

# Electric Heat Tracing을 위한 Zigbee 기반 통합 감시제어 시스템의 개발 및 검증

박성우\* · 박순응\*\*

Development and Verification of Zigbee-Based Monitoring and Control System for Electric Heat Tracing

Sung-Woo Park\* · Sun-Eng Park\*\*

요 약

Electric heat tracing 시스템은 플랜트 내 각종 배관의 온도를 관리하는 시스템이다. 본 논문에서는 electric heat tracing 시스템을 통합적으로 감시하고 제어하기 위한 TESCON(TEmpérature Sensing and CONtrol) 시스템을 제안한다. TESCON 시스템에서 디바이스간의 정보 교환은 Zigbee 네트워크 기반의 무선 방식으로 이루어진다. TESCON 시스템의 성능 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 테스트베드를 통해서도 비슷한 결과를 얻음으로써 TESCON 시스템의 유효성을 입증하였다. 또한, 계층적 트리 토폴로지를 기반으로 하는 네트워크 분할, 채널 재사용, 프레임 집약 기법 등을 적용한 시스템 확장 방안도 제시하였다.

ABSTRACT

An electric heat tracing system manages the temperature of pipes used in a plant. We propose a Zigbee-based wireless system so called the TESCON(TEmpérature Sensing and CONtrol) to monitor and control the electric heat tracing system in an integrated way. Simulations have been done to analyze the performance of the TESCON system. The performance of the TESCON system is validated by obtaining similar results via testbed operation. We also suggest an extension method of the TESCON system based on the hierarchical tree topology by adopting techniques such as network partition, channel reuse and frame aggregation.

키워드

Electric Heat Tracing, Monitoring, Control, Zigbee, WPAN  
열 추적 시스템, 감시, 제어, 지그비, 무선 개인 영역 통신망

## 1. 서론

발전, 화학, 정유 등의 플랜트에는 프로세스 배관, 유틸리티 배관, 도압 배관 등과 같은 각종 배관들이 설치되어 있다. 이 배관들은 플랜트의 안정적 운영을

위해 일정한 온도를 유지해야 하며, 특히 동절기에 동파되지 않게 적절히 관리되어야 한다. Electric heat tracing 시스템은 플랜트 내 배관들의 온도를 일정하게 유지하기 위해 사용하는 설비로서 플랜트의 원활한 운영을 위한 필수적인 요소이다[1].

\* 교신저자 : 한남대학교 정보통신공학과

\*\* (주)거동기업 부설연구소

• 접수일 : 2015. 10. 21

• 수정완료일 : 2015. 12. 13

• 게재확정일 : 2015. 12. 24

• Received : Oct 21, 2015, Revised : Dec 13, 2015, Accepted : Dec 24, 2015

• Corresponding Author : Sung-Woo Park

Dept. of Information and Communication Eng., Hannam University,

Email : swpark@hnu.kr

그림 1은 electric heat tracing 시스템의 실제 형상과 기본 구성 요소를 보여주고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 electric heat tracing 시스템은 전원 연결 박스(power kit)에 연결된 열선(heating cable)을 전기적으로 개폐함으로써 배관의 온도를 조절한다. 온도 유지를 위해 필요한 전력은 로컬 패널로부터 전력선(power cable)을 통해 공급된다.

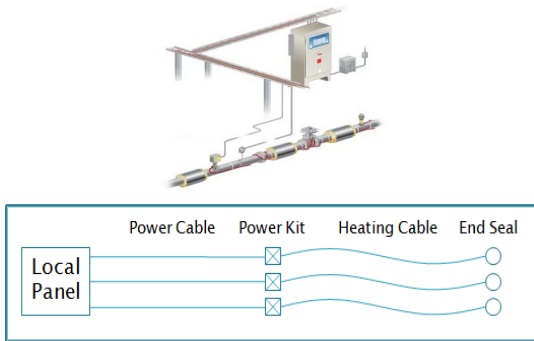


그림 1. Electric heat tracing 시스템의 구성 요소  
Fig. 1 Components of electric heat tracing system

Electric heat tracing 시스템은 배관 온도의 센싱 및 제어 방식에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, ambient 방식은 로컬 패널에 연결된 온도 센서를 통해 대기 온도를 측정한 후 일정 온도에서 열선을 일괄적으로 개폐한다. 둘째, thermostat 방식은 배관에 직접 기계식 thermostat를 부착하여 온도를 조절한다. 셋째, RTD(Resistance Temperature Detector) 센싱 방식은 배관에 RTD 센서를 부착하여 배관의 온도를 측정하고 조절한다.

