

지능형 빌딩을 위한 ZigBee 위치기반 인간 적응형 HVAC 시스템

ZigBee Location-based Human Adaptive HVAC System for Intelligent Building System

박은주, 이석, 이경창, 김현희*
(Eun-Ju Park¹, Suk Lee¹, Kyung-Chang Lee², and Hyun-Hee Kim²)

¹Pusan National University

²Pukyong National University

Abstract: This paper focuses on human adaptive HVAC system that can regulate the thermal comfort of the resident in intelligent buildings. The thermal comfort is represented in this paper by PMV (Predicted Mean Vote) as defined by ISO 7730. This PMV value indicates how hot or cold a resident feels by considering temperature, humidity, resident's metabolic rate, relative air velocity, and clothing insulation. In order to develop such a system, a location detection system based on ZigBee module was used along with temperature sensors, other environment sensors. The human adaptive HVAC system was evaluated experimentally on a test bed emulating a room.

Keywords: human adaptive device, location-based service, metabolic rate, physical activity, HVAC system, PMV

I. 서론

마이크로프로세서, 센서, 전자기기 등 IT 시스템이 발전하면서 빌딩, 오피스 환경도 점차 지능화되어 가고 있다. 즉, 그림 1과 같이 빌딩에 필요한 기계 설비, 전력, 조명, 정보 통신, 보안, 공조 시설 등 주요 시스템을 유기적으로 통합하여 첨단 IT 서비스를 제공하는 지능형 빌딩 시스템(IBM: Intelligent Building System) 구축에 대한 관심이 높아지고 있다[1-3].

이렇게 지능형 빌딩에 대한 관심이 증대되면서 실내 거주자의 편의성을 고려한 지능화된 전자기기에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 예로, 공기청정기, 가습기, 에어컨 등은 사용자의 편의성을 고려하여 내부 청소 시간 혹은 필터 교체 주기를 자동으로 알려주거나, 스스로 필터 청소를 한다. 그리고, 로봇 청소기는 실내 장애물을 인식, 회피하며 빌딩 내부를 청소하고 전원이 부족하면 스스로 충전한다. 또한, 스마트 조명의 경우는 실내 거주자의 유무, 현재 시간, 실내 채광 등을 고려하여 능동적으로 조명의 밝기를 제어하고, 거주자의 위치에 따라 조명의 방향도 제어한다[4].

그러나 지금까지의 전자기기는 거주자와 소통하거나 상황을 인식하여 거주자에게 맞는 지능형 서비스를 제공하는 것이 아니라 단지, 거주자의 주변 상황을 인식하여 제어하였다. 미래의 전자기기는 인간을 보다 더 이해하고, 시스템 사이의 유기적인 상호 작용을 수행할 필요가 있다. 예를 들어, 거주자의 감정 상태를 인식하여 조명의 밝기를 제어하거나 음악을 선택적으로 플레이 할 수 있어야 한다. 또한, HVAC (Heat,

Ventilation, Air Conditioning)의 경우는 실내 온도, 실내 공기 질(IAQ: Indoor Air Quality) [5]의 상태 등을 종합적으로 분석하고, 거주자의 신체 활동 정도를 파악하여 쾌적한 실내 환경을 조성할 수 있어야 한다. 그러나 지금까지 인간 적응형 기기에 대한 연구는 전자기기보다는 로봇 시스템에 관한 연구가 대부분이었으며, 특히 인간과 로봇 사이의 자율적인 의사소통을 위하여 인간의 행동 모션을 언어로 이해하려는 연구가 주를 이뤘다[6,7].

따라서, 본 논문에서는 인간 중심의 시스템 개발을 위해 지능형 빌딩을 위한 인간 적응형 HVAC 시스템을 제안한다. HVAC 시스템이 인간을 이해하고 능동적인 서비스를 제공하기 위해서는 거주자의 개인 정보와 현재 상태 정보, 주변 상황 정보 등을 알아야 한다. 개인 정보는 거주자의 나이, 성별 등이며, 상태 정보는 거주자의 현재 위치, 활동 상태, 이동 속도, 이동 경로, 냉난방기와의 거리 등이 있다. 그리고 주변 상황 정보는 시간, 실내 온도, 습도, 공기질 등이 있다. 인간 적응형 HVAC 시스템 개발을 위해서는 이러한 정보를 종합적으로 분석하고 평가 할 수 있어야만이 빌딩 내 거주자를 위한 쾌적한 실내 환경 제어가 가능하다. 이를 위해 거주자 신체 활동량 기반 PMV (Predicted Mean Vote) 추정 방법에 제안하고, 거주자 PMV에 따른 냉난방기 제어기법을 제안하고자 한다

본 논문은 서론을 포함하여 V 장으로 구성되어 있다. II 장에서는 ZigBee 위치기반 인간적응형 HVAC 시스템의 일반적인 구조와 ZigBee 위치인식 방법에 대하여 설명하고, III 장에서는 인간 적응형 HVAC (Heat, Ventilation, Air Conditioning) 시스템을 위하여 거주자의 신체활동량 정보를 이용한 PMV 추정 방법에 대하여 설명한다. IV 장에서는 실내 실험 장치를 이용하여 제안된 ZigBee 위치기반 HVAC 시스템의 적용 가능성을 평가한다. 마지막으로 V 장에서는 결론과 향후 연구 방향에 대하여 서술한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 5. 15., 수정: 2012. 6. 14., 채택확정: 2012. 6. 30.

박은주: 부산대학교 지능기계공학과(ej.park@pnu.edu)

이 석: 부산대학교 기계공학부(slee@pnu.edu)

이경창: 부경대학교 제어계측공학과(gclee@pknu.ac.kr)

김현희: 부경대학교 산업과학기술연구소(hhkim@pknu.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012-0004168).

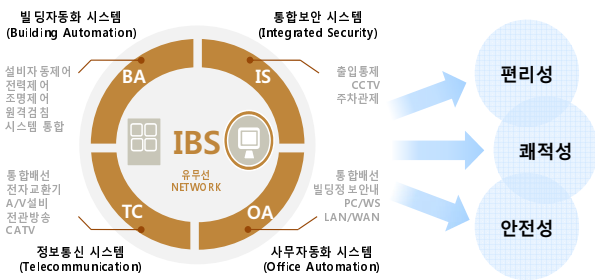


그림 1. 지능형 빌딩 시스템.
Fig. 1. IBS (Intelligent Building System).

