





2019年 02月 碩士學位論文

건물설비시스템 통합제어를 통한 여름철 냉방에너지 절감에 관한 연구

朝鮮大學校大學院

建築工學科(建築工學傳供)

南亨坤



건물설비시스템 통합제어를 통한 여름철 냉방에너지 절감에 관한 연구

Cooling Energy Reduction by Cooperative Systems of Office Buildings in Summer

2019年 02月 25日

朝鮮大學校大學院

建築工學科(建築工學傳供)

南亨坤





건물설비시스템 통합제어를 통한 여름철 냉방에너지 절감에 관한 연구

指導教授 黃泰 然

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2018年 10月

朝鮮大學校大學院

建築工學科(建築工學傳供)

南亨坤





南亨坤의 碩士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校 交手	<u>金</u>	兌	訓	_ (인)
委員	朝鮮大學校 交手	金	亨	基	_ (인)
委員	朝鮮大學校 交手	_ 黃	泰	然	_ (인)

2018年 11月

朝鮮大學校大學院





차 례

저	∥1장. 서 론	1
	1.1 연구의 배경 및 목적	1
	1.2 기존 연구 고찰 및 연구의 방향	6
	1.3 연구의 방법 및 범위	10

제2장. Test-bed 구축	14
2.1 Test-bed 구축	14
2.2 Test-bed 설비 시스템	25
2.2.1 공기조화설비	25
2.2.2 조명설비	29
2.2.3 차양설비	30
2.3 환경요소설비시스템	31

J	네3장. 차양시스템 제어 알고리즘	34
	3.1 차양제어의 필요성 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	34
	3.2 천공청명도 파악	36
	3.3 차양의 수직제어	38

제4장. 공조시스템 제어 알고리즘	42
4.1 실내 유입 일사량 산출 방식의 이론적 고찰	42
4.2 실내 유입 일사량 추정	45
4.2.1 직산 분리	45
4.2.2 외부 수직면 일사량 산출	47
4.2.3 실내 수직면 일사량 산출	48
4.2.4 실내 유입 일사량 산출	49



4.3 공조기기제어 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	51
--	----

J	헤5장. 조명시스템 제어 알고리즘	53
	5.1 조명제어의 필요성	53
	5.2 실내 유입 조도 산출 방식의 이론적 고찰	54
	5.3 실내 유입 조도 추정	56
	5.3.1 실외 수평면 조도의 직산 분리	56
	5.3.2 실외 수직면 조도 추정	57
	5.3.3 실내 수직면 조도 추정	59
	5.4 실내 조도 분포 추정	61
	5.5 Test-bed Dimming 제어	62

제6장. 통합제어알고리즘 개발 및 실증 64 61 통한제어 알고리즘 개발 64

	04
6.2 실험개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	67
6.3 통합제어알고리즘의 실증 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	69
6.3.1 일별 Data 비교 ······	69
6.3.2 주간 Data 비교 ···································	76
6.3.3 측정기간 전체 Data 비교	78
6.4 소결 ~~~~~~	80

피ㅋ자	겨로	07
세/경.	22 ·····	82

참고문헌	· 85

E	ㅋ로	00
		00







표 차 례

[표2.1] 근직물의 에너지 골직 골개기는	21
[표2.2] Test-bed 각 구조체 별 물성 치 성능 값	22
[표2.3] Test-bed 개요 ·····	23
[표2.4] Test-bed 공기조화설비 개요	26
[표2.5] Test-bed 일사량계 개요 ······	31
[표2.6]Test-bed 조도측정 센서 개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	32
[표2.7] Test-bed 내부 부하 발생기 개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	33
[표3.1] 블라인드 운영 빈도수 분석 결과	35
[표3.2] K_t 값에 의한 천공상태구분 연구 사례	37
[표4.1] RMSD와 MBD를 통한 직산분리 모델의 오차 비교	46
[표4.2] 실내 온·습도 조건	51
[표4.2] 실내 온·습도 조건 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	51
[표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교	51 56
[표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교 [표5.2] F-value	51 56 59
[표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교 [표5.2] F-value	51 56 59
[표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교 [표5.2] F-value [표6.1] Test-bed 실험 개요	51 56 59 67
 [표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교 [표5.2] F-value [표6.1] Test-bed 실험 개요 [표6.2] 액티브 설비 시스템 요소별 제어 여부 	 51 56 59 67 68
 [표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교 [표5.2] F-value [표6.1] Test-bed 실험 개요 [표6.2] 액티브 설비 시스템 요소별 제어 여부 [표6.3] 제로에너지건축물인 에너지자립률 등급 	 51 56 59 67 68 81
 [표4.2] 실내 온·습도 조건 [표5.1] RMSD와 MBD를 통한 수직면 조도 변화 모델의 오차 비교 [표5.2] F-value [표6.1] Test-bed 실험 개요 [표6.2] 액티브 설비 시스템 요소별 제어 여부 [표6.3] 제로에너지건축물인 에너지자립률 등급 [표6.4] Test-bed 측정 결과 정리 	 51 56 59 67 68 81 81



Collection @ chosun



Collection @ chosun

그 림 차 례

[그림1.1] 국내 연간 평균온도	. 변화	2
[그림1.2] 국가 에너지 소비령	· 추이 ·····	2
[그림1.3] 건물 에너지 사용량	비율	3
[그림1.4] 연구 흐름도		13

[그림2.1] 외벽 및 내벽 구성도	14	
[그림2.2] 판넬 사이 공기층 공기 흐름도	15	
[그림2.3] Test-bed 건축 도면	18	
[그림2.4] Test-bed 구조도면	19	
[그림2.5] Test-bed 공정 과정 ·····	24	
[그림2.6] Test-bed 공기조화설비 계통도	28	
[그림2.7] Test-bed 조명 배치도 ······	29	
[그림2.8] Test-bed 커튼박스	30	
[그림2-9] Test-bed설치 롤러 셰이드 블라인드	30	
[그림2-10] Test-bed 조도센서 설치 ·····	32	
[그림2-11] Test-bed 내부 부하 발생기		
[그림3.1] 블라인드 운영 유형	33	
[그림3.2] 시간각 표현	36	
[그림3.3] 차양제어높이 산출을 위한 일영각 개념	38	
[그림3.4] 직사일광 유입깊이에 따른 차양 높이 개념도	39	
[그림3.5] 건물의 입면 방위각	40	



[그림5.1] 조명 미제어시 과도한 조도 분포	53
[그림5.2] 실내 유입 조도 값 추정 프로세스 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	55
[그림5.3] 각 소재의 투과율 및 반사율 개념	60
[그림5.4] 실내 조도유입 분포 개념도	61
[그림5.5] Test-bed 조광 제어 개념도	62
[그림5.6] 조명기기 제어 알고리즘	63
[그림6.1] Test-bed 알고리즘 적용 개념도	65
[그림6.2] Test-bed 통합제어 알고리즘	66
[그림6.3] Test-bed 전경	68
[그림6.4] 구름 조금 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 사용량 비교	71
[그림6.5] 구름 조금 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률 비교	71
[그림6.6] 구름 많음 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 사용량 비교	72
[그림6.7] 구름 많음 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률 비교	· 72
[그림6.8] 흐림 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 사용량 비교	73
[그림6.9] 흐림 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률 비교	73
[그림6.10] Test-bed 열교현상 확인	74
[그림6.11] Test-bed 전면 부 건물 그림자 영향	75
[그림6.12] 1주차 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교	77
[그림6.13] 2주차 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교	77
[그림6.14] 3주차 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교	77
[그림6.15] 날짜별 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교	79
[그림6.16] 날짜별 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률, 평균운량수치 비교	79





Collection @ chosun

Abstract

Cooling Energy Reduction by Cooperative Systems of Office Buildings in Summer

Nam, Hyeong Gon Advisor : Prof. Hwang, Tae Yon Department of Architectural Engineering Graduate School of Chosun University

Key words : Active Building Equipment System, Cooling Energy, Cooperative Systems, Office Buildings, Energy Saving

In recent years, the use of building energy has been increasing by satisfying the comforts of residents and by increasing the heating and cooling load caused by global warming. Measures for the development of renewable energy and the over-consumption of energy are internationally key items in the political, economic and environmental aspects .

Therefore, energy related research is actively underway in Korea. Among them, the building sector accounts for 23% of the total energy consumed in Korea, and it is a cost-effective alternative to other industries, which is a priority for energy saving policy.

office building occupies a relatively high proportion of 36% of the total building energy. The pattern of users is simpler than that of residential facilities, and it is expected that the effect will be maximized when applied to the algorithm. especially, the energy used for air conditioning and lighting occupies about 80% of the total building energy, so it is demand to reduce the energy consumption through the integrated control algorithm developed in this study.



However, absorbing solar energy to reduce lighting energy increases the energy consumption of the cooling energy and reduces the cooling energy by reducing the solar energy, which increases the energy consumption of the lighting and makes the correlation between the air conditioner and the lighting difficult.

Therefore, in this paper, we propose an algorithm to control the inflow of solar radiation using a shading device, to create an environment suitable for office buildings in terms of air conditioning and lighting, and to integrate and control active facilities systems.

The automatic control algorithm of the intelligent shading system according to the first direct sunlight inflow depth is calculated based on the sunlight angle between the building and the sun, and the algorithm logic is set. In order to enable intelligent shading control corresponding to the external environment, Based on Hour clearness $index(K_T)$

The second, air conditioning system control algorithm developed an analytical formula for the predicted solar radiation entering the room. Based on this, the solar radiation inflow was predicted and the indoor heat load was calculated through the solar heat acquisition coefficient. We developed an air conditioning control algorithm that responds to the calculated thermal load.

The third, the control algorithm of the lighting system converts the indoor solar irradiance to the indoor sunrise quantity by applying the Perez Model, predicts the incoming sunshine quantity, and sets the control correction value of the artificial lighting dimming control system based on the predicted incoming.

Finally, based on the control algorithm for each element of the active building system developed in this study, we developed an algorithm that can control the awnings, lighting, natural light, and air conditioning system integrally. As a result of this test-bed demonstration, the energy consumption of the active building system prove that reduced by about 20% by the control method alone.

The 20% reduction of building energy through the integrated control algorithm means that the zero energy building certification system is equivalent to one grade, and it is expected that the expansion of the entire building will greatly reduce the share of renewable energy.