RTD 방식은 온도 유지와 관리 측면에서는 가장 적절한 방식이지만 고가의 설치 및 유지 비용으로 인해 발전소 또는 플랜트의 중요 부분에만 제한적으로 적용해 왔다. 따라서 electric heat tracing 시스템에 대해 가격과 성능을 고려한 효율적인 모니터링 및 제어에 대한 필요성은 매우 크다고 할 수 있으며[2], 이에 따라 각종 유무선 네트워크 기술의 적용 방안들이 꾸준히 제시되고 있다[3].

본 논문에서는 electric heat tracing 시스템의 감시 및 제어를 통합적으로 제공하기 위해 Zigbee 네트워크 기술을 적용한 TESCON(TEmperture Sensing

and CONtrol) 시스템을 소개하고자 한다. 최근 주목 받고 있는 Zigbee 네트워크는 주기/비주기적 센서 데이터의 송수신에 초점을 맞추어 개발된 저속, 저전력, 저가의 무선 통신 기술이다[4]. Zigbee 프로토콜은 Zigbee Alliance에 의해 표준화가 진행 중이며, IEEE 802.15.4 PHY/MAC 계층을 기반으로, 네트워크/응용 계층을 포함한 상위 계층들로 구성된다[5]. Zigbee 네트워크에서는 성형, 그물형 등 임의의 토폴로지를 구성할 수 있고 실시간 센서 데이터의 무선 전송도 가능하기 때문에 각종 센서 시스템의 모니터링을 위해 사용될 수 있다[6].

본 논문의 이하 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Zigbee 네트워크 프로토콜을 소개한다. 3장에서는 Zigbee 기반의 TESCON 시스템을 제안한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 테스트베드를 통해 얻어진 TESCON 시스템의 성능 평가 결과를 기술하고 시스템의 확장 방안을 논의한다. 5장에서는 본 논문을 결론짓는다.

## II. Zigbee 네트워크

### 2.1 물리 계층

Zigbee 프로토콜의 하부 구조로 채택한 IEEE 802.15.4 PHY 계층은 확산 대역 방식을 사용하며, 주파수 대역(868/915MHz와 2.4GHz)에 따라 크게 두 종류의 물리 계층으로 구분된다[7]. TESCON 시스템은 2.4GHz ISM 대역의 물리 계층을 사용하며, 최대 전송 속도는 250kbps이다. 2.4GHz 대역 물리 계층은 2.4~2.4835GHz에서 2MHz 간격으로 모두 16개의 채널을 지원하며, 네트워크가 사용하고자 하는 채널을 이들 중에서 동적으로 선택할 수 있다. 물리 계층의 유류 부하, 즉 PSDU(PHY layer Service Data Unit)는 최대 127 바이트로 그 크기가 제한된다.

### 2.2 MAC 계층

IEEE 802.15.4 표준에 따르면 Zigbee 네트워크는 실시간 서비스를 위한 전송 용량을 확보하기 위해 수퍼프레임 구조를 기반으로 동작할 수 있다. 이 경우 Zigbee 코디네이터는 비콘 프레임을 주기적으로 송신하여 디바이스 간의 동기를 유지한다. TESCON 시스

템의 경우 멀티-홉 형태로 통신이 이루어지고 데이터의 전송 주기가 비교적 길다는 점을 감안하면 굳이 슈퍼프레임을 통한 동기 기능을 필요로 하지 않는다. 따라서, TESCON 시스템에서의 Zigbee 코디네이터는 비콘 프레임의 주기적으로 전송하지 않는다.

슈퍼프레임 구조를 사용하지 않음에 따라 TESCON 시스템에서의 모든 프레임 전송은 경쟁 기반의 CSMA-CA에 의해서 이루어진다. 이 때 백오프 또는 재전송 파라미터들은 성능에 직접적으로 영향을 미치게 되므로 시스템의 특성을 고려하여 적절히 설정되어야 한다. 한편, IEEE 802.15.4에서는 송신 디바이스가 데이터 프레임을 전송할 때 수신 디바이스의 ACK를 선택적으로 요청할 수 있다. TESCON 시스템의 경우 프레임의 전송 주기가 종단간 지연 시간에 비해 상대적으로 매우 크기 때문에 모든 데이터 프레임에 대해 ACK와 재전송 메커니즘을 적용하여 신뢰성을 확보하는 것이 적절하다.