II. ZigBee 위치기반 인간 적응형 HVAC 시스템

1. ZigBee 위치인식 기반 인간 적응형 HVAC 시스템 구조

본 논문에서는 그림 2와 같이 무선 ZigBee 위치 인식 시스템을 이용한 인간 적응형 HVAC 시스템 구조를 제안한다. 전체 시스템은 무선 ZigBee 위치인식 시스템과 인간 적응형 HVAC 제어기, 다양한 형태의 인간 적응형 전자기기로 구성되어 있다. 먼저, 빌딩 내 거주자에게 지능형 서비스를 제공하기 위해서는 빌딩 거주자의 위치 정보(resident's location)나 사무실의 온도(temperature), 습도(humidity), 공기 질(air quality) 등과 같은 실내 환경에 관한 정보가 수집되어야 한다. 수집된 정보는 빌딩 네트워크 시스템(building network system)을 통하여 위치기반 인간 적응형 HVAC 제어기로 전송된다. 인간 적응형 HVAC 제어기는 수집된 정보를 통해 빌딩 내 거주자의 위치와 행동 패턴, 신체활동량(metabolic rate) 등을 스스로 파악하여 거주자에게 가장 적합한 생활 환경을 결정하고, 냉방기나 HVAC 기기 등과 같은 빌딩 내 다양한 인간 적응형 전자기기를 능동적으로 제어하게 된다.

인간 적응형 HVAC 제어기에서는 거주자의 위치에 따른 지능형 서비스를 제공하기 위하여 다음과 같은 4 가지 기능을 제공한다. 첫째, ZigBee 위치기반 시스템으로부터 거주자의 위치 정보(resident's location)를 이용하여 거주자 이동궤적을 계산하고 온도(temperature), 습도(humidity), 공기 질(air-quality)

등과 같은 실내 환경정보(indoor environment information)를 수집한다. 둘째, 거주자의 이동 궤적과 위치, 가상 빌딩 맵(virtual building map) 등을 고려하여 현재 거주자가 어떤 활동(resident's physical activity)을 하고 있는지를 추정한다. 가상 빌딩 맵은 빌딩의 평면 구조도, 가구 배치 정보 등이 포함되어 있어 실내 거주자의 위치에 따른 대표 활동을 추정할 수 있다. 예로, 거주자가 책상에 앉아 사무 혹은 컴퓨터 작업 중인지, 복사기 앞에 서서 복사, 스캔 작업 중인지를 추정할 수 있다. 그리고 거주자의 이동 속도나 행위 등과 같은 정보를 이용하여 ISO 8996 신체 활동량 데이터베이스(metabolic rate DB)로부터 거주자의 신체 활동량을 추정한다[8,9].

셋째, 거주자의 위치와 행위, 신체 활동량 등이 결정되고 나면, 인간 적응형 제어기(human adaptive controller)는 거주자에게 보다 능동적인 지능형 서비스를 제공하기 위하여, 냉방기나 HVAC 기기 등을 위한 적절한 제어 값을 결정하게 된다. 이렇게 결정된 제어 값은 빌딩 네트워크 시스템을 통하여 인간 적응형 전자기기로 전달된다. 마지막으로, 빌딩 위치 인식 시스템은 인간 적응형 전자기기의 제어에 따라 변화되는 온도나 습도, 조명 등과 같은 빌딩내 환경 변화를 실시간으로 감지하여 위치기반 인간 적응형 HVAC 제어기로 전송하게 되고, 전자기기 제어기는 이를 실시간으로 반영하여 보다 더 거주자에게 적합한 제어 값을 결정하게 된다.

2. ZigBee 기반 위치인식 방법

ZigBee 위치인식은 RSSI (Received Signal Strength Indication) 기반 삼각측량법을 이용하여 실내 거주자의 위치를 계산한다. 그림 3과 같이, ZigBee 위치 인식 시스템은 거주자의 위치를 추정하기 위한 이동노드(tag node), 기준좌표인 고정노드(reference node)와 이동노드의 위치정보를 취합하는 제어노드(control node)로 구성된다. 거주자의 위치는 일반적으로 거리가 멀수록 신호의 세기가 약해지는 RSSI 이론을 근거로 추정한다. 고정노드가 송신하는 신호의 세기인 RSSI는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$RSSI = - (10n \times \log_{10} d + A) \tag{1}$$

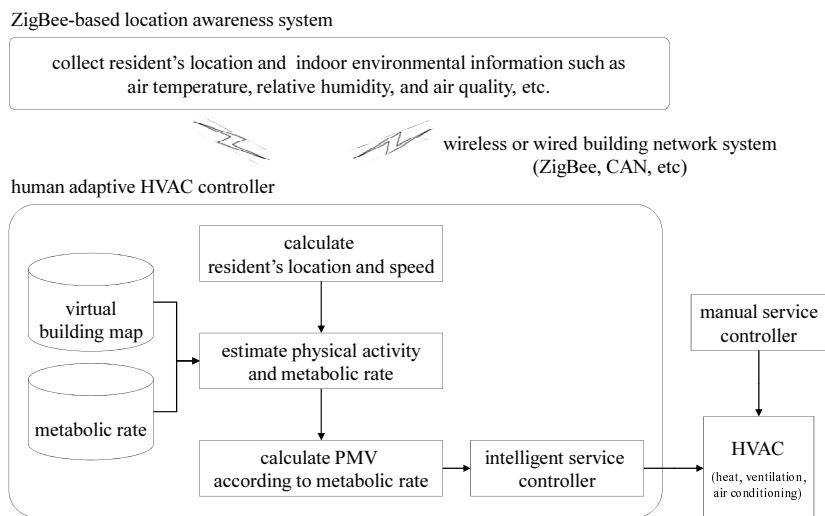


그림 2. ZigBee 위치 인식 시스템을 이용한 인간 적응형 HVAC 시스템 구조.
Fig. 2. Framework of human adaptive HVAC using ZigBee location awareness system.

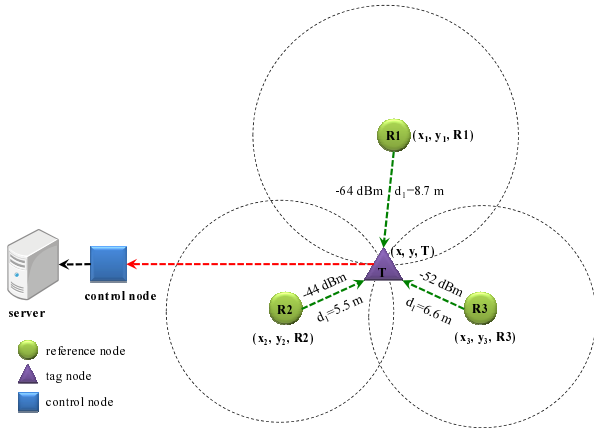


그림 3. ZigBee 위치 인식 시스템 구조.
Fig. 3. ZigBee-based Location awareness system.