기 호 정 리

W/m^2K	: 열관류율 단위
LPM	: 유량 단위
$W\!/m^2$: 일사량 단위
Ν	: 단위 면적 m^2 당 인원 산출 값
q_S	: 현열
q_L	: 잠열
q_C	: 내부 기기 부하
K_T	: 천공청명도
I_T	: 실외 측정 일사량
I_{oh}	: 대기권 밖 수평 일사량
I_{sc}	: 대기권외 태양 일사량
l	: 위도
L	: 경도
J	: 줄리안 데이트
δ	: 태양 적위
ω	: 시간각
R_c	: 차양의 수직 높이
a_p	: 일영각
L_d	: 목표유입깊이
W_h	: 창틀 높이
a_t	: 태양고도
a_i	: 태양입사각
a_z	: 태양입면방위각
a_e	: 건물입면방위각
a_s	: 태양방위각





t	: 태양시
t_s	: 표준시
SM	: 표준경도
EOT	: 균시차
I_{DH}	: 직달 일사
I_{dH}	: 확산 일사
RMSD	: 평균제곱근편차
MBD	: 상대 평균 오차
K_d	: 일사확산분수
I_{DN}	: 경사면 직달 일사량
I_{dN}	: 경사면 확산 일사량
$I_{\gamma N}$: 경사면 반사 일사량
I_{TN}	: 경사면 일사량
ρ	: 지표면 알베도
θ_z	: 천정고도
$ heta_a$: 수평면에 대한 건물 경사각
i	: 태양입사각
I_{TV}	: 외부 수직면 일사량
\dot{Q}	: 총 열류량
A	: 일사 유입 면적
q_i	: 온도차에 의한 열류
q_s	: 일사에 의한 열류
U	: 열관류율
ΔT	: 실내외 온도차
$ au_v$: 유리의 투과율
$lpha_e$: 유리의 흡수율
$\rho_{v,B}$: 차양의 반사율
$\alpha_{e,B}$: 차양의 흡수율





: 태양열취득계수(차양無)
: 태양열취득계수(차양有)
: 유리의 실내 대류열전달계수
: 유리의 실외 대류열전달계수
: 실외 수평면 조도
: 직산 조도
: 확산 조도
: 발광 효율 단위
: 수평면 직산 일사 발광효율
: 수평면 확산 일사 발광효율
: 대기권 외 일사의 발광 효율
: 최대 시감도
: CIE 스펙트럼 시감도
: 파장
: 실외 수직면 전천공 조도
: 실외 수직면 직달 조도
: 실외 수직면 확산 조도
: Generic Circumsolar Coefficient
: Horizon Brightening Coefficient
: 맑기 지표
: 밝기 지표
: 공기 질량
: 실내 수직면 조도
: 차양이 있는 경우 투과율
: 유리의 반사율
· 차양의 투값율







E_{AV}	: 유리를 통과한 중공층 조도
$E_{TV,R}$: 유리에서 실외로 반사되는 조도
$E_{AV,GR}$: 유리에서 실내로 반사되는 조도
$E_{AV,BR}$: 차양에서 반사되는 조도
E_p	: 측정지점
KW	: 소비전력
KWh	: 소비전력량



제1장 서론

1.1 연구의 배경

최근 건물의 초고층화, 지구 온난화에 의한 냉난방 부하증가와 재실자의 쾌적성 충 족을 위해 건물에너지 사용량은 점점 증가하고 있는 추세이며, 신재생에너지 개발과 에너지 과소비 현상에 대한 대책은 국제적으로 정치, 경제, 환경적 핵심 안건이다. 에 너지 소비가 국제 사회에 이슈화 되는 주된 이유는 지구 온난화의 주요 원인인 온실가 스 배출과 자원의 86.8%정도 대부분이 재생 불가능하다는 점에서 시작된다[1].

IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체, Intergovernmental Panel on Climate Change, 이 하 IPCC)의 제 5차 평가보서(2014)에 따르면 지구기후시스템 온난화의 주원인은 인위 적인 온실가스 배출이며 배출된 양은 지난 80만년 내 최고 수준으로 추정되고 있다고 발표하였다. 이에 UNFCCC(유엔기후변화협약, United Nations Framework Convention on Climate Change, 이하 UNFCCC)당사국 총회가 2020년 만료 예정인 교토의정서(1997)를 대체, 2020년 이후의 기후변화 대응을 COP21(21차 유엔 기후변화협약 당사국 총회, Conference of the Parties, 이하 COP21)에서 파리협정(2015)을 최종 채택하였다. 각국이 제출한 INDC(자발적 감축목표, Intended Nationally Determined Contributions, 이하 INDC))에 국제법적 구속력은 부여하지 못했다는 한계가 있지만 선진국만 온실가스 감 축 의무가 있었던 교토의정서와 달리 195개국 모두에게 의무가 있는 첫 국제 기후 협 의라는 의의가 있다[2].

국제 정서에 맞추어 우리나라도 2015년 12월 파리 기후협정에 따른 온실가스 배출 감축 대책 수립 재정 지원, 이행점검 등을 실시하고 신기후체제 하에 2030년까지 BAU(온실가스 배출량 전망치, Business As Usual, 이하 BAU)대비 국가 온실가스 37.0% 감축 및 건물 부문 18.1% 감축하는 것을 골자로 한 제 1차 기후변화대응 기본계획을 수립하는 등 지속적으로 제도적 장치를 구축하고 이에 대해 꾸준한 연구가 진행 중이 다. 또한 건물 부문은 온실가스 배출의 주요 원인으로써 다른 산업에 비해 비용대비 효율 측면에서 그 효과가 크기 때문에 에너지 절감 정책에 있어서 우선적인 부분이 되 고 있다[3].





지구 온난화에 의해서 국내 평균온도는 꾸준히 상승 추세를 보이며 지난 100여 년간 약 2℃정도의 상승폭을 보이고 있다. 수치상의 2℃의 온도 상승은 실감할 정도의 상승 폭은 아니지만 IPCC의 제5차 평가보고서(2014)에 따르면 평균기온 대비 2℃이상의 상 승은 인류에 심각한 위협이라고 할 만큼 지구온난화의 심각성에 노출되어 있음에도 국 내 에너지 사용량은 온도 상승에 비례하여 증가하고 있다[4].



[그림1.1] 국내 연간 평균온도 변화

1990년에서 2015년 까지 약 25년간 한국의 1차 에너지 소비량은 93,192 천TOE(Ton of Oil Equivalent, 이하 TOE)에서 287,479 천TOE로 약 194,287 천TOE 만큼 증가하였고 최종 에너지 소비량은 75,107 천TOE에서 218,608 천TOE로 약 143,501 천TOE 만큼 증 가하였다. 이는 2020년에는 약 239,600 천TOE를 기록할 전망의 상승 추세이며 이는 2010년 대비 연평균 2.1% 정도의 상승폭이며 에너지 절감을 위해서는 건물 요소별 에 너지 사용량을 파악 후 비중이 높은 요소부터 제어가 시급하다[5].



- 2 -



국내에서 소비되는 총에너지 중 건물에서 차지하는 비중이 약 23%이며 2020년에는 1990년 대비 250%수준으로 증가할 것으로 예상된다. 또한 그에 따른 온실가스 배출량 의 비중이 25%로 높은 비중을 차지하고 있다. 그 중 사무소 건축물에서 소비되는 에 너지는 전체 36%로 상당한 부분을 차지하고 있다. 비록 54%의 주택에 비하면 낮은 비 중이지만 주택의 경우 개인의 성향에 따른 소비패턴이 전체 에너지 소비를 좌우하여서 중앙제어에 따른 에너지 절감이 사실상 불가능 하다. 하지만 사무소 시설의 경우 용도 가 한정되어 패턴을 일반화 할 수 있어 액티브 설비시스템 제어 시 절감 효과가 뛰어 날 것이다. 또한 대부분의 설비시스템이 구축되어 있으며 규모도 큰 건물이 많아 절감 효과를 더욱 증폭시킬 수 있다[6-7].

그 중 공조에 소요되는 에너지는 48%정도로 가장 큰 부분을 차지하고 있으며 조명 은 30%로 공조와 조명의 사용량은 전체 에너지 소비량 중 80% 에 육박하며 그밖에 에너지 사용량 측면은 대부분 사용자의 자발적인 참여로 에너지 절약이 이루어지는 부 분으로 실제 제어를 통한 에너지 절감이 가능한 부분은 공조와 조명에너지 측면이며 비중이 큰 만큼 에너지 제어 시 그 효과는 극대화 될 것이다[8].



[그림1.3] 건물 에너지 사용량 비율

공조 측면에서도 우리나라의 월별 총 전력사용량을 보면 급탕 및 난방부분의 겨울철 전력사용량이 여름철 냉방에너지 사용량보다 높은 추이를 보인다. 하지만 전력수급난, 누진세로 인한 전기세 폭등 등 에너지 측면의 사회적 이슈는 여름철 피크부하에 의해 대부분 발생한다. 따라서 여름철 피크부하의 Cut-off가 절실하다. 이는 냉방기기의 용량 축소로 인한 초기투자비 절감 VE(가치공학, Value Engineering, 이하 VE) 실현의 한부



분이 될 수 있을 것이다.

또한 최근 건물의 고층화 이미지 제고 차원에서 건물 외피마감 측면에서 유리소재로 마감이 되는 커튼월(Curtain Wall)시공이 증가하고 있다. 이는 일사에 의한 실내 열 부 하에 대한 영향이 증가로 인한 건물에너지 소비의 증가 및 재실자의 쾌적성 저하를 초 래할 수 있다. 따라서 공조, 조명과 더불어 외부 환경에 반응하여 실내 환경 조절과 에너지 절감이 가능한 차양의 제어도 요구되고 있다.

에너지 절감 방안으로는 신재생 에너지 개발 등 액티브 설계위주의 추세였지만 우리 나라는 전체 에너지 소비량 중 96.4%이상을 수입에 의존하고 있고 2011.9.15. 전력 대 란 이후 지속적으로 발생하는 전력부족 사태의 해결과 국가전체의 전력사용량 절감을 위한 방안으로 공급위주의 정책에서 수요관리 중심으로 패러다임이 변화 하면서 에너 지 효율 관리 측면 기술에 대한 중요성이 극대화 되었다[9].

또한 신축 시장의 경우, 최신의 고효율 액티브 건축 설비 시스템이 적용되어 에너지 절감효과를 보다 높일 수 있으나 기존 건축물의 경우 신축 건물에 비해 단열 및 기밀 성능이 현저히 떨어져 쓸모없는 에너지 소비가 많은 편이며 건축설비 시스템의 교체 없이 에너지 절감을 구현하기 어려운 실정이다. 따라서 기존 설비시스템의 제어를 통 한 건물에너지 절감을 구현이 필요하며 이와 관련하여 창조센터 이자지원 사업, ESCO(Energy Service Company, 이하 ESCO) 사업 등 국가 차원에서의 지원 정책의 규 모는 커지고 있다.

이자지원 사업 ESCO사업 등의 지원 정책은 시설개선 및 비용과 같은 하드웨어 적인 측면의 시스템은 구축되어 있지만 제어 알고리즘 개발 도입과 같은 소프트웨어 적인 측면의 구축은 미비하다는 한계가 있다. 따라서 기존 설비시스템의 최적제어를 통한 에너지 절감이 가능한 소프트웨어 적인 측면을 보완한다면 보다 더 효과적인 에너지 절감이 가능할 것이라고 생각된다.

건물에너지 소비 구성은 크게 액티브설비시스템, 패시브설비시스템, 신재생에너지 세 가지로 구성된다고 볼 수 있다. 건물 외피와 같은 패시브설비시스템과 신재생에너지는 제어를 통한 소프트웨어 측면의 에너지 절감을 꾀하기는 어렵지만 차양, 공조, 조명과 같은 액티브건축설비시스템의 제어는 알고리즘과 같은 소프트웨어 측면의 개발을 통해 에너지 절감을 구현할 수 있는 최적의 방법이며 그 연구에 대한 국내 외 관심도도 높 다.

- 4 -





기존 연구를 통해 건물에너지 절감의 효과는 구현되고 있지만 이는 대부분 액티브 건축 설비시스템 개별제어의 연구이며 대부분 시뮬레이션을 통한 검증만이 존재할 뿐 기존연구의 한계는 여러 측면에서 제시될 수 있으며 그에 대한 국내외 기존연구의 고 찰을 통한 연구 동향 파악 및 본 연구의 방향성 제시는 1.3절에서 다루고자 한다.



1.3 기존연구 고찰 및 연구의 방향

본 연구의 최종 목표인 통합제어 알고리즘의 개발을 위하여 국내외 건물에너지절감 관련 기존 연구의 고찰을 진행하였다.

