

스마트 쾌적 알고리즘을 적용한 실내 쾌적 제어에 대한 연구

A Study on the Indoor Comfort Control By Smart Comfort Algorithm

윤 석 암*, 이 정 일**

Seok-Am Yoon*, Jeong-Il Lee**

Abstract

Thermal comfort is one of the fundamental aspects of indoor environmental quality and it is strongly related to occupant satisfaction and energy used in building.

In this paper, we propose a smart comfort algorithm that saves energy and provides a pleasant and comfortable environment for workers by the indoor comfort conditions (Predictive Mean Vote) detection and controlling the temperature and humidity, air flow. Simulation results, heating and cooling control of the thermal comfort control can be compared with the existing general air conditioners, reducing the power of 0.5kW and indoor comfort can be maintained. Also, it showed a 49.2% improvement in the lighting by the lighting control algorithm.

요 약

열 쾌적 제어는 실내 환경의 질을 나타내는 기본 요소로서 건물에서 사용되는 에너지와 거주자의 만족도에 매우 밀접하게 연관되어 있다. 본 논문에서는 실내의 쾌적 상태(Predictive Mean Vote)를 검출하고, 목표 소비 전력 내에서 냉난방 온도, 습도, 풍량을 제어함으로써 에너지를 절감하고 근무자에게 쾌적한 환경을 제공할 수 있는 스마트 쾌적 제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 열 쾌적 제어에 의한 냉난방 제어는 기존의 일반 냉난방기에 비해서 실내의 쾌적도는 그대로 유지한 상태에서 0.5kW의 전력을 절감할 수 있고, 조명 제어 알고리즘이 적용된 조명 제어에 의해서 49.2%의 조명 개선 효과가 이루어짐을 알 수 있었다. 시뮬레이션을 통해서 검증된 쾌적 제어 알고리즘을 기존의 냉난방기에 적용할 경우 쾌적도는 유지하고 에너지는 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

Key words : Thermal Comfort, Predictive Mean Vote, Temperature, Relative Humidity, Dimming

* Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Songwon University

★ Corresponding author

e-mail : Younsuk@songwon.ac.kr +82-62-360-5940

※ Acknowledgment

Manuscript received Dec 24, 2015 ; revised Dec 28, 2015 ; accepted Dec 28, 2015

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.

I. 서론

국내에서 소비되는 에너지의 해외의존도는 2012년 기준 97%에 이르고, 이중 국내 건물의 에너지 소비량은 국가에너지 총 소비량의 25% 내외를 차지하고 있으며, 건축 후 15년 이상이 경과되어 에너지의 성능 개선이 필요한 건물이 전체 건물의 74%에 이르기 때문에 에너지수요를 효과적으로 감축하기 위해서는 건물의 에너지를 절감할 수 있는 시스템 도입이 필요하다^[1].

특히, 거주용 및 비주거용 건물의 에너지의 50~60%는 실내 열환경(냉난방, 조명)의 조성에 사용되기 때문에 이에 대한 에너지를 절감하기 위하여 수요전력제어기가 냉난방 시스템에 적용되고 있다. 그러나 현재 대부분의 에너지 절감을 위한 냉난방 시스템은 실내 쾌적 상태와는 상관없이 실내 온도만을 검출하여 냉난방 온도를 제어 하고 목표 소비전력을 만족하기 위하여 운영되기 때문에 실내 쾌적도를 확보하기 어려우며, 거주자의 능률 저하의 원인이 되고 있다.

따라서 에너지를 절감하면서도 실내 거주자의 만족감을 확보할 수 있는 냉난방 시스템에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 건물에서 사용되는 에너지를 절감하고 실내 거주자의 쾌적도를 확보하기 위하여 스마트 쾌적 알고리즘을 제안하고 실내 쾌적 제

어를 개발하였으며, 실제 운전을 통해서 타당성을 검토하였다.