### 2.3 네트워크 라우팅

Zigbee 네트워크는 AODV 기반의 동적 라우팅 방식을 기본적으로 사용하고 있다. 소스 디바이스는 전송할 데이터 패킷이 발생할 경우 목적지 디바이스를 찾기 위한 경로 요청 패킷을 네트워크 상에 브로드캐스팅한 후, 목적지 디바이스로부터 경로 응답 패킷을 수신함으로써 목적지 디바이스에 대한 경로를 확보한다. 이 때 얻어진 경로 정보는 라우팅 테이블에 일정 기간 동안 저장되며, 데이터 패킷의 포워딩을 위해 사용된다[8].

네트워크 자원을 절약하고자 하거나 디바이스의 라우팅 용량이 제한적일 경우 정적 라우팅을 할 수도 있다. 모든 디바이스는 네트워크 가입 과정에서 16 비트 길이의 네트워크 주소를 할당 받음과 동시에 Zigbee 코디네이터를 루트로 하는 트리 토폴로지를 형성한다. 이 때 할당된 주소 관계를 이용하면 최적이 아니지만 트리 상의 경로를 이용하여 라우팅 테이블을 필요로 하지 않는 셀프 라우팅을 할 수 있다.

[9]에서도 지적했듯이 디바이스의 이동성이 낮은 센서 네트워크 환경에서는 동적이면서 다소 복잡한 AODV 기반의 라우팅보다는 트리 기반의 정적 라우팅이 보다 효율적이다. TESCON 시스템 역시 네트워크 토폴로지가 트리 형태를 갖게 되고 디바이스들이

고정된 위치에 설치되기 때문에 동적 라우팅보다는 정적 라우팅을 적용하는 것이 적절하다. 또한, TESCON 시스템에서는 Zigbee 코디네이터가 싱크 디바이스 역할을 하기 때문에 모든 센서 데이터들이 네트워크 상에서 Zigbee 코디네이터로 집중된다. 따라서, 디바이스 주소를 할당할 때 Zigbee 표준 규격에 제시된 제한 조건들을 따를 필요 없이 임의로 디바이스 주소를 할당할 수 있는 장점이 있다.

## III. TESCON 시스템

### 3.1 시스템 구성

그림 2는 TESCON 시스템의 전체 구성도를 보여주고 있다. TESCON 시스템은 개별 열선의 파워 키트에 직접 RTD 센서를 설치하여 배관 온도를 측정함으로써, 정확도를 높이고 불필요한 전력 소모를 현저하게 줄일 수 있다. 배관의 온도뿐만 아니라 heat tracing 회로의 무결성을 반영하는 단선 여부, 동작 전류 및 전압 등의 정보는 Zigbee 네트워크를 이용하여 주기적이면서 실시간으로 로컬 패널과 중앙 통제실에 전달된다. 반대로 각 열선에 대한 환경 설정 및 제어 역시 로컬 패널이나 중앙 통제실로부터 Zigbee 네트워크를 통해 이루어진다.

