개의 중복전송 타임 슬롯으로 구성된다.

표 2는 모의실험에서의 실내/외의 환경 변수 값이고, 표 3은 MAC과 PHY를 구성하는 매개변수 값을 정의한 것이다.

표 2. 실내/외 환경 변수 값  
Table 2. Indoor/Outdoor Environment Parameters

Environment	$n$	$\sigma$
Indoor	3.0 (2.67 ~ 3.23)	3.8 (2.60 ~ 5.00)
Outdoor	4.7 (4.30 ~ 5.10)	4.6 (2.80 ~ 6.40)

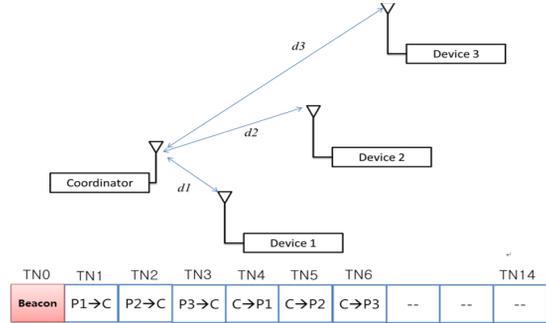


그림 7. 다수 루프 제어 시스템  
Fig. 7. Multiple Loop Control System

표 3. MAC, PHY의 매개변수 값  
Table 3. Parameter of MAC and PHY

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of device node (K)	3	Noise figure (dB)	23
Number of assigned timeslot (L)	6	Path loss exponent (n)	3
Number of unassigned timeslot (M)	8	Noise (dB)	15
Slot duration (ms)	1	Bandwidth (kHz)	30
Data rate (kps)	19.2	Tx power (dBm)	5
Wavelength (cm)	12.5	Preamble length (byte)	6
Standard shadowing deviation ( $\sigma$ )	3.8	Data frame length (byte)	22

본 논문에서는 앞서 설명한 모의실험의 구체적 모델로서 비선형 역진자(Inverted Pendulum) 시스템을 고려하였다<sup>8)</sup>. 역진자 시스템은 진자에 연결되어 있는 카트(Cart)가 움직일 경우 진자의 허용 오차 범위 내의 각도를 유지하기 위한 시스템 설계가 요구된다. 이때 진자의 각도를  $\theta$ , 카트의 위치  $z$ 로 가정한다.

##### 4.2. 성능평가

본 논문에서 고려한 모의실험 환경의 성능 평가를 위해 다음과 같이 제안 모델 성능에 영향을 미치는 요소로 실내/외 환경 변화에 따른 전송 전력, 전송 거리, 데이터 패킷 크기 등을 고려하였다. 또한 제안 모델을 역진자 시스템에 적용하여 무선 네트워크 제어 환경에서의 성능 평가를 수행하였다. 이때 성능 평가의 기준은 비콘 프레임 손실률과 데이터 슬롯 손실률 분석 후 전체 패킷 손실률을 확인하였다.

먼저, 그림 8은 거리에 따른 실내/외 환경의 패킷

손실률의 모습이다. 이때 전송 전력은 8dBm, 데이터 슬롯의 크기는 22bytes로 고정하였으며, 거리는 60m까지 연속적으로 변화 시켜서 측정하였다. 이에 대한 결과로 그림 9를 보면 실내 환경이 실외 환경보다 전송 거리 측면에서 패킷 손실에 대한 영향이 크지 않음을 확인할 수 있고, 패킷 손실률이 실외는 13m에서 17m 실내는 33m에서 43m까지의 거리에서 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이를 트랜지션(Transition) 영역이라고 정의하며, 이 구간에서는 네트워크가 불안정함을 확인할 수 있었으며, 패킷 손실률이 급격하게 변하여 시스템 동작을 예측할 수 없다.

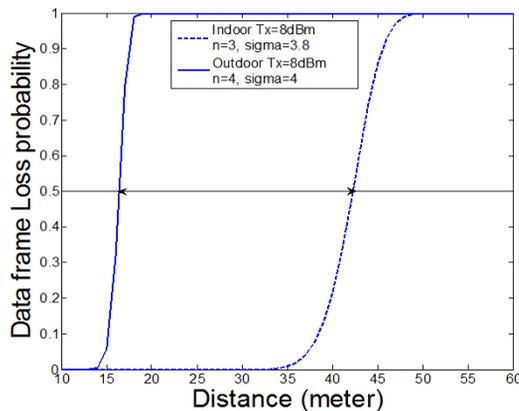


그림 8. 거리에 따른 실내/외 패킷 손실률  
Fig. 8. Packet Loss Probability Along the Distance

표 4. 실내 환경의 패킷 손실률  
Table 4. Packet loss probability in Indoor Environments

Probability	Tx Power	$d_1=25$	$d_2=32$	$d_3=38$
$P_{loss-beacon}$	5dBm	2.88e-4	0.33	0.99
	8dBm	4.03e-10	5.61e-4	0.10
$P_{link}$	5dBm	2.01e-4	0.24	0.98
	8dBm	2.80e-10	3.91e-4	0.07
$P_{loss}$	5dBm	4.88e-4	0.49	0.99
	8dBm	6.83e-10	9.5e-4	0.17