II. 본론

1. 개요

본 논문에서 제안된 스마트 쾌적 제어 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있으며, 실내의 쾌적 상태(PMV)를 검출하고, 목표 소비 전력 내에서 냉난방 온도, 습도, 풍량을 제어함으로써 에너지를 절감하고 근무자에게 쾌적한 환경을 제공할 수 있도록 한다. 센서부, 통신부, MCU가 통합하여 천정 중앙에 개별적으로 설치(20평을 기준으로 1대)하도록 하고, 쾌적 제어 알고리즘에 의한 냉난방 제어를 통해 실내 환경을 쾌적하게 유지하도록 한다. 열쾌적 제어를 통해서 정상운전 상태에서는 인체가 쾌적을 느끼는 범위(PMV: -0.5~+0.5)에서 동작하고, 수요전력제어 운전 상태에서는 쾌적 범위에 수렴하도록 냉난방기의 온도와 습도를 제어한다. 또한 실외 자연광에 따라 실내의 인공조명을 조정하여 실내의 조명을 쾌적하게 유지하고 과잉 조명에 따른 에너지를 절감 한다.

2. 조명 쾌적 제어

대부분의 조명기구들은 보수율(기준 조도 대비 120~130%)을 적용하여 설치되기 때문에 기준

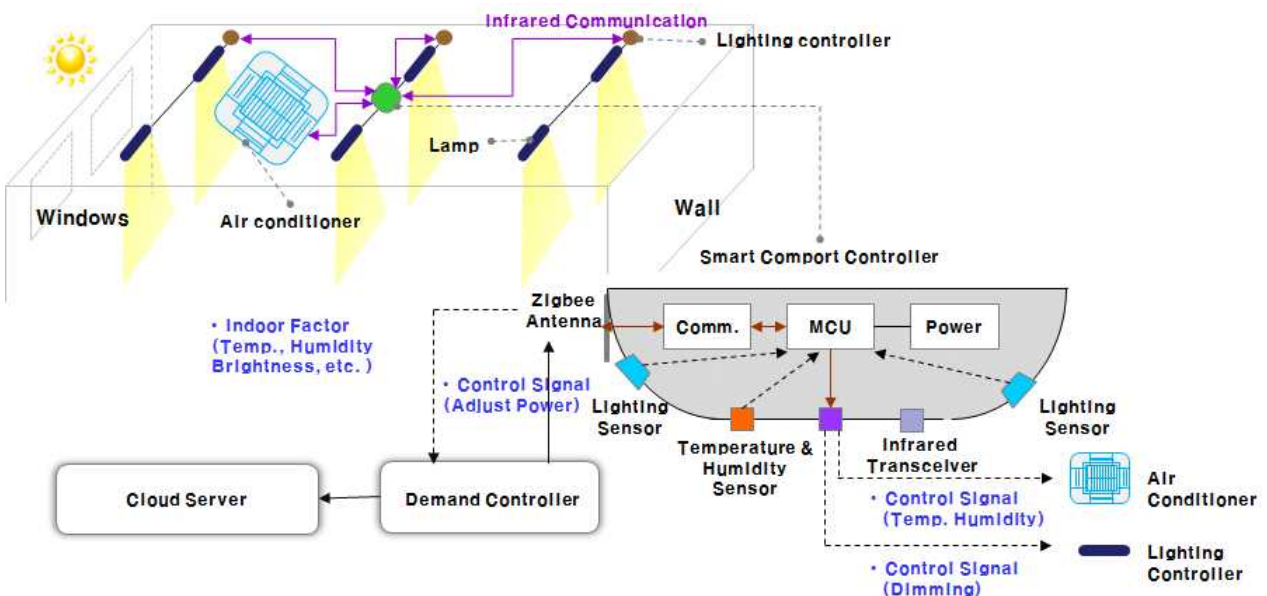


Fig. 1. Block diagram of smart comfort control system

그림 1. 스마트 쾌적 제어 시스템 블록도

조도 대비 20~30%의 에너지가 낭비되고 있기 때문에 오버스펙으로 인한 에너지 손실이 발생하고, 특히 창문에 가까울수록 기준 권장 조도를 초과하여 에너지 손실은 증가한다.