국내 기존 연구는 이선우가 진행한 조명에너지 및 냉난방에너지 절약을 위한 베네시 안 블라인드 최적제어에 관한 연구가 있었다. 블라인드 제어는 시각적 문제해결, 열적 문제해결, 시각적 열적 문제해결 총 세 가지의 접근법으로 분류 하였을 때 재실자의 시쾌적의 확보, 실내 열부하 절감의 통합적 문제해결이 요구되며 이를 해결하기 위한 블라인드의 특정위치로의 제어 알고리즘이 부재하였다. 위의 문제 해결을 위해 이 연 구에서는 재실 상태와 냉난방에너지 소비상태에 따라 제어모드를 설정하고 조명기기와 냉난방기기의 사용으로 에너지 소비가 발생하는 재실 상태에는 현재 소비되는 에너지 절감을, 비 재실 상태에는 픽업부하의 절감을 목표로 설정하여 최적제어 방안을 제시 하였고, 블라인드 제어에 의한 실내 시각적 열적 변화와 동시에 조명, 냉방에너지의 패 턴 화를 통해 최적의 상태의 블라인드 위치를 도출하였으며, 그에 따른 실내 환경 및 에너지 상태 변화량의 비례계수를 이용하여 블라인드 최적위치로의 이동을 위한 알고 리즘을 제시하였다[10].

양자강이 진행한 사무용건물의 에너지 절감을 위한 요소별 에너지 성능 분석에 관한 연구가 있었다. 해당 연구에서는 에너지에 영향을 주는 다양한 변수를 선정하고 eQuest 프로그램을 이용하여 연구를 진행하였다. 그 결과 패시브 설비시스템요소에서는 창호 의 경우 Triple Low-E를 적용하는 것이 21.3%로 가장 큰 절감률을 보였고 벽체 열관류 율의 경우 0.15 W/m²K 으로 낮추는 것이 3.6%로 가장 낮은 절감률을 보였다. 액티브 설비시스템요소는 CAV 대비 VAV로 변경 시 30.9%의 절감률을 나타냈고 열 교환기 적용 시 10.2% 추가 절감이 가능한 것으로 나타났다. 신재생 에너지에서는 PV패널을 적용 시 전체 에너지의 7.6%가 생산되는 것으로 나타났다[11].

박영준이 진행한 하절기 자동 블라인드의 사용에 따른 환경 성능을 실험을 통해 규 명하였다. 블라인드가 자동으로 제어되는 경우와 블라인드를 완전히 올려버린 경우를 비교한 결과, 조명을 고려하지 않을 경우 열부하에 있어서 실제로 제거 되어야할 제거 열량이 절감되나 조명을 고려할 경우 에너지 소비량은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러 나 과도한 빛의 유입으로 인한 불쾌적을 고려한다면 자동 블라인드가 환경 성능을 향



상시키는 것으로 판단된다는 결론이 나왔다. 또한 블라인드가 자동으로 제어되는 경우 와 블라인드를 완전히 내려버린 경우를 비교한 결과, 조명을 고려하지 않을 경우 제거 열량이 더 크지만 조명까지 고려할 경우 에너지 소비량은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 창의 폐쇄를 통한 답답함과 조망 손실을 고려한다면 자동 블라인드가 환경 성 능을 향상시킨다는 결과가 나왔다. 단순히 차폐시스템으로만 제어되는 자동 모드는 에 너지 측면에서 수동 모드와의 차이가 거의 없고 다만 조망, 현휘등 쾌적성측면의 장점 이 있다. 따라서 블라인드 슬랫각도 조절에 의한 제어가 재실자의 쾌적성 및 에너지 절감측면에서 더 효과적일 것이라는 결론이 나왔다[12].

김덕우 등이 진행한 최적화 알고리즘을 이용한 실내 블라인드 최적제어 전략에 대한 연구가 있다. Energy Simulation Tool로써 Energy Plus와 Programming Tool인 MATLAB 을 연동하여 연구가 진행되었다. 두 가지의 Tool 을 연동한 시뮬레이션은 시간단위로 블라인드 슬랫각도를 제어하면서 건물의 부하가 최소가 될 때의 슬랫각도를 찾아가도 록 설계했으며, 연구결과 최적제어는 수동제어에 비해 유리한 것으로 나타났다. 수동제 어 시 건물 부하 패턴은 여름철 0°, 45°, 105°, 135° 모두 비슷하게 나타났으며, 겨울철 은 45°를 유지하는 것이 다소 유리한 것으로 나타났다[13].

강기남 등이 진행한 시뮬레이션을 통한 공조, 조명, 및 블라인드를 연계한 통합제어 시스템의 성능 평가에 관한 연구가 있다. 해당 연구에서는 "쾌적제어" 알고리즘을 확 장하여 시스템에어컨 기반 블라인드와 연계한 통합제어시스템을 제안하였으며, 공조와 조명의 적절한 운용을 위해 황금분할법에 의한 반복계산을 통해 일사와 주광 및 열류 조절이 가능한 베네시안 블라인드의 슬랫각 최적제어를 제시하였다. 제시한 제어 알고 리즘 검증을 위해 TRNSYS(16.01ver.)와 Window6의 연성 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과 알고리즘 도입의 경우 공조, 조명 총 전력량을 비교했을 때 약 27%의 절감율을 보였다[14].

해외연구의 경우 Guilemin은 통합시스템 제어에 Fuzzy Logic(퍼지로직) 유전자 알고 리즘을 이용한 최적제어를 적용한 연구를 진행하였다. Fuzzy Logic은 개념이 적용되지 않는 불분명한 상태를 구분 짓는 논리로서 해당 연구에서는 실에 대해 영향을 줄 수 있는 변수들을 입력하고 적절한 값이 나올 때까지 무한 루프를 반복하고 각기 다른 제 어부에서 블라인드 상태나 난방 소요 에너지 등의 계산하는 논리를 제시하였다. 그 결 과 94일간의 측정결과를 비교한 결과 통합제어 시스템을 도입한 실이 25%의 절감효과

- 7 -



를 보였다[15].

Collection @ chosun

일본의 NEDO(신에너지산업기술종합개발기구, New Energy and Industrial Technology Development Organization, 이하 NEDO)에서 2001년 진행한 가동 시 전기손실 삭감 최적 제어 기술개발-마이크로네트워크기술에 의한 빌딩 협조제어에 대한 연구가 진행되었 다. 인감지 센서, 기상, 실내 온습도, 조도 등에 대해 감지기 정보를 기반으로 공조, 조 명, 블라인드를 통합하여 제어하는 방식에 대해서 부분적인 실증 실험과 시뮬레이션을 통해 검토한 결과를 실증 대상 빌딩에 실제 적용하였고 이결과, 주광이용을 목적으로 한 협조제어에 의해 빌딩 전체 7%의 열부하를 확인할 수 있었다. 또한 에너지 측면에 서 통합제어 도입으로 인해 22.7%(공조 29.6%, 조명43.6%)의 절감이 되었다[16].

Mutsuo는 에너지 절약과 환경, 쾌적성을 고려한 협조제어에 관한 연구를 진행하였다. 해당 연구는 NEDO의 연구와 유사한 과정으로 2003년 5월 준공 건물에 통합제어 적용 시 발생할 수 있는 에너지 절감을 시뮬레이션을 통해 검증을 진행하였다. 대상 건물의 규모는 바닥면적 1000㎡이며 동, 서쪽 창면에 외부 차양이 설치되어있다. 또한 고단열 복층유리를 이용하여 일사부하에 대한 저항성을 지니게 하였고 글레어 방지 및 에너지 절감을 모두 구현할 수 있는 PGSV(눈부심 지표, Predicted Glare Sunsation Vote, 이하 PGSV)범위에서 페리미터의 에너지 소비량이 최소가 되는 슬랫 각도를 설정하고 PGSV 와 페리미터의 조명, 공조의 에너지 소비량을 파악해본결과 최대 21.6%의 에너지 절감 효과를 보였다[17].

기존연구의 경우 각각의 요소별 개별 제어를 통해 에너지절감을 구현하는 방식이 대 부분이다. 물론 공조, 조명, 차양의 통합제어의 연구가 진행되고 있지만 모든 요소별 연계제어와 각각의 설비 요소별 환경요소에 대한 즉시대응에 대한 연구는 미비하며, 대부분 시뮬레이션을 통한 검증만이 존재할 뿐이다. 효율적인 에너지 절감을 위해서는 에너지 상관관계 측면에서 관계가 깊은 공조, 조명, 차양의 통합제어가 불가피하며 보 다 신뢰도 높은 검증을 위해서 실증을 통한 연구가 진행되어야 한다.

또한 통합제어 특성상 여러 가지 환경 요소에 대한 반응이 요구되므로 기존 연구에 서 다루었던 각각의 액티브건축설비시스템의 개별 요소 제어와는 달리 상당히 많은 요 소의 파악 요구될 수 있고 이때 많은 센서가 요구되어 실제 적용 시 Input, Output Data 간의 충돌이 불가피 할 것이며 시스템 구축에 보다 큰 초기 투자비용이 작용할 수 있 다. 따라서 본 연구에서는 건물에너지의 효율화를 위해 액티브건축설비시스템으로 분류 되는 공조, 차양 및 조명의 외부 환경요소에 대하여 즉시대응이 가능하고 실제 제어 시 실내외 환경 예측으로 액티브 제어 물리 요소가 많으나 최소한의 물리요소로 일사, 조도, 실내 열부하 계산이 모두 가능한 외부 전천공 일사량에 대한 센서로 단일화 시 켜 외부 환경 요소에 대하여 각각의 액티브 설비시스템의 전체제어가 가능하며 각각의 상관관계에 대한 이해가 적용된 통합제어 알고리즘을 개발하고자한다.

또한 개발한 통합제어 알고리즘을 통해 주거시설비교하여 보다 규모가 크고 재실자 의 패턴 파악이 용이한 오피스건축물을 대상으로 여름철 냉방에너지 절감을 구현하고 자 하며 개발된 알고리즘의 효용성 검증을 위해 실제 사무소 규모의 Test-bed를 구축하 고 실증을 진행하여 그 효용성을 검증하고자 한다.



1.3 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 사무소 건물의 여름철 냉방 에너지 및 조명 에너지 절감을 위해 차 양, 공조 및 조명의 통합제어 알고리즘을 제시하는 것이 목표이며, 사무소 건축물의 기 본 규모를 구현한 Test-bed에 모터 식 전동 블라인드, LED(발광다이오드, Light-Emitting Diode, 이하 LED)인공조명 시스템 기반의 광센서 Dimming 제어 조명, 1Way 시스템에 어컨을 요소별 제어컨트롤러로 선정하여 각각의 시나리오 별로 실증을 통해 개발한 알 고리즘의 효용성을 검증하고자 한다.

1) Test-bed 구축

제 2장에서는 본 논문의 실증을 위한 Test-bed 구축에 관한 내용을 중심으로 본장의 내용을 기술하였다. 개발한 알고리즘의 비교 검증을 위하여 3인 구성의 사무소 규모의 Reference Room 세 개의 실, 중앙제어가 가능한 시스템이 구비되어있는 Hall, 각종 기 기가 구축되어 있는 기계실 까지 총 3가지 부분으로 이루어진 Test-bed를 구축하였다.

각각의 Reference Room은 내외기 열교현상을 최소화하기 위해 충분한 용량의 단열재 를 부착하였고 외기와 직접 접하는 외벽의 경우 3중 판넬을 적용하여 일사부하 및 복 사부하를 차단하였다. 또한 각각의 실의 독립성을 유지하기 실마다 간격을 확보하여 실사이사이 Damper를 설치하여 지속적인 공기의 순환으로 실의 독립성을 구현하였고 실과 실사이의 벽면은 2중 판넬을 적용하여 내부부한 간섭을 차단하였다. 그 이외에 본장에서는 Test-bed구축 관련하여 도입된 시스템, 제품, 구성도등을 상세하게 기술하였 다.

2) 차양시스템 제어 알고리즘

제 3장에서는 본 논문의 최종 목표인 통합제어 알고리즘 개발의 초석인 차양시스템 제어관련 된 내용을 기술하였다.

차양제어 기준의 척도인 천공청명도 값의 정의, 계산과정에 대해 기술 하였고 또한 천공청명도의 각각의 천공상태 분류를 위한 Model선정을 위하여 기존문헌을 고찰하였 고 그 결과 Erbs Mode, Orgill and Hollands Model을 제시 하였다. 그러나 본 논문에서 는 두 가지 모델의 중간 값을 채택하여 차양제어를 실시하였다.