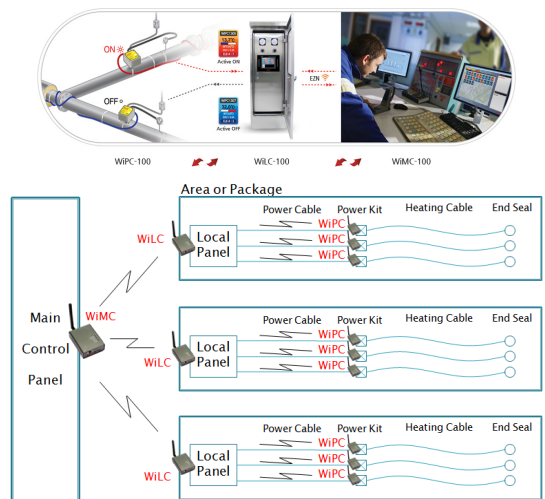


그림 2. TESCON 시스템 구성  
Fig. 2 Configuration of TESCON system

Heating 케이블에 대한 감시 및 제어가 Zigbee 네트워크를 통해 원격 무선으로 이루어지는 TESCON 시스템은 기존의 유선 제어 장치들에 비해 설치 단계에서부터 유지 관리 단계에 이르기까지 성능의 향상과 함께 많은 비용 절감 효과를 가져 올 수 있다. Zigbee 기반의 TESCON 시스템은 그림 1에서 보여준 시스템의 기본 구성 요소 외에 감시/제어 데이터의 무선 송수신을 위한 네 종류의 Zigbee 디바이스 (WiPC, WiLC, WiMC, WiTC) 들을 추가적으로 갖추고 있다. WiPC는 종단 디바이스, WiLC는 중간 관리 디바이스, WiMC는 최종 관리 디바이스 역할을 각각 담당한다.

### 3.2 시스템 디바이스

그림 3은 WiPC의 형상과 기능 블록 다이어그램을 보여주고 있다. WiPC는 파워 케이블에 부착되어 열선이 설치된 배관의 온도 상태를 감시하고, 측정 온도에 따라 열선의 입력 전원을 개폐하는 기능을 수행한다. 또한, WiPC는 전압/전류 값을 측정하여 입력 전력의 이상 여부도 점검한다. 모든 측정값과 heating cable의 가열 여부에 대한 감시 정보는 Zigbee 모듈을 통해 WiLC를 거쳐 WiMC에게 주기적으로 무선 전송된다.

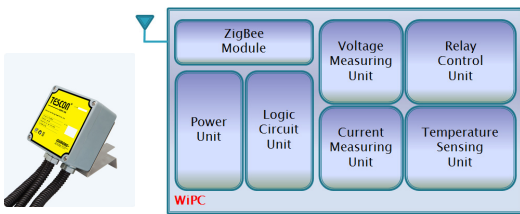


그림 3. WiPC 기능 블록도  
Fig. 3 Functional block diagram of WiPC

그림 4는 WiLC의 형상과 기능 블록 다이어그램을 보여주고 있다. WiLC는 로컬 패널에 부착되어 WiPC로부터 수신한 온도, 전압, 전류 정보를 모니터에 표시함과 동시에, 운전 온도를 설정하여 각 WiPC에게 열선의 개폐를 위한 제어 명령을 송신한다. 또한, WiLC는 다수의 WiPC로부터 주기적으로 전송된 데이터를 USB 인터페이스를 통해 연결된 로컬 PC로 보내고, 동시에 Zigbee 모듈을 이용하여 WiMC로도

전송한다. 로컬 PC에서는 자신과 연결된 WiLC를 통해 원격으로 WiPC들의 상태를 관리한다. 다른 디바이스와는 달리 WiLC에는 두 개의 Zigbee 모듈이 존재하며, 시스템 확장을 위해 서로 다른 채널을 사용할 경우 한쪽 Zigbee 모듈을 통해서서는 WiPC, 다른 Zigbee 모듈을 통해서서는 WiMC와 동시에 데이터를 주고받을 수 있다.

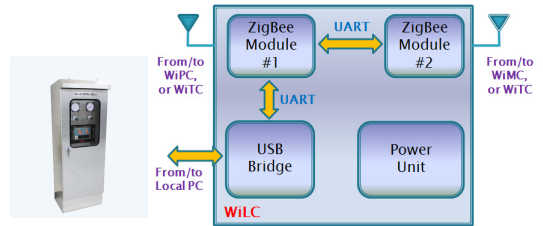


그림 4. WiLC 기능 블록도  
Fig. 4 Functional block diagram of WiLC

그림 5는 WiMC의 형상과 기능 블록 다이어그램을 보여주고 있다. WiMC는 중앙 통제실에 위치하며 WiPC로부터 WiLC를 거쳐 수신된 배관의 온도/전압/전류 정보를 메인 컴퓨터로 전달하는 역할을 수행한다. 메인 컴퓨터에는 WiPC로부터 수신한 데이터를 종합적으로 관리하는 응용 프로그램이 탑재되어 운영된다. 따라서 배관 및 열선의 상태는 WiLC의 로컬 PC에서뿐만 아니라 WiMC의 메인 컴퓨터에서 총괄하여 모니터링 및 제어가 가능하다.