조도는 표면의 단위 면적에 비추는 빛의 양 또는 광속 기호로 E, 단위로는 lx로 나타낸다.

1lx는 1m²의 단위 면적에 1lm의 광속이 균일하게 비취질 때를 말한다. 광속이 표면에 도달하는 방향에 따라서 조도는 달라지고, 거리가 멀어질수록 단위 면적을 지나가는 선의 개수 또한 줄어들게 된다. 이때 줄어드는 비율은 거리의 제곱에 반비례한다^[2].

조도 측정을 간략화 하기 위하여 식(1)과 같은 빛의 역제곱 법칙을 적용할 수 있다.

$$E = \frac{F_o}{S_o} = \frac{4\pi I_o}{4\pi R^2} = \frac{I_o}{R^2} [lx] \quad (1)$$

여기에서, R은 광원과의 거리, I_o는 광도를 나타낸다. 즉, 2m만큼 떨어진 광원의 밝기는 I_o의 1/4이 된다.

본 논문에서는 빛의 역 제곱 법칙을 적용하여 그림 2와 같이 조명 제어 알고리즘을 구성하였다. 창과 스마트 쾌적 제어기의 거리, 각 조명 제어기의 거리를 입력하게 되면 창으로 부터 조사되는 자연광의 조도를 측정후 각 조명 제어기에서의 자연광에 의한 조도가 계산된다.

자연광이 표준 조도를 만족하면 조명 제어기의 디밍 제어는 0이 되어 인공광원을 형성하지 않고, 자연광이 표준 조도를 만족하지 못한다면 조명 제어기를 통해서 부족한 조도를 보충하여 표준 조도를 만족하도록 한다.

3. 열 쾌적 제어

냉난방을 위한 온도 제어에는 많은 에너지가 소비되지만 온도와 습도, 풍량을 같이 제어하게 되면 에너지를 절감 할 수 있을 뿐만 아니라 거주자의 만족도를 향상 시킬 수 있다.

예를 들어, 냉방 실내 온도 1℃ 내리면 9%의 에너지를 절약할 수 있고, 습도 5%를 낮추면 체감 온도는 1도씨 내려간다. 하루 3시간 에어컨(18평형 모델 기준) 운용에 따른 요금(누진세 미적용)으로 환산하면 약 40%의 에너지를 절감 할 수 있다. 본 논문에서는 인체의 열 평행에 기초한 PMV(Predictive Mean Vote) 지표를 통해서 냉

난방기를 제어하도록 그림 3과 같이 열 쾌적도 산출 요소를 산정하였다.