제어 여부 선정 이후 차양의 수직제어를 위해 외부 전천공 일사량 측정값을 통해 일 영각을 계산하여 차양 높이제어 알고리즘을 제시하였다 이는 본 연구에서 목표하고자 하는 유입깊이를 기준으로 계산되었다. 그 외 각각의 필요 요소를 위한 계산식과 개념 도를 기술 하였다.

3) 공조시스템 제어 알고리즘

제 4장에서는 공조시스템 제어 알고리즘 제시를 위한 일사에 의한 실내 열부하 산정 을 위하여 실내 유입 일사량을 산정과정을 기술하였다. 이는 기존의 이론적 고찰을 통 해 진행하였으며 일사의 요소별 분리를 위하여 오차에 따라 제일 정확도가 높은 직산 분리 모델을 선정하였다.

직산분리에 의해 나누어진 일사량을 통해 외부 수직면 일사량을 구하고, 다시 이를 가지고 실내 유입 일사량을 산출하였다. 또한 이를 이용하여 일사열 취득계수를 산출 하여 외부 일사에 의한 열부하 산출을 위한 계수를 구하기 위한 과정을 기술하였고. 산출된 열부하와 각각의 Reference Room의 총 실내부하 제어를 위한 공조 시스템 제어 알고리즘을 제시하였다. 이는 본 연구에서 목표하고자하는 여름철 오피스 건물의 최적 조건에 부합하는 온도를 기준으로 계산되었다.

4) 조명시스템 제어 알고리즘

제 5장에서는 조명시스템 제어 알고리즘 제시를 위한 앞 선 제 4장에서 제시한 직산 분리를 통해 계산된 각각의 요소별 일사량을 일조 값으로 변환하는 프로세스에 대해 기술하였다.

또한 변환된 수평면 일조 값을 수직면 일조 값으로 변환을 위한 모델선정에 있어 각 각의 정확도를 파악하여 선정한 과정을 기술하고 선정모델에 의한 수평면 일조 값의 수직면 일조 값으로의 변환 과정 및 계산식을 기술하였다.

계산된 수직면 일조 값을 가지고 실내 유입 조도 값을 변환하는 과정을 파악하고 기 술 하였고 또한 이를 통한 실내 조도 분포를 파악하기 위한 방법을 제시 하였다. 파악 한 조도 분포를 가지고 조명기구의 Dimming에 의한 조명시스템 제어 알고리즘을 제시 하였고 이는 오피스 건축물의 작업면 조도 값을 목표로 계산되었다.



5) 통합제어 알고리즘 개발 및 실증

제 6장에서는 앞선 제 3장, 제 4장, 제 5장에서 다루었던 각각의 액티브 설비시스템 요소별 제어 알고리즘을 조합한 통합알고리즘 제시와 검증을 위한 실증과정에 대해 기 술하였다.

통합제어 알고리즘의 개발을 위해 각각의 액티브 설비시스템 요소별 상관관계를 파 악하여 순서도를 제시하였다. 여러 가지 기준에 의한 Data 비교를 통하여 개발 알고리 즘의 효용성 검증을 진행하였다.





[그림1.4] 연구 흐름도



CHOSUN UNIVERS



제2장 Test-bed 구축

본 장에서는 실증을 통한 알고리즘 검증을 위한 Test-bed구축을 위한 설계, 시공, 각 각의 설비 시스템, Test-bed 내외의 환경적 요소의 측정을 위한 기기에 대해 기술할 것 이다. 또한 정량적 데이터 확보를 위한 시스템측면의 내용을 기술하는데 목적이 있다.

2.1 Test-bed 구축

실증을 위한 Test-bed는 3개의 Reference Room과 제어실 기계실 3부분으로 구성되어 설계하였다. 개발 알고리즘의 실증을 위한 Test-bed설계에 있어서 에너지 절감이라는 주제에 부합하게 에너지 손실 및 외부환경요소의 실 부하 및 환경조건에 간섭을 최소 화 하는 부분에 중점을 두고 설계를 진행하였다.

건물 전체의 외피는 외기의 출입을 최대한 단절시키기 위하여 3중 판넬을 적용하였 다. 또한 3개의 Reference Room은 독립성을 위하여 각각의 실 사이 간격을 각각 500mm씩 이격시키고 Reference Room 세 개의 실에 외기 차단을 완벽히 제어할 수 있 는 모터방식의 Damper를 설치하여 자연급기 강제배기의 3종 환기방식의 공기순환을 유도 하였고 내벽 역시 2중 판넬을 적용하여 실 간의 내부부하 간섭을 차단하고자 하 였다.



a.외벽 구성도



b.내벽 구성도

[그림2.1] 외벽 및 내벽 구성도







[그림2.2] 판넬 사이 공기층 공기 흐름도

Test-bed는 가로 10.35m, 세로 12.4m로 총 128.34㎡의 넓이로 설계하였다. 각각의 Reference Room은 가로 2.75m, 세로 6.20m 17.05㎡의 넓이로 3개의 실이 동등하게 이 루어져 있고 출입문은 틈새에 의한 열교현상 및 외기 도입을 최소화하기 위하여 KSF 2846(방화문의 차연성 시험방법)에 의거 차압 25Pa에서 공기누설 량 0.9m³/min 미만 80mm의 갑종 방화문을 설치하였다. 그 외의 연구실, 기계실, 주출입구 등의 출입문은 일반 철재여닫이 80mm의 문을 적용하였다. Test-bed 후면에는 천장 면 보수와 일사량 계 설치를 위한 철재 사다리를 적용하였다.

또한 세 개의 Reference Room상부는 지붕면과 직접 면하지 않게 공간을 두어서 Damper를 통한 공기 순환과 동시에 외기와 직접 면하지 않게 함으로써 외부 환경에 의한 실내부하의 변화를 최소화하고자 하였다. 또한 하부는 콘크리트 기계 미장위에 우레탄 마감을 해줌으로써 하부 바닥면에 발생할 수 있는 결로현상을 방지하였다. 외 부 마감은 미려한 질감과 시공 성을 위해 스톤코트 도장을 설정하였다.

또한 구조 측면으로는 본 Test-bed는 철골 구조의 건물로 H형강을 사용하여 구조 설 계를 하였다. 총 세 가지 종류의 H형강의 사용하였으며 기둥인 C1은 H-150*150*7*10, 건물 중앙부 큰 보는 H-200*100*5.5*8, 건물 양측 큰 보는 H-250*125*6*9를 사용하였 다. 본 건물의 본래 하중이상의 구조계산을 적용하여 추후 설치가능성이 있는 신재생 태양광 판넬 설치와 고지대의 풍하중에 대한 여유율을 두었다. Test-bed구축 및 설계 관련 도면의 내용은 아래와 같다.













d. 배면도 및 우측면도

















Test-bed의 전체 외벽, 바닥 그리고 창호의 단열성능과 관련된 자재 선정에 있어선 국토교통부에서 고시한 '건축물의 에너지 절약 설계기준'에 의거하여 선정하였다. 건축 대상지역이 남부지역의 경우 외벽은 외기와 직접 면할 경우 0.32 W/m²K이하의 열관류 율, 지붕의 경우 0.18 W/m²이하의 열관류율을 충족시켜야함과 동시에 각각의 단열재 등급에의 한 두께에 대한 규제도 이루어지고 있다. 따라서 본 Test-bed의 경우 가등급 의 단열성능을 가진 난연 EPS 판넬을 적용하여 외별 100mm, 지붕 200mm로 국토교통 부에서 고시한 조건을 충족하는 자재를 이용하였다.

Test-bed바닥의 경우 200mm의 잡석다짐 위에 60mm의 버림 콘크리트가 타설되고 상부에 다시 단열재 설치가 이루어지므로 부지의 토양 부분과 직접 면하지 않아 외기 에 간접 면하는 경우이다. 또한 본 구조체는 바닥 난방을 시행하지 않으므로 열관류율 0.35 W/m²K이하이며 두께 90mm이상의 단열재를 선정하여 설계하였다.

창호의 경우 역시 '건축물의 에너지 절약 설계기준'에 의거하여 1.80 W/m²K이하의 창호를 선정하였다. 그리고 본 Test-bed의 목적에 부합하게 일반 창호보다 단열 및 에 너지 보존효과가 보다 뛰어난 로이복층유리를 도입하였으며 그 특성상 실의 독립성이 높아야 하므로 Reference Room의 창호의 두께는 26mm, 그 외 연구실측 창호의 16mm 보다 10mm더 두껍게 설계하였다.

·건축물의 에너지 절약 설계기준'관련 법규에 관한 상세 내용과 Test-bed의 각 구조 체 부분에 대한 물리적 성능 값을 정리한 것은 아래의 표와 같다.


[표2.1] 건축물의 에너지 절약 설계기준[18].

a. 지역별 건축물 부위의 열관류율표

(단위 : W/m^2K)

건축물의 부위		지역	중부자	역 ¹⁾	남부지역 ²⁾	제 주 도
	외기에 직접	공동주택	0.210	이하	0.260 이하	0.360 이하
기시이 이벼	면하는 경우	공동주택 외	0.260	이하	0.320 이하	0.430 이하
기⊇ᅴ 피즉	외기에 간접	공동주택	0.300	이하	0.370 이하	0.520 이하
	면하는 경우	공동주택 외	0.360	이하	0.450 이하	0.620 이하
최상층에 있는 거신이 바자	외기에 직	0.150	이하	0.180 이하	0.250 이하	
또는 지붕	외기에 간	0.220	이하	0.260 이하	0.350 이하	
	이기에 지저	바닥난방인 경우	0.180	이하	0.220 이하	0.290 이하
최하층에 있는	면하는 경우	바닥난방이 아닌 경우	0.220	이하	0.250 이하	0.330 이하
거실의 바닥	이기에 가저	바닥난방인 경우	0.260	이하	0.310 이하	0.410 이하
	면하는 경우	바닥난방이 아닌 경우	0.300	이하	0.350 이하	0.470 이하
위 ē	국난방인 층간	바닥	0.810	이하	0.810 이하	0.810 이하
	외기에 직접	공동주택	1.200	이하	1.400 이하	2.000 이하
차미ᄆ	면하는 경우	공동주택 외	1.500	이하	1.800 이하	2.400 이하
상 및 군	외기에 간접	공동주택	1.600	이하	1.800 이하	2.500 이하
	면하는 경우	공동주택 외	1.900	이하	2.200 이하	3.000 이하
공동주택	외기에 직접	1.400	이하	1.600 이하	2.200 이하	
세대현관문	외기에 간접	접 면하는 경우	1.800	이하	2.000 이하	2.800 이하

비고

- 중부지역 : 서울특별시, 인천광역시, 경기도, 강원도(강릉시, 동해시, 속초시, 삼척 시, 고성군, 양양군 제외), 충청북도(영동군 제외), 충청남도(천안시), 경상북도 (청송군)
- 2) 남부지역 : 부산광역시, 대구광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시, 강원도 (강릉시, 동해시, 속초시, 삼척시, 고성군, 양양군), 충청북도(영동군), 충청 남도(천안시 제외), 전라북도, 전라남도, 경상북도(청송군 제외), 경상남도, 세종특 별자치시



			단열재의 등급	단열지	ㅐ 등급별	불 허용	두께
건축물의 부위				가	나	다	라
	외기에 직접 면	한는	공동주택	125	145	165	185
거시이 이벼	경우		공동주택 외	100	115	130	145
기열의 피국	외기에 간접 면	친하는	공동주택	80	95	110	120
	경우		공동주택 외	65	75	90	95
최상층에	외기에 직	접 면ㅎ	하는 경우	180	215	245	270
까는 기울기 반자 또는 지붕	외기에 간	접 면히	하는 경우	120	145	165	180
	외기에 직접	비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비 비		140	165	190	210
최하층에 이드 거시이	면하는 경우	바드	바닥난방이 아닌 경우		150	175	195
바닥	외기에 간접	l	바닥난방인 경우	95	110	125	140
	면하는 경우	바드	각난방이 아닌 경우	90	105	120	130
	바닥난방인 층건	난바닥		30	35	45	50

b. 남부지역의 등급별 단열재 두께[18].