그림 5. WiMC 기능 블록도  
Fig. 5 Functional block diagram of WiMC

그림 6은 WiTC의 형상과 기능 블록 다이어그램을 보여주고 있다. WiTC는 Zigbee 디바이스 간의 거리가 멀어지거나 그들 사이에 장애물이 가로막아 데이터 송수신이 원활하지 못할 경우 중간 지점에 설치하여 중계기 역할을 한다. WiTC는 WiPC-WiPC, WiPC-WiLC 또는 WiLC-WiMC 사이에 설치 및 운용이 가능하다.



그림 6. WITC 기능 블록도

Fig. 6 Functional block diagram of WITC

#### IV. 성능 평가

##### 4.1 실험 환경

TESCON 시스템에 대한 성능 평가를 위해 NS-2를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션과 같은 수의 디바이스<sup>1)</sup>(WiLC)로 구성된 테스트베드를 구축하여 운영한 후 실측 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 위해 그림 7과 같이 50mx50m의 영역에서 120개의 디바이스로 구성된 TESCOON 네트워크 토폴로지를 임의로 생성하였다. 하나의 디바이스가 차지하는 평균 면적은 약 20m<sup>2</sup>이다. 싱크 디바이스에 해당하는 Zigbee 코디네이터는 네트워크 정중앙에 배치하였다. Zigbee 코디네이터를 포함한 모든 디바이스의 전송 전력 범위는 12m로 동일하게 설정하였다.

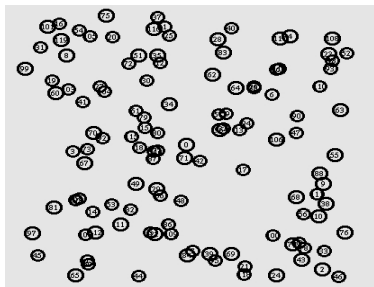


그림 7. TESCOON 시스템의 네트워크 토폴로지

Fig. 7 Network topology of TESCOON system

Zigbee 네트워크의 형성 과정은 Zigbee 코디네이터로부터 시동된다. 이 후 각 디바이스는 임의의 순서대로 시동되며, 능동 스캔 과정을 통해 Zigbee 코디네이터로의 가입 절차를 시작한다. 모든 디바이스는

Zigbee 코디네이터를 통해 네트워크에 가입됨과 동시에 Zigbee 라우터의 역할을 수행한다. Zigbee 코디네이터와의 거리가 멀어 직접 가입하지 못하는 디바이스들은 Zigbee 라우터를 통해 네트워크 가입 절차를 밟게 된다. 결과적으로 모든 디바이스의 가입 절차가 끝나면 Zigbee 네트워크는 Zigbee 코디네이터를 루트로 하는 계층적 트리 구조를 논리적으로 가지게 된다.

라우팅은 가입 절차 과정에서 형성된 논리적 트리 구조를 이용한 셀프 라우팅 방식으로 이루어진다. 각 디바이스가 주기적으로 생성한 20 바이트 크기의 센서 데이터는 트리 상의 부모-자식 관계를 이용해 Zigbee 코디네이터로 전달된다. 디바이스는 CSMA-CA 방식에 의해 데이터 프레임 전송하며 이때 ACK를 요청함으로써 전송 실패시 재전송을 시도하게 된다.

##### 4.2 실험 결과

TESCON 시스템은 비콘이 없는 모드로 동작하기 때문에 모든 MAC 프레임은 CSMA-CA 프로토콜에 의해 전송된다. 따라서, TESCOON 시스템의 성능은 CSMA-CA 프로토콜의 동작 파라미터에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. IEEE 802.15.4 규격에서는 표 1에 나타난 바와 같이 CSMA-CA 관련 파라미터들을 MAC PIB 속성 형태로 정의하고 있다. 각각의 MAC PIB 속성은 기본값을 가지며 허용 범위 내에서 변경할 수 있다.

표 1. CSMA-CA 관련 MAC PIB 속성[7]

Table 1. MAC PIB attributes for CSMA-CA[7]

Attributes	Description	Range (default)
macMinBE	min value of backoff exponent	0-macMaxBE (3)
macMaxBE	max value of backoff exponent	3-8 (5)
macMaxCSMABackoffs	max number of backoffs	0-5 (4)
macMaxFrameRetries	max number of retransmission	0-7 (3)

그림 8은 데이터 프레임의 전송 주기를 10초로 했을 경우 소스 디바이스 수에 따른 프레임 전달률을 나타내고 있다. 그림 8에서 'Sim-Def'로 표시된 결과

1) <http://www.isi.edu/nsnam/ns>

는 표 1에 나타난 CSMA-CA 파라미터들을 기본값으로 설정했을 때의 시뮬레이션 결과이며, 'Sim-Max'는 CSMA-CA 파라미터들을 표준 상의 허용 범위 내에서 최대값으로 설정했을 때의 결과이다. 'Testbed'는 테스트베드 운용을 통해 얻어진 실측 결과이다.