여기서 n은 신호 전파 상수로 거리에 따른 경로 손실 비율을 나타내며, A는 1 m거리에서의 수신신호 세기를 나타낸다. 일반적으로 n과 A는 환경에 대한 영향을 받는 상수이므로 측정되는 환경에 따라 신호 전파 상수를 설정해야 한다. 그리고, d는 고정노드와 이동노드간의 수신거리이다. 예를 들면, 식 (1)에 신호 전파 상수 n은 10, 1 m 거리에서의 수신신호 세기 A는 -30 dBm을 대입한 후, 거리 d에 대하여 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$d = 10^{\left(\frac{RSSI - 30}{10 \times 10}\right)} \quad (2)$$

마지막으로 ZigBee 기반 위치인식은 고정노드의 위치정보와 이동노드에서 수신한 RSSI 신호세기를 삼각측량법으로 계산하여 위치를 추정한다. 삼각측량법은 2차원 평면상에서 이동하는 개체의 위치를 추정하는 방법이며, 최소 3개 이상의 기준점이 필요하다. 그림 3에서와 같이 기준점을 R1, R2, R3 라 하고, 각 고정노드의 좌표는 (x1, y1), (x2, y2), (x3, y3) 로 한다. 그리고 이동하는 개체를 T로 나타내고 현재의 위치는 (x, y)라 한다. 여기서 이동노드로부터 세 개의 고정노드까지 거리를 d1, d2, d3 라 하고 이는 식 (3)에 의해 계산된다. 3개의 원의 교차점으로부터 이동노드 T의 현재 위치를 계산한다.

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 &= (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

예로, 3개의 고정노드로부터 받은 RSSI가 -44 dBm, -52 dBm, -64 dBm 이라 하면 각 거리는 5.5 m, 6.6 m, 8.7 m로 계산되며, 이로부터 이동노드의 위치를 계산할 수 있다.

3. ZigBee 위치인식 정밀도 향상 알고리즘

본 논문에서 이용하는 ZigBee 기반 위치인식 방법은 고정노드의 위치정보와 이동노드에서 수신한 RSSI 신호세기를 삼각측량법으로 계산하여 위치를 추정한다. 이동노드의 현재 위치를 계산하는데 핵심이 되는 RSSI는 온도나 습도와 같은 환경조건에 따라 편차를 가진다. 따라서 보다 정확한 위치정보를 수집하기 위해서는 현재 위치하는 공간에서 RSSI의 파라미터를 최적화 하는 과정이 필요하다. 그리하여 그림 4와

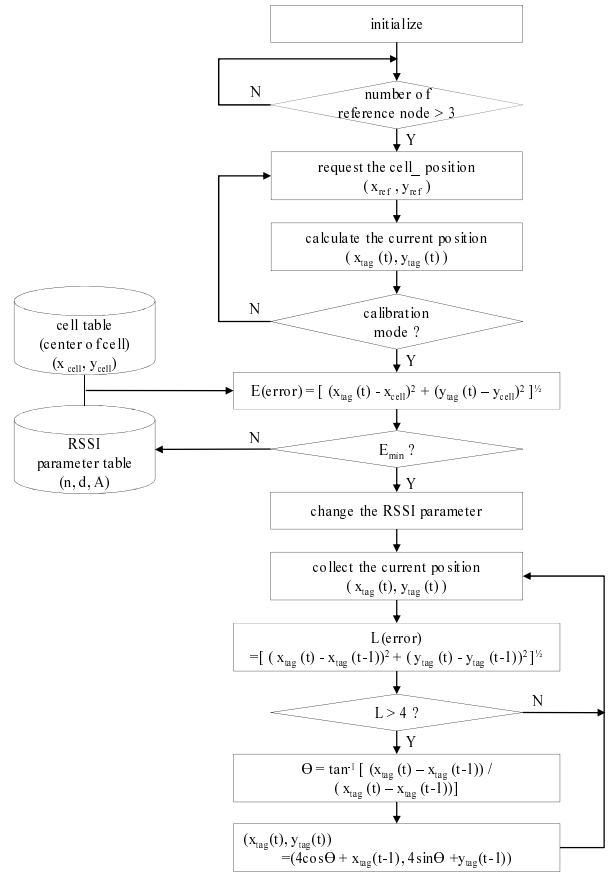


그림 4. ZigBee 위치 인식정밀도 향상 알고리즘.
Fig. 4. Algorithm of ZigBee-based location.

같이 ZigBee 위치인식 정밀도를 높이기 위한 RSSI의 파라미터 최적화와 위치오차 감소를 이용한 정밀도 향상 알고리즘을 제안한다.

우선, 이동노드의 전원이 인가되면 모듈 초기화를 수행하고 이동노드의 위치는 삼각측량법을 기반으로 하기 때문에 반드시 고정노드의 수가 3개 이상인지를 점검한다. 이 후에 이동노드는 브로드캐스팅 방식을 통해 주변 고정노드들에게 위치정보를 요청하며, 고정노드의 위치는 좌표 (x_ref, y_ref)로 나타낸다. 이동노드는 고정노드의 위치정보를 수신하면 수신한 데이터의 RSSI을 계산한다. 그리고 측정된 고정노드들의 RSSI와 위치정보를 이용하여 이동노드의 현재 위치(x_tag, y_tag)를 연산하는 과정을 반복하게 된다.