[표2.2] Test-bed 각 구조체 별 물성 치 성능 값

	구분	열관류율(<i>W/m²K</i>)	단열재 등급	두께			
	외벽	0.32	가	100			
	지붕	0.18	가	200			
	내벽	-	-	100			
	바닥	0.35	가	90			
ホラ	Reference room	1.8	-	26			
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		1.8	-	16			
	Reference room	철재 방화문 900*2100					
亡	연구실 및 기계실	철재 방화문 1600*2100					
	기둥	H-150*150*7*10					
철골	큰보	H-	250*125*6*9				
	작은보	H-2	00*100*5.5*8,				



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY



Test-bed의 건축부지는 C대학 태양에너지실증연구단지의 부지의 한 곳으로 본 연구 의 목적달성을 위해 고지대로써 주변의 고층 빌딩으로부터 간섭이 없고 Reference Room 기준 남향을 선택하여 자연채광을 극대화 시키고자 하였다. 전체 대지 면적 3,721㎡중에 건축면적은 125.55㎡으로 건폐율은 3.37%이고 단층 건물로 용적률 역시 동일하다.

Test-bed는 2017년 12월 05일 착공일 기준 2017년 12월 29일까지 총 24일간 공사가 진행되었다. 설계는 3일, 기초의 본래계획은 6일로 잡혀 있었지만 공사시기 기록적인 추위로 인해 보온양생의 기간을 하루 연장시켰다. 기초 시공완료와 동시에 골조 작업 이 들어섰으며 본 건물은 철골구조로 구조공사 완료 동시에 샌드위치 패널로 외벽 작 업이 들어섰다. 건물의 형태가 잡힌 후에는 내부 설비시스템 및 각각의 제어를 위한 시스템 구축이 진행되었고 마지막으로 인테리어 및 데이터 확인을 위한 모니터링 시스 템 구축이 진행되었다. 관련 개요와 구축과정에 대한 사진은 아래와 같다.

구분	개요			
대지 위치	C대학 태양에너지실증연구단지 부지			
대지 면적	3,721 m²			
건축면적	125.55 m²			
건폐율	3.37%			
용적률	3.37%			
건물용도	교육연구시설(연구소)			
방위	남향 174°			
위도/경도	35.13/126.92			

[표2.3] Test-bed 개요





- a. 건축부지선정
- b. 터파기공사
- c. 버림 및 단열재 시공



d. 기초 배근



e.기초 시공



f.골조 시공



g.외벽 패널 시공



h.외벽 도장 마감



i.실내 바닥 마감





j.내부 설비 시스템 구축 k.제어 및 모니터링 시스템 구축 [그림2.5] Test-bed 공정 과정







2.2 Test-bed 설비 시스템

2.2.1 공기조화설비

Test-bed 공기조화설비 배관은 동관으로 설정하였다. 동관은 열손실이 없고 열전도율 이 뛰어나며 내부 냉매가스등에 영향을 받지 않고 부식이 거의 없다. 또한 시공 시에 용접이나 구부러뜨려야 하는 경우가 많은데 연성이 좋아 시공성이 크다는 장이 있고 동성능의 타 금속에 비해 가격이 저렴하여 동관으로 설정하였다.

FCU(팬코일 유닛, Fan Coil Unit, 이하 FCU)는 KSC9306에 의거하여 사무실 기준 단 위 면적당 부하량을 산출하여 크기가 18㎡인 Reference Room에는 ㎡당 150kcal/hm²를 적용하여 각각의 실에 S사의 천정형 1way 3.5KW용량의 실내기를 설치하였고 연구실 부분은 36㎡으로 단위 면적당 180kcal/hm²를 적용하여 S사의 천정형 4way 6.8KW를 적용하였다[19].

공기열원히트펌프의 선정은 Test-bed기준 최대 18KW 정도 요구 되지만 그에 부합하는 제품이 존재하지 않아 기성품 중 가장용량이 작은 42KW의 S사 제품을 선정하였다. 펌프는 열원 순환 펌프, 냉 온수 순환펌프 두 가지가 있으며 각각의 용량은 히트펌프 기준으로 선정되었다. 각각의 유량은 120LPM, 60LPM이고 소비전력은 0.75KW로 동일 하다. 그 외에 펌프의 급기동시 발생할 수 있는 압력을 일시적으로 흡수 하는 버퍼 탱 크와 급탕 시 장치 내를 소정의 압력으로 유지하여 온수온도를 유지하고 팽창된 물의 배출을 방지하여 열손실을 방지하는 팽창탱크가 있으며 두 가지 모두 밀폐형의 형식을 취하고 있다.



[표2.4] Test-bed 공기조화설비 개요

a. 히트펌프

					냉방	시/난빙	히		법정냉동	접속	구경		소비전력	
품번 모델명 수량		수량	형식	용량	용량 유량 온드		온도 (°	르도 (°C) 능력		(Ø)		선원	(W)	
			(KW)	(LPM)	입구	출구	실외측	(RT)	고 고	환수	(Ph*V*Hz)	냉방	난방	
LID 1	AG012K	1	수직	42/42	120/120	12/40	7/45	25/7	7.02	4	0	2*290*60	10.77	10.37
nr-i	SVAHH1	1	입형	42/42	120/120	12/40	7/43	55/7	7.05	4	0	3.380.00	130	130

b.순환펌프

품번	품명	수량	형식	유량 (LPM)	양정 (m)	단수	접속구경 (Ø)	전원 (Ph*V*Hz)	소비전력 (KW)	용도
CP-1	열원 순환펌프	2	인라인형	120	10	-	40	3*380*60	0.75	열매체 순환용
CP-2	냉온수 순환펌프	2	인라인형	60	10	-	40	3*380*60	0.75	냉온수 순환용





c. 탱크류

프버	푸며	스랴 혀시 요랴(L) 규격 최고사용입		최고사용압력	최고사용온도	최고사용온도			
	<u> </u>	ΤÖ	57	50(L)	(∅ * H)	(kg/cm^2)	(°°)		一一工
T - 1	버퍼탱크	1	밀폐형	1000L	900*2,050	6	100	STS 304	원형
T - 2	팽창탱크	1	밀폐형	100L	457*1,005	6	70	SS 400	BLADDER

d. FCU

				냉방 시/난방 시					저소그겨	저의	소비	전력	
품번	모델명	수량	형식	용량	유량		음돈 (°	C)	송풍기			(V	V)
				(KW)	(LPM)	DB	WB	입구		(Ø)	(Ph*V*Hz)	냉방	난방
FCU-1	SFC1-2.5K	3	1WAY	2.86/4.30	8.3/8.3	27/	19.5	7/60	양흡 시로코형	20	1*220*60	42	42
FCU-2	SFC-10K	1	4WAY	11.49/18.02	33.3/33.3	21	/-	//00	편흡입 터보형	20	1*220*60	130	130







[그림2.6] Test-bed 공기조화설비 계통도





2.2.2 조명설비

Test-bed의 조명설비는 각각 기계실 1개, 연구실 2개, Reference Room 실 당 6개 씩 총 21개가 설치되었고 본 건축물 특성상 에너지 소비가 적고 실내 부하에 영향이 제일 적은 LED조명을 설치하였다. 또한 조명알고리즘 도입을 위해 Dimming이 가능한 제품 이며 100% Dimming을 실시하였을 실별로 분 단위로 순시 160W 정도를 소비한다. 아 래의 그림은 조명설비의 배치도 이다.



[그림2.7] Test-bed 조명 배치도





2.2.3 차양설비

차양설비설치를 위해서 설계 단계부터 Test-bed에 300*200규격의 커튼박스를 설치했 다. 차양 설비는 Reference Room당 각각 1개씩 3개 설치되었고 차양의 수직제어를 위 해 롤러 셰이드 블라인드를 설치하였고 규격은 가로세로 동일하게 2700mm의 크기로 추후 자동제어를 위해 롤러 부분에 모터를 설치하여 자동 수직이동이 가능하게 하였 다. 아래의 그림은 커튼박스 및 블라인드 관련 그림이다.



[[]그림2-9]Test-bed설치 롤러 셰이드 블라인드

Collection @ chosun



2.3 실내외 환경요소측정시스템

Test-bed의 환경요소 측정 시스템은 본 논문에서 개발하고자 하는 통합제어 알고리즘 제어의 척도인 일사량계, 그 외 조명의 Dimming제어를 위한 조도계 또한 사무소와 유 사한 부하 조성을 위한 내부 부하 발생기가 요구된다.

1) 일사량계

본 Test-bed에서는 외부 전천공 일사량측정을 위해 AHLBORN사의 일사량계를 사용 하였다. 측정 범위는 0에서 1,200 W/m²이며 측정위치는 Test-bed 지붕에 설치하여 그림 자와 같은 장애요소를 최소화하였고 개요와 사진은 아래와 같다.

구분	내용				
제조사	AHLBORN				
측정범위	0 to approx. 1,200 W/m^2				
최대 스펙트럼 민감도	780mm				
신호 출력	0V to 2V				
파워 공급	+5V to +15V				
개체 사진					

[표2.5] Test-bed 일사량계 개요[20].

2) 조도계

조명알고리즘 실증에 있어서 성능 검증의 중요한 요소인 조도측정을 위한 시스템으 로 KONICA MINOLTA의 조도센서를 사용하였다. 실 당 9개의 조도측정센서를 가지며 모든 센서를 랜선으로 직렬연결 하여 실 당 하나의 데이터 로거를 설치하여 조도 값을 모니터링 하는 방식으로 설치하였다.

조도센서 설치위치는 보통의 사무소 책상 높이인 바닥면으로부터 85cm 상부인 작업





면조도의 높이에 맞추어 설치하였고 벽과의 거리는 1m 이내로 산정하였다. 추가적으로 조명 설비 사이에 설치하여 로깅되는 조도 값의 분포의 편차를 최소화하고자 하였다. [표2.6] Test-bed 조도측정 센서 개요[21].

구분	내용				
제조사	KONICA MINORTA				
형식	수광부 분리형 디지털 조도계				
측정범위	0.01~299,900lx				
사용 온습도 범위	-10~40℃, 상대습도 85% 이하(35℃일 때)				
크기(폭*높이*두께)	69*174*35mm				
	실내조도측정센서(T-10A)				
	센서헤드어댑터(T-A21)				
	센서헤드어댑터(T-A20)				
구성	전원어댑터(AC-A311)				
	데이터 관리 소프트웨어(T-S10W)				
	센서연결 LAN 케이블				





a. 조도센서 설치 개념도 b. 조도센서 설치 사진 [그림2-10] Test-bed 조도센서 설치





3) 내부 발열 부하 발생기

본 연구를 위한 Test-bed에 설치된 내부 발열기는 Heating Cable을 이용하여 보편적인 사무소의 인체 부하 및 기기 부하를 구현하고자 설치하였다. 부하량 산정 기준은 국토 해양부 제정 건축기계설비 설계 기준에 의거 하였다. 부하량 산정은 식2.1을 통해 구할 수 있다. N값은 단위면적 ㎡당 인원 산출 값이고 q_S , q_L 은 각각 현열과 잠열부하 값이 다. q_C 는 실내 각종 기기부하를 산출한 것이다[22].