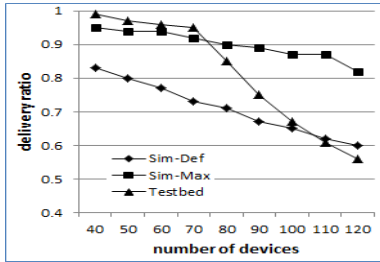


그림 8. 프레임 전달률 대 디바이스 수  
 Fig. 8 Frame delivery ratio vs. number of devices (transmission period: 10 seconds)

그림 8에서 소스 디바이스 개수가 증가함에 따라 프레임 전달률은 전체적으로 감소하며, CSMA-CA 파라미터들을 최대값으로 설정했을 때의 전달률이 기본값으로 설정했을 경우보다 20% 정도 높음을 알 수 있다. CSMA-CA 파라미터들을 최대값보다 크게 설정할 경우 전달률이 더욱 높아지는 사실도 추가적으로 확인하였다. IEEE 802.15.4 규격 상의 CSMA-CA 파라미터들은 TESCON 시스템의 특성을 적절히 반영하지 못하고 있기 때문에 필드 구축 환경에 따라 파라미터를 조정할 필요가 있다. 테스트베드와 시뮬레이션에서의 네트워크 토폴로지가 다소 차이가 있음을 고려할 때, 테스트베드의 결과는 시뮬레이션 결과에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다.

그림 9는 데이터 전송 주기에 따른 프레임 전달률의 변화를 소스 디바이스 개수 n에 따라 각각 보여주고 있다. CSMA-CA 파라미터는 표준 규격 상의 최대값으로 설정하였다. 전달률은 (소스 디바이스 개수 별) 모든 경우에 있어서 전송 주기가 증가함에 따라 선형적으로 증가하다가 일정 구간을 지나면서 포화 상태에 이르게 된다. 전송 주기가 작을 때 전달률은 소스 디바이스의 개수에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 그러나 전송 주기가 15초를 넘어가면 모든 경우에 있어서 90% 이상의 전달률을 나타내고 있으며, 30초에 이르면 95% 이상의 전달률을 보이고 있다.

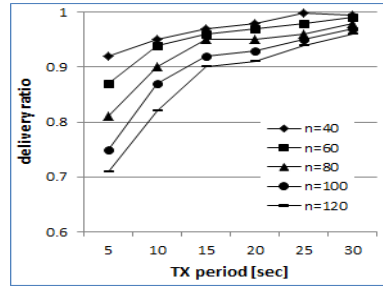


그림 9. 프레임 전달률 대 전송 주기  
 Fig. 9 Frame delivery ratio vs. transmission period

그림 10은 데이터 프레임의 전송 주기에 따른 중단 간 평균 지연 시간을 소스 디바이스의 개수(n)별로 각각 보여주고 있다. 전체적으로 전송 주기가 증가하면 트래픽 유입량이 감소하면서 지연 시간도 감소하고 있다. 한편, 일정한 전송 주기에서 디바이스의 숫자가 증가하면 지연 시간이 증가하나 전송 주기에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 성능에 미치는 영향은 전반적으로 크지 않다.

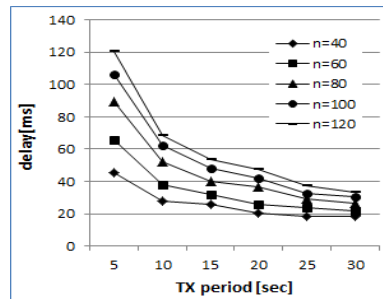


그림 10. 평균 지연 시간 대 전송 주기  
 Fig. 10 Average delay vs. transmission period

그림 11은 그림 11은 데이터 전송 주기에 따른 평균 홉 수를 소스 디바이스의 개수 n에 따라 각각 보여주고 있다. TESCON 시스템의 라우팅은 네트워크 시작 과정에서 형성된 트리 구조를 기반으로 하기 때문에 트래픽의 영향을 크게 받지 않는다. 따라서, 평균 홉 수는 전송 주기와는 상관없이 거의 일정한 값을 보이고 있다. 동일한 전송 주기에서는 디바이스 개수가 증가하면 네트워크 직경이 커지게 되므로 평균 홉 수가 늘어날 수 밖에 없다. 네트워크 직경은 네트워크 면적의 제곱근에 비례하기 때문에 디바이스의

증가로 인한 평균 홉 수의 증가율은 비선형적으로 감소함을 알 수 있다.