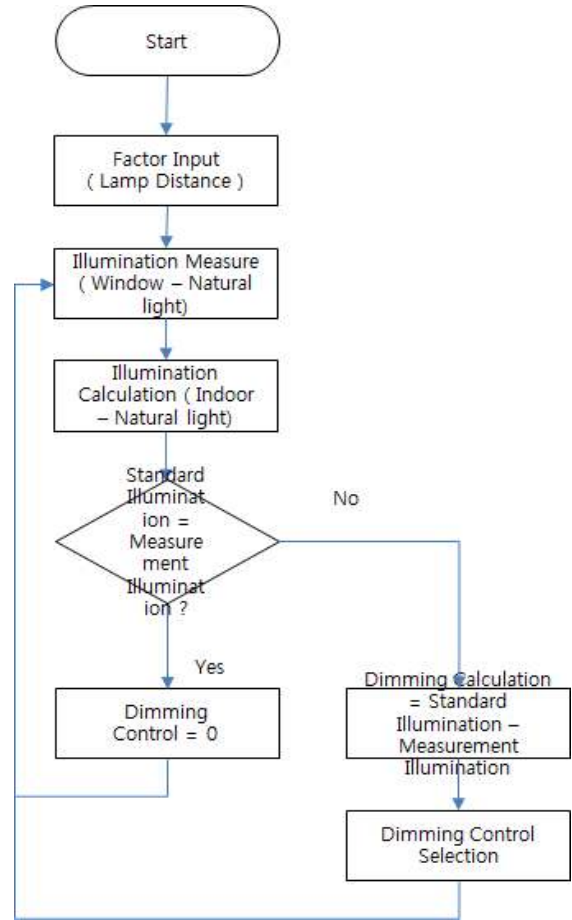


Fig. 2. Lighting control algorithm
그림 2. 조명제어 알고리즘

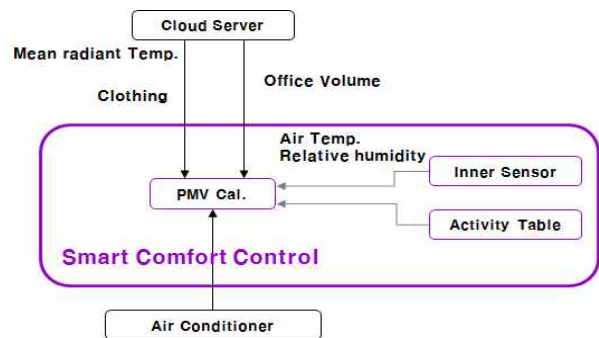


Fig. 3. Thermal comfort calculation factor
그림 3. 열쾌적도 산출 요소

PMV는 다음의 7단계 온열감 척도에 대한 많은 사람들의 의사 표시의 평균치를 예측하는 것으로 다음과 같이 표현된다^[3].

- +3 : hot
- +2 : warm
- +1 : slightly warm
- 0 : neutral
- 1 : slightly cool
- 2 : cool
- 3 : cold

PMV 지표는 인체의 열평형에 기초하고 있고, 인체 내 열생산량이 주위 환경으로의 열손실량과 일치하면 열평형 상태에 있음을 뜻하며, 인체 열 조절 시스템의 생리적 반응을 1,300명 이상의 사람으로부터 수집된 온열감 의사 표시와 통계학적으로 연관시킨 것이다.

건구온도와 상대 습도는 내부 온습도 센서를 통해서 측정되고, 착의량은 계절에 따라서 변화하도록 하며(봄가을(0.72), 여름(0.6), 겨울(1.0)), 활동량은 활동량테이블 중에서 일반사무실에 해당하는 1.1값으로 처리 된다.

평균복사온도는 실외온도와 실내 온도의 평균 값을 활용하여 계산되며 PMV는 식 (2)와 같이 표현된다^{[4]-[7]}.

$$\begin{aligned}
 a &= (0.028 + (0.3033 * \exp(-0.036 * M))); \\
 b &= (M - W) - (3.05 * (5.733 - (0.000699 * (M - W)) - s(5))); \\
 c &= (0.42 * ((M - W) - 58.15)) + (0.0173 * M * (5.867 - s(5))) \\
 &+ (0.0014 * M * (34 - s(2))); \\
 d &= (((3.96 * 10^{-8}) * s(1) * ((s(6) + 273)^4) - ((s(3) + 273)^4)) \\
 &+ (s(1) * hc * (s(6) - s(2))))); \\
 pmv &= a * (b - c - d); \tag{2}
 \end{aligned}$$

여기에서,

M : 활동량

M = 46 ~ 232 W/m² (0.8 ~ 4 met)

RH : 상대습도

W : 외부일

대부분의 활동에서 0

Icl : 착의량

Icl = 0 ~ 0.310 m²°C/W (0 ~ 2 clo)

S(5): 수증기분압 Pa = 0 ~ 2700 Pa

$$sPa = 6.112 * \exp((17.67 * S(2)) / (S(2) + 243.5))$$

sPa : 포화수증기압

$$S(5) = RH * sPa / 100$$

S(2): 공기온도 ta = 10 ~ 30°C

S(1): 나체일 경우 인체표면적에 대한 착의시 인체표면적 비율 fcl

IF Icl u .078 THEN fcl = 1 + 1.29 * Icl
 ELSE fcl = 1.05 + 0.645 * icl : clothing area factor

S(6): 의복표면온도 tcl = 100 * XN - 273

S(3): 평균복사온도 tr = 10 ~ 40°C

s(4): 기류 var = 0 ~ 1 m/s

hc : 대류열전달계수

그림 4는 PMV를 이용한 열 쾌적 제어 알고리즘을 나타내고 있다.