 $N^*(q_S+q_L)+q_c$

(식 2.1)

 $0.2 \text{P}/\text{m}^2 + 17.05 \text{m}^2 + (63+69) \text{W}/\text{m}^2 + 40 \text{W} = 490.12 \text{W}$

(식 2.2)

구분	내용
모델	EHL16-2CR
도체규격	220V
최대 허용 온도	18AWG(American Wire Gage)
연속 사용 온도	85 °C
최대 사용 길이	65 °C
최대사용 길이	120M
발열량	16W/M

[표2.7] Test-bed 내부 부하 발생기 개요[23].





[그림2-11] Test-bed 내부 부하 발생기[23].



제3장 차양시스템 제어 알고리즘

본 장에서는 차양제어논리에 대해 고찰하고 일사에 의에 의한 천공의 상태별 분리와 함께 일사의 실내 유입의 전 과정을 파악하여 차양제어 알고리즘을 제시하고자 한다. 또한 기존연구는 베네시안 블라인드의 슬랫각도 제어가 주를 이루었지만 본 논문에서 는 오피스 건축물을 대상으로 설정하였기에, 오피스 빌딩에 주로 사용되는 롤러셰이드 타입의 차양장치를 적용한 높이제어알고리즘을 제시하고자 한다.

3.1 차양제어의 필요성

차양시스템은 일사의 실내유입의 차단으로 인한 실내 열부하 감소로 냉방부하 절감 및 시쾌적 확보의 핵심 키워드라고 할 수 있다. 그러나 백주영 등이 진행한 오피스 건 물의 재실자 블라인드 사용실태 분석에 관한 연구를 통해 알 수 있듯이 하루 동안 과 반수의 차양시스템이 고정된 위치에서 움직이지 않으며 한 번만 움직인 경우까지 포함 한다면 대략 95%의 차양시스템이 사용되어지지 않고 있다고 볼 수 있다[24]. 앞서 언 급한 연구를 통해 알 수 있듯이 차양 제어 시 별도의 조작이 필요하며, 실내외 일사량, 현휘, 온도, 일사 부하 모든 요소를 고려하여 조작하기에는 재실 자에게 어려움이 따른 다. 따라서 차양시스템의 효율성을 높이기 위해서는 자동제어가 불가피하다.



Collection @ chosun



Туре	Type A (움직이지 않음)	Type B (한 번 움직임)	Type C (두 번 움직임)	Type A (세 번 이상 움직임)
백분율	68.8%	25.3%	5.0%	0.8%

[표3.1] 블라인드 운영 빈도수 분석 결과



3.2 천공청명도 산정

현재 대부분의 건물에 설치되어있는 롤러 셰이드를 기준으로 차양의 수직제어 알고 리즘을 개발하고자 한다. 차양의 수직제어는 재실자의 시쾌적 확보를 위해 이용된다. 즉 사용자의 Glare방지를 위한 수단으로써 작업 면에 직달 일사가 직접적으로 도달하 지 않도록 일사량과 일영각등을 고려하여 일사를 차단하는 것이다. 먼저 블라인드 Fully open 혹은 제어상태인지의 결정여부는 천공청명도(Hour clearness index ; *K_T*)값에 의해 정해진다.

*K_T*값을 산출하기 위해서는 *I_T*,*I_{oh}*의 값이 필요하며, 계산식은 식3.1과 같다. *I_T*는 실 제 측정 일사량 값으로 Test-bed 지붕에 설치된 일사센서에서 실측된 값이다. *I_{oh}*는 대 기권 밖의 수평 일사량으로 식 3.2와 같이 계산되며 *I_{sc}*는 대기권외 태양 일사량을 나 타내는 값으로 1350 *W*/*m*²의 고유한 값을 가진다. *I*은 위도를 나타내는 값으로 Test-bed 위치의 위도 값이다. δ의 값은 태양 적위로 계산식은 식3.4와 같다. *J*는 줄리 안 데이트(Julian date ; J)를 나타내는 값으로 1월 1일을 1로 12월 31일을 365로 변환하 여 1부터 365중 해당 날짜를 나타내는 값으로 변환한 것이다. ω값은 시간각(Hour angle) 값으로 그림3.2와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_T = \frac{I_T}{I_{oh}} \tag{3.1}$$

 $I_{oh} = I_{sc} [1 + 0.34 \cos \frac{360^* J}{365} \cos Z]$ (3.2)

 $\cos Z = \cos l \cos \delta \cos \omega + \sin l \sin \delta \tag{3.3}$

$$\delta = 0.4093 \sin\left[2\pi/368(J-81)\right] \tag{3.4}$$









[그림3.2] 시간각 표현

*K_T*값은 실시간 태양의 위치에 따라 변화하며, 대기의 상태가 청천공, 담천공, 부분 담천공인지 정하는 중요한 지표이다. 그 대표적인 모델로는 *K_T*값이 0.22이하 일 때를 담천공으로 하는 Erbs Model, *K_T*값이 0.35이하 일 때를 담천공으로 하는 Orgill and Hollands Model이 있으며 본 연구에서는 그 중간 값인 0.3을 기준으로 차양제어를 시행 하였다. 즉 담천공시 차양은 완전개방이며, 청천공 또는 부분 담천공시 제어로 인한 부 분개방을 실시한다.[25~26]

구분	Erbs Model	Orgill and Hollands Model	
청천공	K _T >0.8	<i>K_T</i> >0.75	
부분담천공	$0.22 < K_T \le 0.8$	$0.35 < K_T \le 0.75$	
 담천공	$K_T \leq 0.22$	$K_T \leq 0.35$	

[표3.2] Kt값에 의한 천공상태구분 연구 사례





3.3 차양의 수직제어 알고리즘

K_T값에 의해 차양의 제어 유무가 결정이 되면 높이 제어가 이루어져야 한다. 이때 는 직사일광이 건물 내부 어디까지 유입되는지 계산하기 위하여 입사각의 단면적인 개 념인 태양의 일영각(Profile angle)을 사용한다. 이때의 일영각을 가지고 차양의 수직 높 이를 산출하며, 일영각은 건물 입면에 수직인 면에서의 태양고도를 말한다. 그리고 직 사일광의 목표 유입깊이를 설정해야하며, 일상적인 수치는 보통 0.45~0.60m 기준이며, 본 논문에서는 0.5m로 직사일광의 유입깊이를 제한하였으며, 이는 사무공간에서 창으 로부터 책상의 배치를 고려하여 선정한 것이다. 아래의 그림3.3은 차양높이 제어 시 요 구되는 일영각의 개념을 그림으로 나타낸 것이다.



[그림3.3] 차양제어높이 산출을 위한 일영각 개념

차양의 수직 높이는 제한한 유입깊이의 끝점과 창과의 거리를 기준으로 삼각함수에 의해서 계산된다. 이때 창틀의 높이를 제외시켜주어야 되지만 본 연구의 Test-bed에서 는 전면 커튼월로 창면의 높이가 존재하지 않아 무시해도 무방하다. 창호를 통해 직사 일광이 직접 도달한다고 가정했을 때 유입깊이, 직사일광, 창호는 삼각형을 이루므로 삼각함수에 의하여 차양의 높이를 산정할 수 있다.

아래의 식3.5를 통해서 최종적으로 제어되어야할 차양의 높이를 산출 할 수 있다. R_c 는 차양의 수직 높이, a_p 는 일영각, L_d 는 본 논문에서 제한하고자하는 목표유입깊이, W_h 는 창틀의 높이를 나타내며 그림3.4는 그 개념을 그림으로 나타낸 것이다.





$$R_c = \tan\left(a_p\right)^* L_d - W_h \tag{3.5}$$



[그림3.4] 직사일광 유입깊이에 따른 차양 높이 개념도

태양의 일영각을 구하기 위해서는 태양의 고도(Solar altitude angle)와 태양입사각 (Solar incident angle)이 요구된다. 태양의 고도 a_t 는 식3.6을 통해 구할 수 있으며, 태양 입사각 a_i 는 태양의 직사일광이 입면 하는 각도로써 태양고도와 태양입면방위각 (Solar-elevation azimuth angle)를 통해 식3.7과 같이 계산할 수 있다. 다시 태양입면방위 각 a_z 은 건물의 입면방위각(Elevation azimuth angle)과 태양방위각(Solar azimuth angle)을 통해 식3.8과 같이 계산할 수 있다. 건물의 입면방위각 a_e 는 정남 입면 시 0, 동향입면 시 + 서향입면 시 -값으로 초기 입력되는 값이다. 그림3.5와 같이 표현이 되며 태양방 위각 a_s 는 태양의 위치를 표시하는 지평 좌표 각으로 태양시(Solar time)를 이용하여 식 3.9와 같이 계산될 수 있다.

태양시 t는 태양의 일주운동을 기준으로 만든 시간으로 이때 균시차(Equation of Time, 이하 EOT),계산 시 시간, 경도, 기준 경도가 필요하며 식 3.10과 같이 계산될 수 있다. 균시차는 실제 태양이 가리키는 시각인 시태양시와 가상의 태양이 가리키는 시 각인 평균태양시의 차이로 식3.11을 통해 구할 수가 있다. 위의 모든 식을 통하여 일사 유입깊이를 기준으로 차양의 높이를 산출할 수 있고 알고리즘의 순환은 초단위의 제어 보다는 분단위의 제어가 효율적이라고 판단하여 1분단위의 제어를 시행하였다.





$$a_t = \arcsin[\sinh \sin \delta - \cos \delta \cos(\pi t/12)]$$
(3.6)

$$a_i = \arccos(\cos a_t \cos a_z) \tag{3.7}$$

$$a_z = a_s - a_e \tag{3.8}$$



[그림3.5] 건물의 입면 방위각

$$a_{s} = \arctan\left[\frac{\cos\delta\sin\left(\frac{\pi t}{12}\right)}{\cos l \sin\delta + \sin l \cos\delta\cos\left(\frac{\pi t}{12}\right)}\right]$$
(3.9)

$$t = t_s + EOT + \frac{12(L - SM)}{\pi}$$
(3.10)

$$EOT = 0.170\sin\left[\frac{4\pi}{373}(J-80)\right] - 0.129\sin\left[\frac{2\pi}{355}(J-8)\right]$$
(3.11)



Collection @ chosun





- 41 -

Collection @ chosun



제4장 공조시스템 제어 알고리즘

지구 온난화에 의한 여름철 평균온도 상승에 따라 냉방부하는 매년 증가하는 추세로 피크부하 절감 및 냉방에너지 사용 절감을 위해서 적합한 공조제어가 요구된다. 대부 분의 공조기기는 설정온도에 의해 제어가 이루어지지만 그 과정에 있어서는 일사에 의 한 실부하의 산정이 요구된다. 이를 위해서 실제 실 부하에 영향을 미치는 일사의 요 소를 파악하고 적절한 온도 설정에 따른 공조제어가 요구된다.

따라서 본 장에서는 일사의 각 요소별 분리를 통해 실제 실내 온도상승에 관여하는 요소 및 그 상관관계를 파악하고 공조제어프로세스에 대해 고찰하여 효율적인 공조제 어알고리즘을 제시하고자 한다.

4.1 실내 유입 일사량 산출 방식의 이론적 고찰

실내로 유입되는 일사량은 창호의 일사 투과율과 차양의 설치 유무에 의해 달라 질 수 있다. 본 논문에서는 일사에 따른 차양의 수직제어가 이루지는 Reference Room과 차양 전체 개방형 Reference Room 두 가지 Type이 존재하므로 차양 유무에 관한 일사 유입량 두 가지 모두를 파악해야 한다.

태양에너지의 경우 파장이 길어 물체에 흡수되어 축열, 복사하는 과정을 거치므로 실내로 유입되는 일사량을 구하기 위해서는 실외에 측정되는 일사량, 그 일사량을 통 해 일사의 요소별 분리하는 방법을 알아야 최종적으로 실내 취득 열을 계산 할 수 있 다.보편적으로 일사에 대한 열투과율은 업체 측 기본제공 되는 정보로 투과 시 열부하 계산은 가능하다.