앞 절에 기술한 것과 같이 RSSI는 환경정보에 따라 다양한 편차를 가지기 때문에 안테나 계인파 관련된 현재의 RSSI 파라미터를 최적화 하는 과정이 필요하다. 이를 ‘calibration mode’로 표현하였으며, 안테나 계인을 보다 정확하게 하기 위해서는 위치를 측정하는 환경에서의 이동노드에 설정된 RSSI 파라미터는 측정 환경에 맞게 설정되어야 한다. 따라서 이동노드를 특정 셀의 중심(x_cell, y_cell)으로 우선 이동한 후 교정과정을 수행한다. 관리자가 현재 위치의 오차를 보정하기 위해서 이동노드의 모드를 교정모드로 전환하게 되면, 이동노드는 현재의 위치정보와 셀의 중심좌표를 이용하여 위치 오차를 연속적으로 연산하여 자기가 속해있는 셀을 먼저 확인한다. 자기가 속해 있는 특정 셀이 결정되면,

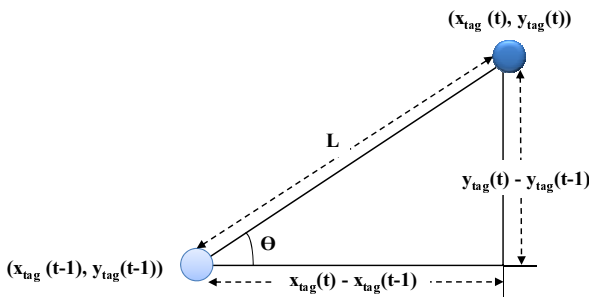


그림 5. ZigBee 위치인식 계산.

Fig. 5. ZigBee-based Location awareness system.

이동노드는 안테나 계인과 관련된 n (신호 전파상수), d (수신거리), A (1 m거리에서의 수신 신호 세기)의 정보를 동적으로 변경하면서 중점에서의 위치 오차가 최소가 되는 파라미터를 결정하게 된다. 파라미터 n 의 최솟값은 0, 최댓값은 31 이며 A 의 최솟값은 30, 최댓값은 50 이다.

파라미터 최적화 과정이 끝난 후 위치오차를 줄이는 알고리즘이 필요하다. 사무실 환경에서 거주자가 걷는 속도는 일반적으로 2 ~ 3 km/h이며 가장 빠르게 걷는 속도는 7 ~ 8 km/h 이다. 가장 빠르게 걷는 경우 1분에 120 m까지 이동할 수 있다. 거주자의 위치를 인식하는 이동노드이다. 자신의 위치는 제어노드에서 전송되며 주기는 2초이다. 즉 2초 동안 이동할 수 있는 거주자의 속도는 4 m이다. 현재 인식되는 위치와 이전에 인식되는 위치의 거리차이가 4 m 이상이면 위치오차라고 판단한다. 그러므로 인식되는 위치와 같은 방향으로 4m 되는 지점을 현재 위치로 인식한다.

예를 들어, 그림 5와 같이 현재 인식하는 위치는 $(x_{tag}(t), y_{tag}(t))$ 이고, 이전 인식된 위치는 $(x_{tag}(t-1), y_{tag}(t-1))$ 이다. 이전 인식되는 위치를 기준으로 현재 인식되는 위치와의 각도는 θ 이다. 현재 위치와 이전 위치의 거리 차이는 L 이라 한다. 거리차이 L 이 4 m가 넘으면 오차가 크다고 판단하고, 현재 인식하는 위치와 같은 각도로 이전 인식된 위치와 4 m 거리의 차이가 나는 지점을 현재 위치로 판단한다. 본 논문에서 제안하는 위치인식 정밀도 향상 알고리즘은 RSSI의 파라미터를 최적화하고 위치오차를 줄임으로써 위치인식의 정밀도를 향상시킨다.

III. 인간적응형 HVAC 시스템을 위한 PMV 추정

1. ZigBee 위치기반 거주자 신체활동량 추정 방법

ZigBee 위치기반 인간 적응형 HVAC 시스템은 쾌적한 실내환경 구축을 위해 거주자의 활동량에 따라 능동적으로 HVAC 시스템을 제어하고자 한다. 우선, 거주자의 신체 활동량을 추정하기 위하여 다음과 같은 두 가지 방법을 병행하여 사용한다. 첫 번째는 거주자의 활동이 이루어지는 특정 위치를 이용한 신체 활동량 추정 방법이다. 일반적으로, 거주자가 활동하는 공간은 실내 구조와 가구 등을 이용하여 특정 구역으로 구분될 수 있으며, 각 구역에서 행해지는 활동은 대표 활동으로 지정될 수 있다. 예로, 빌딩 내 거주자가 책상에 일정 시간 위치한다면 사무작업이나 PC 작업을 한다고 추정할 수 있다. 또한, 특정작업을 위한 작업대(work table)에 거주자가 위치한다면 그 작업대에 맞는 활동을 한다고 추정할 수

있다. 예로, 복사기 앞 등. 이러한 방법으로, 실내 특정 위치에서의 대표 활동이 적절하게 설정되고 이러한 설정이 가상 빌딩 맵(virtual building map)에 기록된다면, 거주자가 빌딩 내 특정 위치에 지속적으로 머물 때 거주자의 활동이 추정될 수 있고 거주자의 활동에 맞는 신체 활동량이 추정될 수 있을 것이다. 이 때, 거주자의 활동에 따른 신체 활동량 추정은 표 1과 같이 ISO 8996에서 제안하고 있는 신체 활동에 근거하여 이루어진다. 예로, 거주자가 개인 책상에서 일정 시간 움직임이 없는 경우 앉은 자세의 활동(sedentary activity, office)으로 간주하고, 신체 활동량을 70 W/m²로 추정한다.

두 번째는 거주자의 이동 속도를 이용한 신체 활동량 추정 방법이다. 위치 인식 시스템을 이용하여 거주자가 현재 위치에서 얼마 동안 어느 정도의 속도를 가지고 이동했는지를 계산하고, 계산된 이동 속도에 따라 거주자의 신체 활동량을 추정한다. 이 때, 이동 속도에 따른 신체 활동량은 표 1의 이동 속도에 의한 신체 활동량 구간에 따라 선형(linear) 근사화시킨 식 (4)에 의하여 추정된다.

$$M = \begin{cases} 30vx50, & v \leq 3 \text{ km/h} \\ 25v + 65, & 3 \text{ km/h} < v \leq 4 \text{ km/h} \\ 35v + 25, & 4 \text{ km/h} < v \end{cases} \quad (4)$$

여기에서, v 는 거주자의 추정된 속도, M 은 추정된 신체 활동량이다. 예로 즉, 이동 속도가 3.5 km/h인 경우 153.75 W/m²로 추정된다.