표 4는 전송 전력, 전송 거리에 따른 실내 환경의 패킷 손실률을 정리한 것이다. 이때 비콘 프레임의 크기는 32bytes, 데이터 슬롯의 크기는 22byte로 고정하였다. 이와 함께 서로 다른 전송 전력 5dBm, 8dBm과 거리 25m, 32m, 38m의 변화에 대한 비콘 프레임의 손실 확률과 데이터 프레임의 손실 확률을 산출하였다. 표에서 볼 수 있듯이 같은 전송 거리에서 송신 전력이 약할 경우, 같은 전송 전력일 때 전송 거리가 길어질 경우에 패킷 손실 확률이 높아짐을 확인할 수 있다.

이를 통해 전송 전력 및 전송 거리는 전체 패킷 손실의 영향을 주는 주요한 요소임을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 중복 전송을 고려하지 않은 네트워크 모델을 역진자 시스템에 대입하여 역진자 시스템의 운용 각도를 측정하여 결과 그림 9와 같은 응답 결과를 산출할 수 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 전송 전력 8dBm과 전송 거리 25m일 경우 안정(Stable) 상태라고 할 수 있으며, 전송 전력이 같은 경우 전송 거리가 더 짧을 때 역진자 시스템의 응답인 각도가 안정 상태에 근접한 결과를 확인할 수 있다. 또한 전송 거리가 같은 경우 전송 전력이 더 강할수록 역진자 시스템의 응답인 각도가 안정 상태에 근접한 결과를 확인할 수 있다. 하지만 전송 거리가 길고 전송 전력이 작을 경우 역진자 시스템의 허용 범위를 넘어난 각도로 차량이 제어되기 때문에 시스템의 문제가 발생하는 것을 확인하였다.

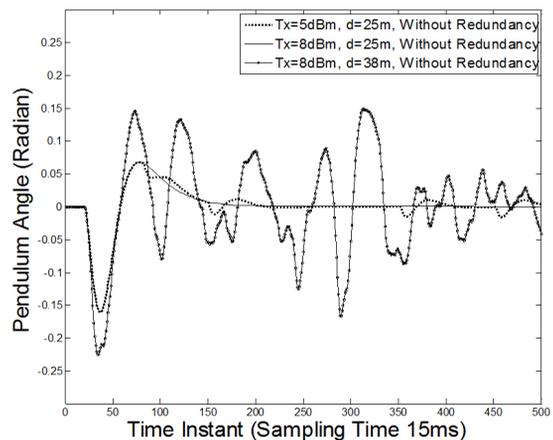


그림 9. 중복 전송이 적용되지 않은 역진자 시스템 응답  
Fig. 9. System response of Inverted Pendulum

그림 10과 11은 앞서 측정된 결과에 중복 전송 메커니즘을 적용하고 중복전송의 값을 1과 4로 적용하였을 때 역진자 시스템의 응답 결과이다.

그림에서 볼 수 있듯이 전송 전력, 전송 거리가 서로 다른 환경에서 중복 전송 메커니즘을 적용할 경우의 역진자 시스템의 응답 각도가 중복전송을 적용하지 않은 응답 각도 보다 안정 상태에 근접하는 것을 확인할 수 있다. 또한 중복 전송 슬롯 4개 사용 시 1개 중복 전송 슬롯을 사용하였을 때보다 역진자 시스템 응답 각도가 안정 상태에 근접한다. 이에 중복 슬롯을 이용한 패킷 전송 시 신뢰성 있는 시스템 운용이 가능함을 확인하였다.

결론적으로 짧은 시간동안 연속적으로 각도가 변하는 역진자 시스템에서 진자의 오차를 줄이기 위

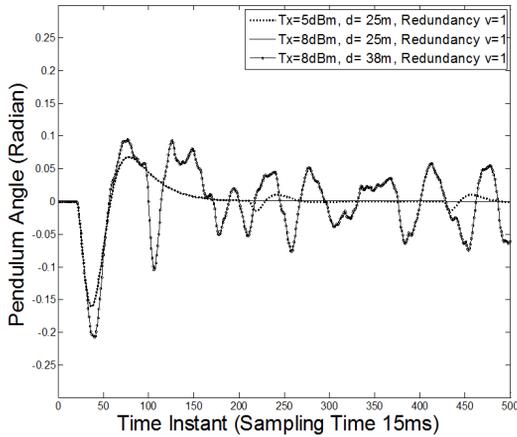


그림 10. 중복 전송 슬롯 1개 사용시 역진자 시스템 응답  
Fig. 10. System response of Inverted Pendulum with 1 Redundancy