실외 일사는 측정 면의 상황에 따라 수평면 일사, 경사면 일사로 분류되고 일사 형 태에 따라 직달 일사, 확산 일사로 구분할 수 있다. 경사면 일사의 경우 실제 건물 외 피에 면하는 일사를 정확히 측정할 수는 있지만 센서 방향에 민감하여 천구 전체의 일 사를 대표하기에는 어려움이 있다. 따라서 센서 하나로 모든 측면의 일사량을 구할 수 있는 수평면일사량을 측정하여 직산분리와 경사면 일사량 변환을 통해 실내 일사 유입



량을 산출하고자 한다.

외부 수평면 일사량의 측정값에 대한 실내 유입 일사량을 계산하기 위한 박웅규 등 이 진행한 기존연구에서 상세히 다루고 있다. 따라서 본 논문에서는 이에 따라 총 4단 계에 걸쳐 실내 유입 일사량을 추정하고 이에 따라 경사면 일사량을 수직면 일사량으 로 변환하고 실내 취득 열을 계산하고자 한다[27].

실내 유입 일사량 추정 프로세스는 다음과 같다.

 ① 외부에 설치된 일사량계를 통해 실제 외부에 비추어 지고 있는 일사를 측정하고, 태양의 궤적정보인 고도, 방위각과 건물의 입면 방향 등을 사용하여 태양의 입사각 및 입사각에 의한 실내 유입 강도 역시 계산이 가능 하다.

이때 직달 일사와 확산 일사의 분리가 요구되며, 이를 직산분리라고 한다. 직산분리 의 모델로는 Erbs Model, Orgill and Hollands Model등이 있다. 앞서 제시한 모델을 통 해 일사량계에 의해 측정된 수평면 일사량을 직산 분리를 통해 직달 일사와 확산 일사 로 구분할 수 있다. 직달 일사는 선형으로 들어와 입사각에 영향을 받지만 확산 일사 는 균일하게 퍼지므로 입사각의 영향을 받지 않으므로 둘을 구분한다. 또한 일사 요소 별 가지는 성분, 특성이 모두 다르기 때문이다. 만약 이를 구분없이 실내 유입 일사를 추정할 경우 심각한 오차가 발생할 수 있다.

② 실외 수평면 일사량을 통해 경사면 직달, 반사, 확산 일사량을 구하고 전체 합을 통해 경사면 일사량을 구할 수 있다. 다시 경사면 일사량을 통해 외부 수직면 일사량 을 구할 수 있다. 실내 유입 일사량은 외부 수직면 일사량을 통해 이루어지므로 앞서 구한 경사면 일사량을 이용하여 그 계산과정을 다시 반복하면 외부 수직면 일사량을 구할 수 있다.

③다음은 외부 수직면 일사량을 이용하여 실내 수직면 일사량을 구하는 과정이다. 이는 창호 및 차양의 투과율을 알고 있어야 하며 세 가지 요소를 모두 이용하여 실내 수직면 일사량을 구할 수 있다.

④실내 수직면 일사량을 이용하여 실내외 온도차에 의한 열량, 외부 수직 일사에 의 한 열량을 고려하여 실내 유입 일사를 구할 수 있으며 이때 창호의 열관류율과 일사열 취득계수(SHGC 또는 g-value)가 필요하다.











Collection @ chosun

4.2 실내 유입 일사량 추정

4.2.1 직산 분리

실내 유입 일사량 추정의 첫 단계는 실외 수평면 전천공 측정일사량(I_T)에 대해 직 달 일사(I_{DH})와 확산 일사(I_{dH})로 구분하는 직산 분리로 시작하며 식4.1과 같이 표현할 수 있다.

실외 수평면 일사랑의 직산분리 $I_T = I_{DH} + I_{dH}$

(4.1)

직산 분리를 위해서는 사용할 모델을 선정해야하며, 직산분리의 모델로는 Erbs Model, Reindl Model, Orgill and Hollands Model, Lam and Li Model 등이 있으며 직산 분리 모델선정에 있어서 도움이 될 수 있는 각각의 모델들에 대한 오차를 비교한 Dervishi등이 진행한 기존의 연구가 있다. 해당 연구는 오차의 편차를 표준화한 값인 RMSD(평균 제곱근 편차, Root Mean Square Deviation, 이하 RMSD)와 상대 평균 오차 인 MBD(상대 평균 오차, Mean Bias Deviation, 이하 MBD)를 이용하여 각각의 직산 분 리 모델에 대한 오차를 비교하였다. 각각 식4.1 4.2를 통하여 RMSD, MBD를 구할 수 있다[28].

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (M-C)^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^{N} M}{N}} *100\%$$
(4.2)





위의 식에서 M은 측정값, C는 계산값, N은 측정 데이터 수이다. 위의 식을 통해 각 각의 모델의 오차를 파악한 결과 가장 정확성이 높다고 판단되는 Erbs Model을 사용하 고자 한다.

Models	RMSD(%)	MBD(%)	
Erbs Model	37.4	-9.2	
Reindl Mode	41.6	-10.5	
Orgill and Hollands Model	43.1	-13.3	
Lam and Li Model	45.7	11.9	

[표4.1] RMSD와 MBD를 통한 직산분리 모델의 오차 비교[28].

일사의 직산분리는 K_T 값에 의해 직달 일사와 확산 일사 비율이 다르게 책정된다. 천공청명도가 낮아짐에 따라 확산 일사의 값은 증가하고 직달 일사의 값은 감소하며, 무시 가능한 정도까지 감소하기도 한다. 하지만 이를 단순한 하나의 식으로 표현하기 에는 무리가 있으므로 Erbs Model의 기준에 따라 천공의 상태에 따라 담천공(Overcast Sky), 부분담천공(Partly Sky), 청천공(Clear Sky) 3가지로 나누어 각각의 천공 상태에 따 른 직산분리를 계산하고자 한다.

천공상태 구분을 위한 K_T 값은 제3장에서 식3.1을 통해 산출할 수 있으며, 전천공 일 사에 대한 확산 일사의 비율은 확산 분수(Diffuse fraction), K_d 값을 통해 나타낼 수 있 고 식4.4와 같은 개념을 갖는다. 다음의 식4.5~4.7은 각각의 천공상태에 따른 K_d 값을 계산하는 방법이다[25].





$$K_d = \frac{I_{dH}}{I_T} \tag{4.4}$$

$$K_T ≤ 0.22$$
, (담천공 상태)
 $K_d = 1.0 - 0.09 K_T$ (4.5)

$$0.22 < K_T \le 0.80$$
, (부분담천공 상태)
 $K_d = 0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 - 16.638K_T^3 + 12.336K_T^4$
(4.6)

$$K_T \ge 0.80, (청천공 상태)$$

 $K_d = 0.165$ (4.7)

4.2.2 외부 수직면 일사량 산출

직산 분리를 이용하여 실외 수평면 전천공 일사량을 직달 일사와 확산 일사로 구분 하였다면 수평면 일사량을 수직면 일사량으로 변환하는 수학적 방법인 경사면 일사량 계산 방법을 활용하여 외부 수직면 일사량 산출을 시행하여야 한다.

계산과정은 아래의 식 4.8~4.11을 통해 구할 수 있다.

경사면 직달 일사량(직접법 모델)

$$I_{DN} = I_{DH} \cdot \cos i / \cos \theta_z = (I_{TH} - I_{dH}) \cdot \cos i / \cos \theta_z$$
(4.8)

경사면 확산 일사량(등방성법 모델)
$$I_{dN} = I_{dH} \cdot (1 + \cos \theta_a)/2$$
 (4.9)





경사면 반사 일사량 $I_{\gamma N} = I_{TH} \cdot \rho \cdot (1 - \cos\theta_a)/2$ (4.10)

경사면 일사량

$$I_{TN} = I_{DN} + I_{dN} + I_{\gamma N}$$
(4.11)

여기서 ρ는 지표면 알베도(ρ=0.2)이다. θ_z는 천정고도 θ_a는 수평면에 대한 건물 경사 각으로 보통 90°의 값을 갖는다. *i*건물에 대한 태양 입사각이다. 또한 보통의 건물 외 피나 창호는 지면과 수직인 90°의 각을 이루고 있으므로 식4.11을 통해 구해진 경사면 일사량의 값을 외부 수직면 일사량(*I*_{TV})로 간주 할 수 있다.

4.2.3 실내 수직면 일사량 산출

외부 수직면 일사량을 통해서 실내 수직면 일사량을 산출하기 위해서는 창호와 차양 의 일사투과율을 알아야 한다. 창호 즉 유리는 일사에 대해 흡수, 반사, 투과 세 가지 의 현상이 모두 발생하기 때문에 일사투과율을 알아야 한다.

또한 복층유리거나 차양장치가 있는 경우 둘 사이에 상호 반사가 작용하므로 재료에 따른 투과율을 파악해야 하며, 이는 재료에 따라 그 물성치가 다르므로 성능을 확인해 야 한다. 산출 식은 식 4.12와 같다[27].

실내 수직면 유입 일사량(W/m²) = 총 일사투과율 * 실외 수직면 일사량(W/m²) (4.12)

총 일사투과율 = 창호 일사투과율 * 차양 장치 일사투과율 (4.13)



4.2.4 실내 유입 일사량 산출

단위 면적당 실내 유입 일사량의 산출은 실내외 온도차에 의한 열류량과 일사에 의 한 열류량을 더한 값이며, 일사에 의한 열류량은 식 4.12와 같이 각 재료의 투과율을 통해도 구할 수 있지만 창호와 차양사이의 상호 반사에 대한 오차에 대해 조금 더 정 확한 검증을 위해 본 논문에서는 태양열취득계수를 산출하여 구하고자한다. 실내 취득 열 계산은 식 4.14를 통해 구할 수 있다. 식4.14에서 Q는 총 열류량, A는 일사 유입 면적, q_i 는 온도차에 의한 열류, q_s 는 일사에 의한 열류, U는 열관류율, ΔT 는 실내외 온도차, I_{TV} 는 실외 수직면 일사량이다. 앞서 언급하였듯이 일사에 의한 열류량을 산 출하기 위해서는 태양열취득계수가 필요하며 이는 차양 유무에 관한 두 가지의 태양열 취득계수(g-value)의 값을 구분되어 지며 아래의 식 4.14~4.15와 같이 표현할 수 있다. 여기서 τ_v 은 유리의 투과율, α_e 은 유리의 흡수율, $\rho_{v,B}$ 은 차양의 반사율, $\alpha_{e,B}$ 은 차양의 흡수율을 나타낸다[30~31].

$$\frac{\dot{Q}}{A} = q_i + q_s = U(\Delta T) + (g - value)I_{TV}$$
(4.14)

차양 장치가 없는 경우의 태양열취득계수
$$(g_{glz})$$

 $g_{glz} = \tau_v + \alpha_e \frac{G_1}{G_1 + G_2}$ (4.15)

차양 장치가 있는 경우의 태양열취득계수(g_t) $g_t = g_{glz} \cdot (1 - g_{glz} \hat{\rho}_{v,B} - \alpha_{e,B} \frac{G}{G_2})$ (4.16)

$$G = \left(\frac{1}{U} + \frac{1}{G_2}\right)^{-1} \tag{4.17}$$





여기서 G_1 은 유리의 실내 대류열전달계수이고, G_2 은 실외 대류열전달계수이다. 이는 벽체표면과 그 주변 공기와의 온도차에 기인하는 전열현상의 척도로 자연대류와 강제 대류로 분류할 수 있다. 자연대류는 벽체 표면과 그 주변 공기와의 온도차로 인해 밀 도차가 발생해 기류에 의한 열이동을 말하며, 강제대류는 벽체표면 근처에 기류를 일 으키는 원인이 다른 것에 있는 경우를 말한다. 각각의 수식을 통한 계산된 값을 사용 할 수 있지만 본 논문에서는 계산의 편의성을 위해일본에서 설계용으로 이용하고 있는 값을 이용하여 G_1 의 값은 $4W/m^2K$ G_2 의 값은 $18W/m^2K$ 선정하여 진행하였다.[32~33].