그림 6은 위치기반 신체 활동량 추정 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다. 먼저, ZigBee 위치인식 시스템으로부터 수신된 센싱 정보를 이용하여 빌딩 거주자의 위치를 계산한다. 그리고 나서, 주기적으로 위치 정보와 시간 정보를 이용하여 이동 시간, 이동 거리, 이동 속도를 계산한다. 이렇게 추정된 이동 속도는 위치 인식 시스템의 위치 인식 오차가 포함되어 있기 때문에, 거주자가 일정한 속도를 유지한다 하더라도 추정된 이동 속도는 편차를 가지게 된다. 따라서, 직전 k 개의

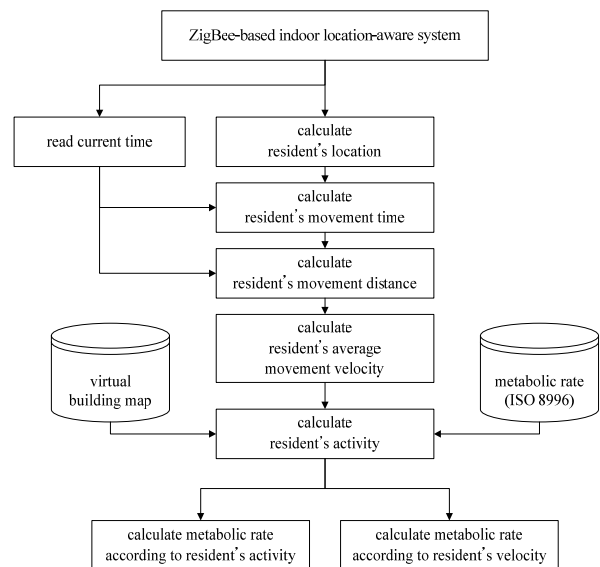


그림 6. ZigBee 기반 신체활동량 추정 알고리즘.

Fig. 6. ZigBee-based metabolic rate estimation algorithm.

이동 속도를 이동 평균(moving average)하여 평균 이동 속도를 계산함으로써 위치 인식 오차를 줄일 필요가 있다. 거주자의 위치와 이동성이 추정되고 나면 가상 빌딩 맵을 이용하여 거주자의 행동이 사무작업이나 회의 등과 같은 특정 활동인지 아니면 특정 활동으로 판단하지 못하고 단지 이동 속도만을 고려해야 되는지를 판단한다. 마지막으로 ISO 8996에 기반한 신체 활동량 추정 방법을 이용하여 거주자의 특정 활동이나 이동 속도에 따라 신체 활동량이 결정된다[10].

2. 예상온열감(PMV: Predicted Mean Vote)

인간이 느끼는 열적 쾌적감이나 불쾌감의 정도는 개인마다 다르며, 추위나 더위에 대한 감각도 다소 차이가 있다. 인간이 느끼는 열적 쾌적 상태란 열에 의해 거주자가 스트레스나 긴장감을 받지 않는 환경을 의미하며 인간이 열적인 상태에서 느끼는 쾌적 정도를 열쾌적감이라고 한다. 온열 환경을 평가하는 지표는 여러 가지가 있으나 덴마크의 Fanger는 1,300여명의 피실험자를 대상으로 하여 활동량(metabolic rate), 기온(air temperature), 기류(air velocity), 습도(humidity), 수증기 분압(water vapour partial pressure), 평균 복사온도(mean radiant temperature), 착의량(clothing insulation) 등을 측정하고 정리하여 예상온열감(PMV: Predicted Mean Vote)과 예상불만족도(PPD: Predicted Percentage Dissatisfied)를 제안하였다. 이렇게 정리된 PMV 지표는 -3(cold), -2(cool), -1(slightly cool), 0(neutral), +1(slightly warm), +2(warm), +3(hot)와 같이 7단계로 나누어 표시하였다[11].

열적 쾌적감과 불만족은 열환경에 대한 만족 또는 불만을 나타내는 것으로서 불만족은 인간의 몸이 덥거나 추울 때 느끼게 되며 쾌적감 한계는 PMV와 PPD 지표에 의해 표현될 수 있다. ISO standard 7730에는 재실자의 최소 80% 이상을 만족시킬 수 있는 권장 쾌적 열환경 조건을 제시되어 있다. 쾌적 열환경 조건은 사람이 거주하는 공간을 대상으로 PPD를 10% 이하(-0.5 < PMV < +0.5)로 할 것을 권장한다[12].

PMV 지표 계산은 식 (6), (7), (8)을 통해 활동량, 착의량, 온도, 평균 복사온도, 기류속도, 습도 등의 온열환경 요소를 계산하고 이를 바탕으로 식 (5)과 같이 계산할 수 있다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 0.305 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c(t_{cl} - t_a)\}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c(t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \text{ for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_{ar}}$$

$$= 12.1\sqrt{V_{ar}} \text{ for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_{ar}}$$

$$f_{cl} = 1.00 + 1.290I_{cl} \text{ for } I_{cl} < 0.078m^2 \text{ } ^\circ C/W$$

$$= 1.05 + 0.645I_{cl} \text{ for } I_{cl} > 0.078m^2 \text{ } ^\circ C/W$$

M: 활동량(단위: 인체의 표면에서의 W/m², met)

W: 외부 일(W/m²)

I_{cl}: 의복의 단열 값(m²·K/W, clo)

t_a: 공기 온도(°C)

t_r: 평균 복사온도(°C)

V_{ar}: 상대 기류속도(m/s)

p_a: 수증기 분압(Pa)

h_c: 대류 열전달 계수(W/m²·K)

t_{cl}: 의복의 표면온도(°C)

신체활동량(metabolic rate)은 인간의 열조절을 평가하는데 필요한 대사 발열을 측정하기 위해 필요하다. 일반적으로 대사량은 음식물의 소화와 근육 운동에 의해 인체에서 생산되는 열의 양을 의미한다. 대사량 1 met은 쾌적한 환경에서 의자에 앉아 휴식을 취하고 있는 성인 남자의 신체 표면적 1 m²에서의 활동량을 말하며, 58 W/m² 만큼에 해당한다. 거주자의 활동량을 측정하는 방법으로는 활동시의 실질적 산소 소비량을 측정하거나 심박동수를 측정하는 방법 등이 있다. 이러한 방법들을 실시간으로 측정하기는 어려움이 있다. 그래서 ISO 8996에서는 크게 직업과 활동량의 종류에 따라 활동량을 분류해 두었다. 이것은 각 작업의 종류, 각 작업의 지속시간, 보행 거리, 상승 높이, 처리 중량, 수행된 행동 등의 요인들을 고려하여 작업 주기의 평균 활동량을 구할 수 있게 하였다. 전문적인 수준의 측정 자료에 기초한 활동량의 계산을 대신하여 ISO standard 8996에서 관찰에 의해 제시한 특정 활동에 대한 대사량 일부를 표 1에 나타냈다[8].