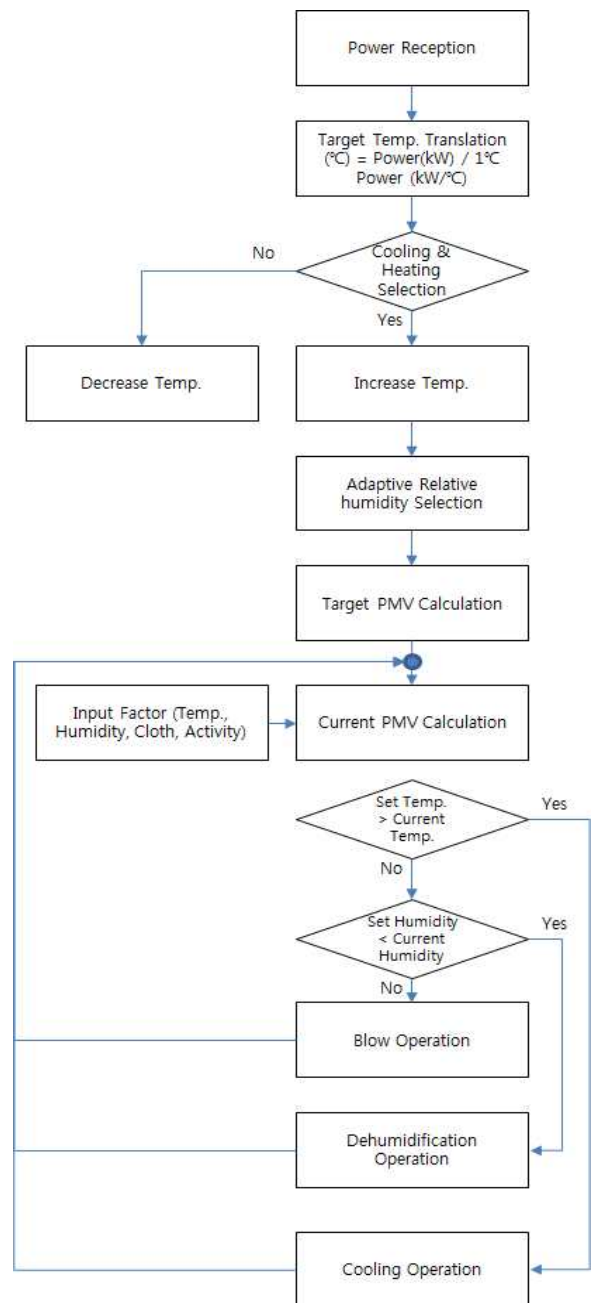


Fig. 4. Thermal comfort control algorithm

그림 4. 열 쾌적 제어 알고리즘

목표전력이 수신되면 1℃에 대한 전력량을 목표 온도로 환산하고 현재 냉방모드인지 난방모드인지를 확인한 후 난방모드이면 목표온도만큼 온도를 내려주고, 냉방모드이면 목표온도만큼 온도를 증가시킨다.

목표온도가 설정되면 목표온도에 적절한 적정 상대습도를 표 1과 같은 적정 상대습도 테이블에서 선정하고 목표 PMV를 계산하게 된다.

현재 PMV가 목표 PMV에 도달하도록 온도와 습도를 조절하도록 각각 냉방운전, 제습운전, 송풍운전으로 개별동작하게 된다.