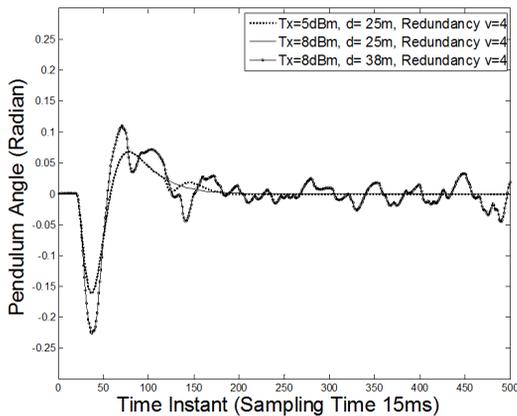


그림 11. 중복 전송 슬롯 4개 사용시 역진자 시스템 응답  
Fig 11. System response of Inverted Pendulum with 4 Redundancy

한 패킷 손실의 예측 기법을 적용하고, 최적의 성능을 수행하기 위하여 네트워크 상황에 따른 적응적 (Adaptation) 중복전송 메커니즘의 적용이 요구될 것으로 보인다.

## V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4e 기반 무선 네트워크 제어 시스템에 적용 가능한 네트워크 모델과 제어 모델을 제시하였다. 이에 따라 일반적인 무선 네트워크 기반의 제어 시스템에서의 성능 지표로 평가되는 패킷 손실 확률이 전송 전력, 전송 거리에 따라서 크게 영향을 미치는 요소인 것을 확인하였다. 이와 함께 제안 모델의 명확성을 입증하기 위해 중복 전송 메커니즘을 적용한 네트워크 모델을 대표적인 비선형 실시간 모델인 역진자 시스템에 적

용하여 성능 분석을 수행하였다.

## References

- [1] IEEE, "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," *IEEE Std. 802.15.4*, Jan. 2007.
- [2] A. Willig, "Recent and emerging topics in wireless industrial communication," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 4, no. 2, pp. 102-124, May 2008.
- [3] P. Park, P. Di Marco, P. Soldati, C. Fischione, and K. H. Johansson, "A generalized Markov chain model for effective analysis of slotted IEEE 802.15.4," in *Proc. IEEE 6<sup>th</sup> Int. Conf. Mobile Ad-hoc Sensor Syst. (MASS 2009)*, pp. 130 - 139, Macau, China, Oct. 2009.
- [4] M. Zuniga and B. Krishnamachari, "Analyzing the transitional region in low power wireless links," in *Proc. 1<sup>st</sup> Annu. IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor Ad Hoc Commun. Networks (IEEE SECON 2004)*, pp. 517 - 526, Santa Clara, U.S.A., Oct. 2004.
- [5] M. Z. Zamalloa and B. Krishnamachari, "An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links," *ACM Trans. Sensor Networks*, vol. 3, Article no. 7, June 2007.
- [6] IEEE, "Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs), Amendment 5: Amendment to the MAC sub-layer," *IEEE Std. P802.15.4e/D0.01 Part 15.4*, Apr. 2010.
- [7] A. R. Mesquita, J. P. Hespanha, and G. Nair, "Redundant data transmission in control/estimation over wireless networks," in *Proc. Amer. Control Conf. (ACC '09)*, pp. 3378-3383, Saint Louis, U.S.A., June 2009.
- [8] B. X. Yen, D. T. Hop, and M. Yoo,

“Redundant transmission in wireless networked control system over IEEE 802.15.4e,” in *Proc. Inform. Conf. Networking (ICOIN '13)*, pp. 628-631, Bangkok, Thailand, Jan. 2013.

**부이순연 (Bui Xuan Yen)**



2011년 7월 Hanoi University of Science and Technology 학사  
2011년 9월~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정  
<관심분야> Wired/Wireless Networks Control System

**이원희 (Wonhee Lee)**



2010년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2011년 9월~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정  
<관심분야> Wired/Wireless Networks Control System

**김영석 (Youngsuk Kim)**



2012년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2012년 3월~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정  
<관심분야> Wired/Wireless Networks Control System, Visible Light Communication

**유명식 (Myungsik Yoo)**



1989년 2월 고려대학교 전자공학과 학사  
1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사  
2000년 6월 SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사

2000년 09월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수  
<관심분야> Optical Network, OBS, EPON, QoS, Wireless MAC Protocol, MANET, RFID, USN, CR, Visible Light Communication, Social Network Services, Wired/Wireless Networks Control System