표 1. 활동별 신체 활동량 (ISO 8996).
Table 1. Metabolic rates of different activities (ISO 8996).

Physical activity	Metabolic rate	
	W/m ²	met
Reclining	46	0.8
Seated, relaxed	58	1.0
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)	70	1.2
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)	95	1.6
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work, machine work)	115	20
Work on machine tool		
Light(adjusting, assembling)	100	1.7
Medium(loading)	140	2.4
Heavy	210	3.6
Work with a hand tool		
Light(light polishing)	100	1.7
Medium(polishing)	160	2.8
Walking on level ground:		
2 km/h	110	1.9
3 km/h	140	2.4
4 km/h	165	2.8

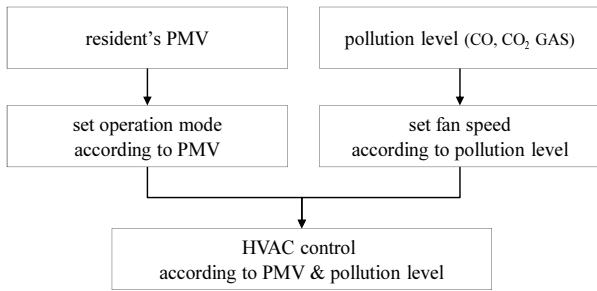


그림 7. 인간 적응형 HVAC 제어 시스템.
Fig. 7. Flowchart of human adaptive HVAC.

3. PMV 기반 HVAC 통합 제어 알고리즘

본 논문에서는 거주자의 PMV와 실내 환경정보를 이용하여 HVAC 통합 시스템을 제어함으로써 거주자에게 쾌적한 환경과 효율적인 시스템 관리 시스템을 제안하고자 한다. PMV 지표는 실내 온도, 습도, 기류 속도와 같은 실내 환경 정보와 거주자의 활동량, 착의량 등의 거주자 개인 정보를 종합적으로 고려하여 거주자의 열적 쾌적함에 따라 나타낸 값이다. 전통적인 냉난방기는 거주자의 신체 활동과는 무관하게 미리 설정된 온도에 맞춰 실내 온도를 제어하는 시스템이지만 PMV 기반 HVAC 제어 시스템은 거주자가 속해 있는 실내 상황과 거주자의 활동 정도에 따라 거주자가 실제 느끼는 온열감에 따라 쾌적함을 제어할 수 있는 시스템이다.

그림 7은 ZigBee 거주자 위치 기반 인간 적응형 HVAC 제어 시스템의 플로우차트를 나타내고 있다. 먼저, ZigBee 위치 인식 시스템으로부터 주기적으로 수신한 거주자의 위치와 실내 온도, 습도, 신체활동량을 정보를 이용하여 거주자 PMV를 추정한다. 거주자 위치를 이용한 PMV 기반 인간 적응형 HVAC는 거주자의 위치와 PMV를 분석하여 능동적으로 냉난방 서비스를 제공 한다. 일반적인 냉난방기의 운전모드와 풍속은 거주자의 위치와 PMV는 고려하지 않고, 실내 온도와 설정온도에 맞춰 제어된다. 따라서, 인간 적응형 냉난방기의 난방, 냉방 혹은 송풍의 운전 모드는 거주자의 PMV를 이용하여 설정하고, 풍속은 PMV와 거주자와 냉난방기 사이의 거리를 계산하여 능동적으로 조절하여야 한다.

다음으로 실내 환경센서(CO, CO₂, GAS)를 이용하여 실내 환경 오염도 레벨에 따라 실내 환경 공기오염도를 판단한다. 실내 오염도가 일정 수준 초과하면, 환풍기와 공기청정기를 가동하여 실내공기를 정화한다. 환풍기는 오염도 레벨이 일정 수준 이하가 될 때까지 동작하고, 공기청정기에서는 오염도 레벨에 따라서 풍량을 제어한다.

IV. ZigBee 위치기반 PMV를 이용한 HVAC 제어시스템의 성능평가

인간 적응형 HVAC 시스템의 성능평가를 위하여, 실내 실험장치를 구현하고 거주자 위치인식 거주자 위치에 따른 신체활동량 변화와 PMV 변화를 실시간으로 관찰하였다. 먼저, 성능평가를 위해 그림 8과 같이 12.77m×8.77m (가로×세로)의 사무실 공간을 이용하였다. 테스트베드의 천장에는 실내 거주자의 위치를 파악하기 위하여 9개의 ZigBee 고정노드를 설치하였고, 그 중 2개는 실내 환경정보를 수집하기 위하여 온

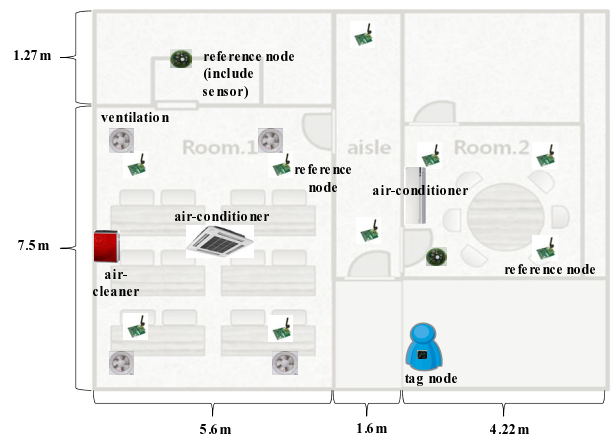


그림 8. ZigBee 위치기반 인간적응형 냉방기 실험 환경.
Fig. 8. Experimental test-bed of human adaptive HVAC.

· 습도, CO, CO₂, GAS 센서가 부착되어 있다. 또한, HVAC 시스템의 성능을 평가하기 위해서 각 방의 실내 온도를 제어할 수 있는 에어컨, 공기의 질을 높여주는 공기청정기와 환풍기가 있다. HVAC 시스템을 제어하기 위하여 에어컨, 공기청정기, 환풍기에는 각각 제어 모듈이 부착되어 있다.

ZigBee 위치인식 시스템을 위한 고정노드와 이동노드는 TI사의 cc2431을 사용하였으며, 위치 정보를 모니터링 하기 위한 모니터링 노드는TI 사의 ZigBee transceiver인 cc2420과 ATmel사의 ATmega128을 사용하여 H/W 모듈을 제작하였다. 온·습도 센서는 SENSIRION사의 SHT15, CO 센서는 SENKO사의 SS1128, 가스 센서는 SP3-AQ2로 VOCS, HCHO, H₂S, NH₃, ethanol 등의 가스를 검출할 수 있다.