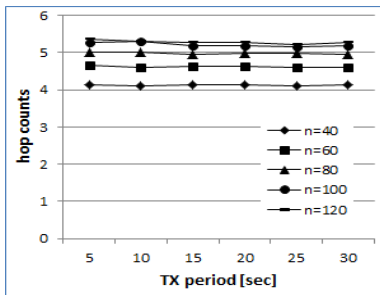


그림 11. 평균 홉 수 대 전송 주기

Fig. 11 Average hop count vs. transmission period

### 4.3 시스템 확장

CSMA-CA에 의해 데이터 프레임의 전송이 이루어지는 TESCON 시스템에서는 트래픽이 증가할 경우 프레임 충돌 확률이 높아져 시스템의 성능 저하를 가져오게 된다. 따라서 TESCON 시스템을 단일 네트워크로 구성할 경우 일정 수준 이상의 성능을 유지하기 위해서는 디바이스의 개수를 제한할 수 밖에 없다. 테스트베드 및 시뮬레이션을 통해 단일 TESCON 시스템이 적정 수준의 성능을 유지하기 위해 수용 가능한 디바이스의 개수는 120개 정도로 파악되었다. 따라서, 디바이스의 개수가 120개를 초과할 경우 이를 수용하기 위한 확장 방안이 필요하다.

TESCON 시스템은 네트워크 형성 과정에서 자연스럽게 WiMC-WiLC-WiPC로 이루어지는 계층적 트리 토폴로지를 갖게 된다. WiMC는 Zigbee 코디네이터로서 트리 구조에서 루트의 역할을 하게 된다. WiMC는 가입 절차를 통해 다수의 WiLC를 자식으로 받아들이고, 각각의 WiLC는 다시 다수의 WiPC를 자식으로 받아들이면서 디바이스들 간에 부모-자식의 계층적 관계가 반복적으로 형성된다. 이 때 WiLC와 일부 WiPC는 Zigbee 라우터로서의 역할을 수행한다.

#### 4.3.1 네트워크 분할

TESCON 시스템은 디바이스 개수가 많을 경우 단일 WPAN이 아닌 다수의 WPAN으로 분할하여 구성할 수 있다. 그림 12에 나타난 바와 같이 TESCON 시스템은 WiMC를 코디네이터로 하고 자식 WiLC들

로 구성된 백본 WPAN (#0)과, WiLC를 코디네이터로 하고 자식 WiPC들로 구성된 다수의 액세스 WPAN (#1, #2, #3 등)으로 구성할 수 있다.

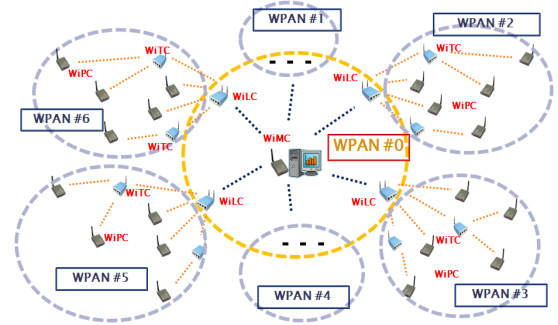


그림 12. TESCON 시스템의 확장

Fig. 12 Extension of TESCON system

#### 4.3.2 채널 재사용

각각의 WPAN은 서로 다른 채널을 사용하면서 간섭을 피할 수 있고, 이는 곧 TESCON 시스템의 용량 확대가 가능함을 의미한다. 이 경우 백본 WPAN과 액세스 WPAN간의 연동 기능을 수행하는 WiLC는 서로 다른 채널에서 동작할 수 있는 두 개의 Zigbee 모듈이 필요하다 (그림 4 참조). Zigbee 규격에 따르면, TESCON 시스템이 동작하는 2.4GHz 대역에서는 최대 16개까지의 무선 채널을 사용할 수 있다.