Table. 1. Adaptive relative humidity

표 1. 적정 상대 습도

Temp. (℃)	Saturated water vapor (g/m ³)	Average water vapor (g)	Adaptive relative humidity (RH%)	Relative humidity Result (RH%)
30	30.358	9.2	30%	40%
29	28.756	9.2	32%	
28	27.221	9.2	34%	
27	25.76	9.2	36%	
26	24.366	9.2	38%	
25	23.038	9.2	40%	
24	21.773	9.2	42%	42%
23	20.568	9.2	45%	45%
22	19.421	9.2	47%	47%
21	18.329	9.2	50%	50%
20	17.291	9.2	53%	53%
19	16.262	9.2	57%	57%
18	15.366	9.2	60%	60%
17	14.475	9.2	64%	64%
16	13.629	9.2	68%	68%
15	12.827	9.2	72%	70%

공기중 평균 수증기량과 포화수증기량으로 부터 온도별 적정 상대습도는 계산된다.

$$\text{적정 상대 습도} = \frac{\text{공기중 평균 수증기량(g)}}{\text{포화수증기량(g/m}^3\text{)}} \quad (3)$$

식(3)으로부터 계산된 적정 상대 습도 중 인체가 건강함을 느끼는 습도인 40%~ 70%이내의 상대습도 값만 선택하면, 40%미만은 40%로 선택하고, 70%이상은 70%으로 선정된다.

그림 5는 1℃에 대한 전력을 구하는 과정을 나타내고 있다. 먼저 사무실내의 공기 질량을 구한 후 공기비열을 이용해 1℃에 대한 열량으로 환산하게 된다.

이후 열량-전력 환산계수인 860kcal/kW를 이용해서 1℃에 대한 전력량으로 계산된다.

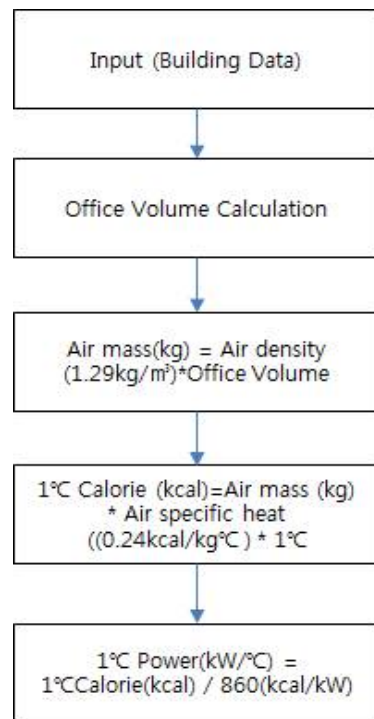


Fig. 5. Power calculation of 1℃

그림 5. 1℃에 대한 전력량 계산

4. 시뮬레이션

열 쾌적 제어에 의한 에너지 절감과 쾌적도 제어를 확인하기 위하여 C언어를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 서울지역 8월에 대한 기상청 기상예보를 통해 평균 온도는 27.7℃, 상대습도는 RH69%를 선정하고, 사무실 공간은 1,150m³로 선정하였다.

실내 열환경에 대한 ISO 기준으로부터 착의량은 여름철 0.6으로 선정하고, 활동량은 일반사무실로 1.1을 적용하였다^{[4]-[7]}.

시뮬레이션 결과 그림 6과 같이 PMV는 0.98로 동일하지만 온도와 습도를 제어하여 온도는 27.7℃에서 28.8℃로 증가시키고, 습도를 69%에서 40%까지 감소시킴을 알 수 있다. 그림 5를 이용하면 공기질량은 1,483kg, 열량은 400.5kcal이 계산되고, 절감된 전력량을 0.5kW로 계산된다.

즉, 인체가 쾌적하게 느끼는 PMV는 유지하면서 에너지를 절감할 수 있음을 나타낸다.

그림 2에서 제시된 조명제어 알고리즘의 효율성을 평가하기 위하여 C언어를 이용해 시뮬레이션을 진행하였다. 사무실의 조명을 3개 구역으로 분리하고 각각의 거리를 1.6m, 4.1m, 6.6m로 설정한 후 창측으로 입사된 자연광의 조도를 900lx로 결정하였다.