인간 적응형 HVAC 시스템의 성능을 평가하기 위해, 우선 ZigBee 위치인식 시스템의 위치인식 정밀도 항상 알고리즘을 평가하였다. ZigBee 위치인식 시스템의 기준위치 설정을 위해 테스트 베드의 천정에 총 5개의 고정노드(reference node)를 설

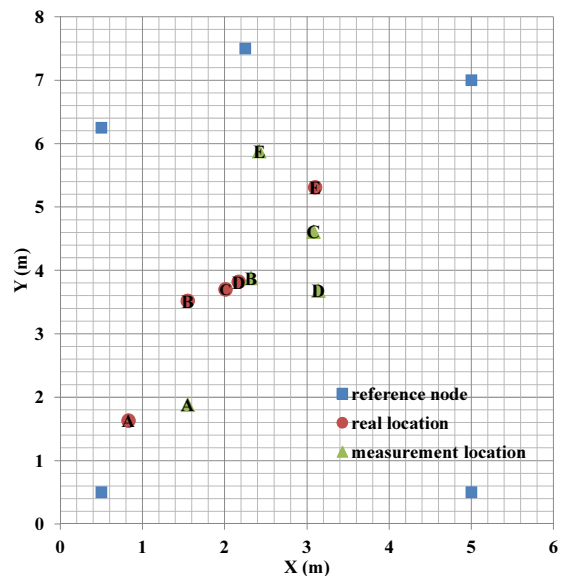


그림 9. ZigBee 이동노드의 실제위치와 측정위치.
Fig. 9. Real location and measurement location of ZigBee mobile node.

표 2. ZigBee 위치인식 시스템 성능평가 결과.
Table 2. Performance evaluation of ZigBee location based system.

No.	real location (m)		measurement location (m)		error (m)
	X_r	Y_r	X_m	Y_m	
1	3.14	3.68	2.17	3.82	0.76
2	2.42	5.88	3.10	5.31	0.85
3	3.08	4.61	2.01	3.70	1.40
4	1.55	1.88	0.83	1.63	0.98
5	2.32	3.88	1.55	3.52	0.89
average (m)					0.98

치하였다. 그리고 임의의 5곳을 설정하여 그림 9와 같이 이동 노드(real location)를 배치하여 위치를 측정하였다. 표 2는 실제위치와 측정위치(measurement location)의 오차(error), 오차 평균을 정리한 것으로 최소 위치 오차는 0.76 m, 최대 오차는 1.4 m, 평균은 0.98 m로 측정됨을 확인할 수 있었다. 이는 Bayesian 추론 기반의 위치인식 시스템에서 계측된 최소 오차 1.30 m, 최대 오차 2.14 m의 결과 보다 향상된 것임을 알 수 있다[13].

그리고 본 논문에서 제안하는 인간 적응형 HVAC 시스템의 성능을 확인하기 위하여, 거주자가 사무실에서 간단한 hand tool을 이용하여 공구 작업을 수행할 때 거주자 PMV 변화에 따른 실내 온도변화를 관찰하였다. ISO 7730에서 제안하는 열적 쾌적 상태인 $-0.5 < PMV < +0.5$ 를 유지하기 위하여, PMV 지표 값에 따라 냉난방기의 냉방(cooling), 송풍(ventilation), 난방(heating)의 운전 모드를 설정한다. 예로, 거주자의 PMV가 -0.5 이하로 산출되면, 난방 모드를 실행하여 실내 온도를 올려 쾌적상태가 될 수 있도록 하고, +0.5 이상

이면 냉방 모드를 실행하여 실내 온도를 내려 쾌적 상태로 만들고자 한다. 또한 제어를 통하여 PMV가 쾌적 상태인 $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ 라면 냉난방기를 송풍 모드를 가동하거나 off 한다.

그림 10은 거주자가 개인책상에서 전자모듈 설계 작업공간으로 이동 후, 전자모듈 납 인두작업을 수행하는 경우를 나타낸다. 그림 10(a)는 거주자가 인두기를 이용한 activity의 경우 추정되는 신체활동량과 PMV를 나타내었고 그림 10(b)는 PMV에 따른 온도 변화를 나타내었다. 초기 데이터는 거주자가 작업대로 이동을 할 때 이동속도를 이용하여 추정되는 신체활동량과 PMV이다. 그리고 거주자가 작업대의 위치에서 다른 곳으로 이동을 하는 경우를 고려하여, 1분 이상 위치하게 되면 그 위치에 해당하는 대표 행동을 hand tool을 이용하는 activity로 판단하고 신체활동량을 160 W/m^2 로 추정됨을 확인할 수 있다. 또한 거주자의 쾌적한 작업환경을 위해 PMV 지수에 따라 냉난방기가 제어되어 실내온도가 변화됨을 확인할 수 있었다.

이러한 결과로 볼 때, 거주자 위치 인식 기반 신체 활동량 추정 방법을 이용한 신체 활동량 추정은 위치기반 인간 적응형 냉방기에게 정확한 거주자의 정보를 제공함으로써, 보다 더 인간 친화적인 서비스를 제공하게 할 수 있을 것이다.

V. 요약 및 결론

본 논문은 빌딩 내 거주자의 위치와 작업패턴, 활동 상태 등을 스스로 파악하여 능동적으로 거주자에게 가장 쾌적한 사무 환경을 제공해 줄 수 있는 ZigBee 위치기반 HVAC 제어 시스템을 제안하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 위치기반 인간 적응형 HVAC 시스템의 구조를 제안하였으며, ZigBee 기반 거주자 위치 인식 시스템을 이용하여 실시간으로 거주자의 신체 활동량을 추정할 수 있는 거주자 위치기반 신체 활동량 추정 방법을 제안하였다. 또한 인간적응형