#### 4.3.3 프레임 집약(aggregation)

TESCON 시스템에서는 센서 데이터가 WiPC에서 발생하여 WiLC를 거쳐 WiMC로 전달된다. 모든 데이터 프레임이 싱크 디바이스 역할을 하는 WiMC로 집중됨에 따라 WiMC와 WiLC로 이루어진 백본 WPAN에 트래픽 과부하가 걸리기 쉽다. 과부하를 완화하기 위한 방안으로서 TESCON 시스템에서는 WiLC가 WiPC로부터 수신된 MAC 프레임을 WiMC로 전달하는 과정에서 다수의 WiPC 프레임을 하나의 WiLC 프레임으로 집약하는 기능을 갖춘다. 프레임 통합을 통해 전송 효율을 높임으로서 시스템이 수용 가능한 디바이스의 최대 개수를 증가시킬 수 있다.

## V. 결 론

Electric heat tracing 시스템의 감시 및 제어를 위한 Zigbee 기반의 TESCON 시스템을 제안하였다. 테스트 베드 구축과 NS-2를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 TESCON 시스템의 성능을 평가하였다. 테스트베드와 컴퓨터 시뮬레이션의 실험 분석 결과를 비교함으로써 TESCON 시스템의 유효성을 입증하였다.

실험 결과 TESCON 시스템은 CSMA-CA 프로토콜의 파라미터 설정에 따라 상이한 성능을 보여 주었다. CSMA-CA 파라미터를 표준 규격 상의 최대값으로 설정했을 때 TESCON 시스템의 성능 한계를 파악하였다. 결과적으로 TESCON 시스템을 단일 WPAN으로 구축하고 데이터의 전송 주기를 30초로 설정했을 때 프레임 전달률을 95%로 유지하기 위해서 수용 가능한 WILC/WIPC의 최대 개수는 120개 정도가 된다.

또한, TESCON 시스템을 하나의 백본 WPAN과 다수의 액세스 WPAN으로 구성된 계층적 다중 WPAN 형태로 구축하고 채널 재사용과 프레임 집약 기법을 적용하여 확장할 경우 1000개 이상의 디바이스도 수용할 수 있도록 설계하였다.

## References

- [1] L. Stehling and J. Alanis, "Electric heat tracing controls: its integration in industrial facilities," *IEEE Industry Applications Mag.*, vol. 18, iss. 2, 2012, pp. 60-69.
- [2] B. Johnson and J. Maurin, "Electric heat tracing: using electronic controls to enhance performance and safety," *IEEE Industry Applications Mag.*, vol. 8, iss. 6, 2002, pp. 60-69.
- [3] V. Gungor and F. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation," *Computer Networks*, vol. 50, iss. 7, 2006, pp. 877-897.
- [4] Y. Moon, S. No, Y. Bea, and J. Park, "The Implementation of wire and wireless Integration Module of Zigbee and Optical Communication for Ship Area network(SAN)," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 5, no. 5, 2010, pp. 428-434.
- [5] S. Kim, H. No, J. Park, and S. Go, "Design

and Development of Strain Measurement System Based on Zigbee Wireless Network," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 7, no. 3, 2011, pp. 585-590.

- [6] K. Kim, "Implementation of real-time sensor monitoring system on zigbee module," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 6, no. 2, 2011, pp. 312-318.
- [7] IEEE Std. 802.15.4-2006 Part 15.4: *Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)*, IEEE, Sept., 2006.
- [8] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing," *RFC 3561*, IETF, July 2003.
- [9] F. Cuomo, S. Luna, U. Monaco, and T. Melodia, "Routing in zigbee: benefits from exploiting the IEEE 802.15.4 association tree," *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications*, Glasgow, UK, June 2007, pp. 3271-3276.

## 저자 소개



### 박성우(Sung-Woo Park)

1985년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1989년 Texas A&M 대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1992년 UC, Irvine 대학교 대학원 전기및컴퓨터공학과 졸업(공학박사)

1992년 ~ 현재 한남대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 컴퓨터네트워크



### 박순응(Sun-Enng Park)

1985년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2000년 삼성전자 (교환기, WCDMA 단말기 개발)

2009년 벤처기업 (스마트폰, USN 응용 분야 개발)

2009년 ~ 현재 (주)거동기업 부설연구소 연구소장

※ 관심분야 : 정보통신