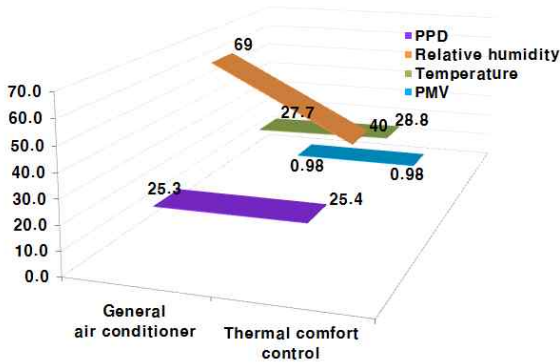


Fig. 6. PMV comparison of the general air conditioner and temperature comfort control

그림 6. 일반 에어컨과 열 쾌적 제어에 대한 PMV 비교

사무실의 표준 조도인 400lx를 유지하기 위한 각 구간별 인공조명의 조도는 다음과 같이 계산된다.

식(1)을 이용한 각 구간별 자연광의 조도는 1구역 900lx, 2구역 137lx, 3구역 53lx으로 계산된다.

식(4)와 식(5)를 이용하여 사무실 표준 조도 400lx를 만족하기 위한 인공조명의 조도는 와 조명 개선효과를 계산하면 표 2와 나타낼 수 있다.

$$\text{총조도} = \text{자연광조도} + \text{인공조명조도} \quad (4)$$

$$\text{조명 개선 효과} = (\text{쾌적 제어시 조도 합} - \text{일반 조명시 조도 합}) / \text{일반 조명시 조도 합} * 100 \quad (5)$$

기존의 조명에 본 논문에서 제안된 조명제어 알고리즘을 적용했을 경우 49.2%의 조명 개선 효과가 발생함을 알 수 있다.

Table. 2. Lighting control simulation result

표 2. 조명제어 시뮬레이션 결과

Zone	Natural light [lx]	Artificial lighting [lx]	total illumination[lx]
1	900	0	900
2	137	263	400
3	53	347	400
Improvements			-49.2%

III 결론

본 논문에서는 실내의 쾌적 상태(PMV)를 검출하고, 목표 소비 전력 내에서 냉난방 온도, 습도, 풍량을 제어함으로써 에너지를 절감하고 근무자에게 쾌적한 환경을 제공할 수 있도록 스마트 쾌적 제어 알고리즘을 제안하였다.

시뮬레이션 결과, 열 쾌적 제어에 의한 냉난방 제어는 기존의 일반 냉난방기에 비해서 실내의 쾌적도는 그대로 유지한 상태에서 0.5kW의 전력을 절감할 수 있고, 조명제어 알고리즘에 의한 조명제어는 49.2%의 조명 개선 효과가 이루어짐을 알 수 있었다.

시뮬레이션을 통해서 검증된 쾌적 제어 알고리즘을 기존의 냉난방기에 적용할 경우 에너지를 절감할 수 있고, 실내의 쾌적도를 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

References

[1] Nam-Chul Seong, Dong-Won Yoon, "An Approach of Indoor thermal Environment Control and Energy Saving Using the PMV Index", *LHI Journal*, 2010.

[2] Ham, Won-Ta, "A Study on Energy Savings Analysis by Controlling LED Lighting", *KSES*, 2012.

[3] *ASHRAE Standard 55-2004*, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

[4] ISO(International Organization for Standard-ization), Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and

Specification of the Conditions for Thermal Comfort, *ISO 7730*, 1984.

[5] *ISO 7243*, Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index (wet bulb globe temperature).

[6] *ISO 7726*, Thermal environments - Instruments and methods for measuring physical quantities.

[7] *ISO 7933*, Hot environments - Analytical determination and interpretation of thermal stress based on the calculation of required sweat rate.

BIOGRAPHY

Seok-Am Yoon (Member)



1987 : BS degree in Computer Engineering, Gwangju University.

1989 : MS degree in Industrial Engineering, Chosun University.

2001 : PhD degree in Electrical & Electronic Engineering, Dongshin

University.

1983~2015 : Professor, Songwon University.

Jeong-II Lee (Member)



1996 : BS degree in Computer Engineering, Gwangju University.

1999 : MS degree in Electronic Engineering, Chosun University.

2003 : PhD degree in Electrical & Electronic Engineering, Dongshin

University.

1992~2015 : Professor, Songwon University.