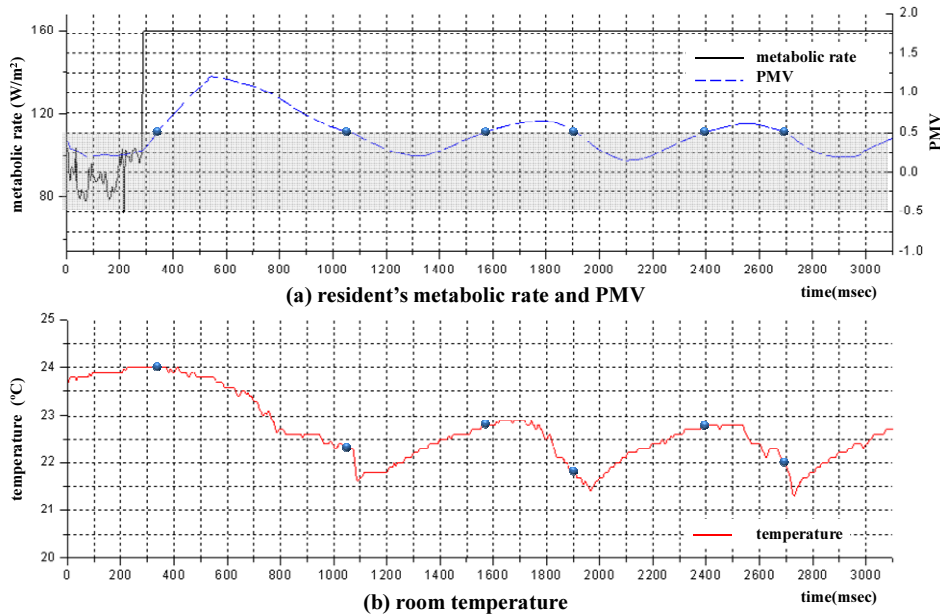


그림 10. Hand tool을 작업의 거주자 신체활동량, PMV 실내온도.
Fig. 10. Resident's metabolic rate, PMV and room temperature on hand tool.

HVAC 시스템은 거주자의 신체활동량을 이용하여 실시간으로 PMV를 계산할 수 있었으며, PMV 지수에 따라 실내온도가 실시간으로 제어되고 있음을 확인할 수 있었다. 전통적인 냉난방기는 거주자의 신체활동량을 고려하지 않고, 실내 온도만을 일정하게 제어하지만, 인간적응형 HVAC 시스템은 거주자의 주변 상황정보(온도, 습도, 시간 등)와 개인적 정보(신체활동량, 착의량, 나이 등)를 이용하여 능동적으로 거주자 중심의 쾌적한 사무환경을 만들 수 있음을 확인 할 수 있었다.

그러나 본 논문에서는 ZigBee 위치기반 인간 적응형 HVAC 시스템의 적용 가능성을 파악하기 위한 기초 연구로서, 1인 시스템에 국한하였다. 따라서 향후에는 다인 거주자 위치 인식기 시스템의 개발이 필요할 것이다. 또한 거주자의 불편을 최소화하면서 시스템을 제어할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

[1] T. K. Kim, H. J. Chang, and G. T. Park, "Implementation of embedded web server and XML web services for intelligent building system," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 13, no. 12, pp. 1167-1172, Dec. 2007.

[2] K. H. Park, N. J. Choi, W. S. Yang, H. Y. Lee, S. K. Lee, C. A. Choi, and J. D. Kim, "Present state and prospect of sensor technologies for smart building," *ETRI, Electronics and Telecommunication Trends (in Korean)*, vol. 24, no. 6, pp. 1-10, Dec. 2009.

[3] T. H. Kim, G. L. Seo, J. Y. Lee, and W. C. Lee, "Integrated Fire Monitoring System Based on Wireless Multi-Hop Sensor Network and Mobile Robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 2, pp. 114-119, Feb. 2010.

[4] K. H. Um and S. Y. Yoo, "A study for designing of intelligent lighting control LED apparatus," *Journal of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication (in Korean)*, vol. 5, no. 8, pp. 221-227, Oct. 2008.

[5] X. Gu, H. Li, L. Zhao, and H. Wang, "Adaptive PID control of indoor air quality for an air-conditioned room," *2008 ICICTA (International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation)*, pp. 289-293, 2008.

[6] E. Sato, A. Nakajima, T. Yamaguchi, and F. Harashima, "Humatronics (1) - natural interaction between human and networked robot using human motion recognition," *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 930-935, 2005.

[7] N. Kubota and K. Nishida, "Perceptual control based on prediction for natural communication of a partner robot," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 866-877, 2007.

[8] ISO 8996:2004, Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate.

[9] KS A ISO 8996:2005, Ergonomics of the thermal environment- Determination of metabolic rate.

[10] H. H. Kim, S. Lee, and K. C. Lee, "Estimation of metabolic rate estimation for location-based human adaptive air-conditioner in smart home," *Journal of Institute of Control, Robotics and*

Systems (in Korean), vol. 16, no. 1, pp. 83-89, Jan. 2010.

[11] P. O. Fanger, *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*, McGraw-Hill, 1972.

[12] ISO 7730:2005, Ergonomics of the thermal environment- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

[13] A. S. I. Noh and W. J. Lee, "Accuracy evaluation of ZigBee's indoor localization algorithm," *Review of Korean Society for Internet Information (in Korean)*, vol. 11, no. 1, pp. 27-33, Feb. 2010.



박 은 주

2010년 부경대학교 제어계측공학과(공학사). 2012년 현재 부산대학교 지능기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 무선 네트워크, 홈 네트워크, human oriented mechanical system.



이 석

1984년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 펜실바니아 주립대학교(공학석사). 1990년 펜실바니아 주립대학교(공학박사). 1990년~1993년 신시내티 대학교 기계공학과 조교수. 1993년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 홈 네트워크, 차량용 네트워크, 산업용 네트워크.



이 경 창

1996년 부산대학교 생산기계공학과(공학사). 1998년 부산대학교 지능기계공학과(공학석사). 2003년 부산대학교 지능기계공학과(공학박사). 1998년~2003년 기계공학연구정보센터 전임 연구원. 2003년~2005년 울산대학교 네트워크기반 자동화 연구센터 전임연구원. 2005년~현재 부경대학교 제어계측공학과 부교수. 관심분야는 산업용 이더넷, 차량용 네트워크, 홈 네트워크.



김 현 희

2000년 동명대학교 로봇시스템공학과(공학사). 2003년 부산대학교 지능기계공학과(공학석사). 2010년 부산대학교 지능기계공학과(공학박사). 2010년~2012년 부경대학교 LED해양 융합기술 연구센터 선임연구원. 2012년 현재 부경대학교 공학연구원 산업과학기술연구소 선임연구원. 관심분야는 홈 네트워크, human oriented mechanical system, 산업용 네트워크.