4.3 공조기기제어 알고리즘

공조기기 제어는 냉·난방에 관계없이 설정온도에 의해 이루어진다. 하지만 본 논문 의 주제는 여름철 냉방에너지 절감에 관한 연구이므로 냉방 측면에서 공조기기 제어를 보고자한다. 또한 Test-bed 에너지 절감을 위한 냉방 시 온도 설정은 국토교통부고시 '건축물의 에너지 절약 설계기준 [별표8]'에 의거 하여 냉방 시 사무실의 기준 26℃로 설정하였다.[18].

시며	냉방		난방	
20 	건구온도(℃)	상대습도(%)	건구온도(℃)	상대습도(%)
PUBLIC HALL	25	50~55	20	-
ARRIVAL HALL	25	55~60	20	-
CHECK IN COUNTER	25	50~55	20	-
상업시설	25	50~55	20	40
사무실	26	50	20	40
식당	25	50~60	20	-
주방	28	60	18	-

[표4.2] 실내 온·습도 조건[18].

따라서 본 연구의 Test-bed의 공조기기는 설정온도의 조건에 부합하지 않을 때 제어 및 가동이 시작되며 온도 체크 루프를 1분단위로 반복하며 앞서 4.2를 통해 산출된 실 내 유입 일사량에 의한 취득 열부하와 Reference Room의 인체 및 기기부하를 산정한 고정 열 부하를 가산하여 실내 열 부하 절감을 위해 실내기를 가동 시키며 온도기준이 설정 수준까지 도달하면 동작을 멈추기를 반복하는 방식이다.





Collection @ chosun



[그림4.2] 공조기기 제어 알고리즘

제5장 조명시스템 제어 알고리즘

본 장에서는 조명제어논리에 대해 고찰하고 일사의 직산분리를 통해 계산된 일사를 일조로 변환시켜 일조의 실내 유입 시 그에 대한 요소별 분리를 통해 실제 조도에 영 향이 미치는 부분을 파악하고자 한다. 또한 그에 따른 작업 면 조도가 목표 값을 채울 수 있도록 자동 Dimming제어가 이루어지는 알고리즘을 개발하고자 한다.

5.1 조명제어의 필요성

시공 효율성 및 건축과정에서 발생가능성이 있는 환경부하를 절감하기 위하여 커튼 월 구조의 건축형식이 증가함에 따라 그 구조상 자연채광의 영향이 증대되고 있다. 그 러나 기존의 건축물의 조명설비는 실시간으로 변화하는 일사에 반해 반응은 전혀 없고 실의 깊이에 따른 조명의 국부제어가 되지 않는 비효율적인 운영이 이루어지고 있다.

조명에너지의 불필요한 사용을 검증하고자 K_T 값이 0.8이상으로 청천공의 상태일 때 조명의 Dimming제어를 실시하지 않고 2018년 8월 21일 PM12:00시부터 PM02:59 까 지 1분단위로 작업 면 높이의 조도 센서 9개의 데이터를 수집하였다. 그 결과 9개의 센서 모두 KS A 3011 기준 정밀 작업의 경우 표준 400lux를 권장하지만 실측한 조도 센서의 데이터의 경우 최소 1500lux 최대 4500lux 까지 기준 조도를 한참 벗어나는 것 을 확인 할 수 있다. 또한 실의 깊이에 따른 조도의 분포 차가 크다는 것을 알 수 있 다[34]



[그림5.1] 조명 미제어시 과도한 조도 분포

- 53 -



5.2 실내 유입 조도 산출 방식의 이론적 고찰

실내로 유입되는 일사량에의 조도 값 역시 정해지며 조도도 일사 요소별 영향이 다 르므로 직산분리를 시행 후 일사의 조도변화를 실시하여야 한다. 또한 조도 값 추정 역시 차양의 설치 유무, 차양의 종류에 따라 달라 질수 있다. 본 연구의 Test-bed는 Roller Shade 블라인드로 차양이 설치유무가 상이한 두 개의 Reference Room이 모두 존 재하므로 그 조건에 맞추어 실내 유입 조도 산출 프로세스를 제시하고자 한다.

외부 수평면 전천공 일사량에 대해 실내 유입 조도 값 산출을 계산하는 방법은 M. Shukuya, S. Janjai, S. Chirarattannanon, R. Perez 등이 상세히 다루고 있으며 각각의 요 소별 계산과정을 본 연구의 Test-bed의 조건에 맞추어 총 5단계에 걸쳐 실내 유입 조도 값을 산출하고 그에 대한 분포를 확인하고자 한다.

실내 유입 조도 값 추정 프로세스는 다음과 같다.

 ① 앞선 4장에서 다루었던 직산분리과정을 통해 외부 전천공 일사량을 측정하고 이 를 확산 일사와 직달 일사로 분리한다.

② 외부 전천공 일사량을 직산분리를 통해 얻어진 확산 일사와 직달 일사를 각각의 발광 효율을 통해 조도 값으로 변환한다.

③ 발광 효율을 통해 산출된 실외 수평면 조도 값을 Perez Model 혹은 CIE 천공 Model을 사용하여 경사면 조도 값으로 변환한다.

④ 경사면 조도 값 계산을 통해 산출된 실외 수직면 조도 값을 창호 및 차양의 각각 의 재료별 투과율 및 반사율을 가지고 외피 전체의 조도 투과율을 산정하여 실내 수직 면 유입 조도 값을 산출 한다

⑤ 실내 유입 조도 값을 기준으로 본 연구의 Test-bed에 Reference Room마다 9개씩 동일한 위치에 설치되어 있는 조도 센서의 창호기준 거리 정보를 이용하여 실내 유입 조도에 대한 분포를 확인하여 조명 Dimming에 적용한다.









5.3 실내 유입 조도 추정

5.3.1 실외 수평면 조도의 직산 분리

실내 유입 일사량 추정과 마찬가지로 조도 역시 일사량계를 통해 측정된 전천공 일 사량을 발광효율을 통해 조도 값으로 변화한 후 직산분리를 통해 직산 조도(E_{DH})와 확산 조도(E_{dH})로 구분에서 기인한다. 식5.1~5.2와 같이 표현할 수 있다.

실외 수평면 조도의 직산분리

$$E_{TH} = E_{DH} + E_{dH}$$
 (5.1)
 $E_{TH} = I_{DH} \cdot \eta_{DH} + I_{dH} \cdot \eta_{dH}$ (5.2)

직산분리를 통해 얻어진 직산 일사와 확산 일사 값을 통해 직산 조도와 확산 조도로 구분해야 하며 여기서 발광 효율 값(lux(w/m²))이 요구된다. 발광 효율 역시 수평면 직 산 일사 발광 효율(η_{DH})과 수평면 확산 일사 발광 효율(η_{dH})로 구분되어 각각의 효율 이 다르며 대기권 외 일사의 발광 효율(η_o)의 계산이 별도로 요구된다. 일사요소별 각 각의 발광효율 계산식은 식5.3~5.6으로 구할 수 있으며, 태양고도(a_t), 태양상수(I_{sc}), 최 대 시감도(K_m), CIE 스펙트럼 시감도(V(λ)), 파장(λ)를 요구되어진다.[35].

수평면 직달 일사 발광 효율

$$\eta_{DH} = \eta_o \left(\frac{(6.25 \sin^3 a_t - 10 \sin^2 a_t + 3.94 \sin a_t) I_{DN}}{I_{sc}} + 0.983 \sin a_t + 0.451 \right)$$
(5.3)

수평면 확산 일사 발광 효율

$$\eta_{dH} = \eta_o (3.375 \sin^3 a_t - 6.175 \sin^2 a_t + 3.4713 \sin a_t + 0.7623)$$
(5.4)




대기권 외 태양 일사 발광 효율

00.70

$$\eta_o = \frac{K_m \int_{0.38}^{0.16} V(\lambda) I_{sc}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty I_{sc}(\lambda) d\lambda} = \frac{127000}{1353} = 93.9$$
(5.6)

5.3.2 실외 수직면 조도 추정

1) 실외 수직면 조도 Model 선정

실외 수평면 조도를 수직면 조도로 변환하는 대표적인 Model로는 Perez Model과 CIE 천공 Model이 대표적이다. 본 논문에서는 두 가지 모델의 정확성 판단을 위한 앞선 4 장에서 다루었던 RMSD와 MBD를 계산한 결과를 비교한 선행 연구를 통해 선정하기 로 하였다. 그 결과 값은, CIE Model의 오차는 RMSD 55.4%, MBD 39.3%,Perez Model 의 오차는 RMSD 41.2%MBD -30.1%, 로, Perez Model의 정확성이 더 높으며, 이에 본 연구에 서는 Perez Model을 사용하기로 하였다[36].

[표5.1]	RMSD와	MBD를	통한	수직면	조도	변화	모델의	오차	비교
--------	-------	------	----	-----	----	----	-----	----	----

Models	RMSD(%)	MBD(%)
Perez Model	41.2	-30.1
CIE 천공 Model	39.3	55.4

2) Perez Model을 통한 실외 수직면 조도 계산

Perez Model은 천공상태를 세분화 하여 실외 수직면 조도 (E_{TV}) 를 계산하며 이는 실 외 수직면 직달 조도 (E_{DV}) 와 실외 수직면 확산 조도 (E_{dV}) 로 구분되어 계산된다. 그 방 법은 아래의 식5.7~5.11를 통해 구할 수 있으며 태양입사각 (a_i) , 수평면에 대한 건물 경 사각 (θ_a) , Generic Circumsolar Coefficient (F_1) , Horizon Brightening Coefficient (F_2) 가 요구 된다[37].





실외 수직면 조도

$$E_{TV} = E_{DV} + E_{dV}$$
(5.7)

$$E_{DV} = E_{DH} \frac{\cos a_i}{\sin a_t} \tag{5.8}$$

실외 수직면 확산 조도
$$E_{dV} = E_{dH} [\frac{1}{2} (1 + \cos\theta_a)(1 - F_1) + F_1(\frac{a}{c}) + F_2 \sin\theta_a]$$
(5.9)

$$a = MAX[0, \cos a_i] \tag{5.10}$$

$$c = MAX[\cos 85^{\circ}, \cos \theta_Z] \tag{5.11}$$

 F_1, F_2 다음의 식 5.11~5.14을 통해 구할 수 있으며 맑기 지표(Clearness Index, ϵ)와 밝기 지표(Brightness Index, Δ), 천정고도(θ_Z), 공기 질량($m = 1/\cos\theta_z$)이 요구되며 F의 값은 표5.2를 통해 구할 수 있다.

$$F_1 = F_{11}(\epsilon) + F_{12}(\epsilon)\Delta + F_{13}(\epsilon)\theta_z$$
(5.11)

$$F_2 = F_{21}(\epsilon) + F_{22}(\epsilon)\Delta + F_{23}(\epsilon)\theta_z$$
(5.12)

맑기 지표

$$\epsilon = \frac{(I_{dH} + I_{DH}/I_{dH}) + 1.041\theta_Z^3}{1 + 1.041\theta_Z^3}$$
(5.13)

밝기 지표

$$\Delta = m \frac{E_{dH}}{I_{sc}} \tag{5.14}$$



ϵ	Upper	Casa	point source circumsolar region(AITOa))
bin	limit	Case	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1	1.065	28.30	0.187	0.578	-0.212	0.131	-0.081	-0.139
2	1.230	9.17	0.583	0.176	-0.356	0.272	-0.206	-0.192
3	1.500	9.45	0.637	0.162	-0.366	0.303	-0.206	-0.206
4	1.950	12.33	1.086	-0.510	-0.471	0.464	-0.401	-0.264
5	2.800	16.09	1.379	-1.051	-0.585	0.652	-0.685	-0.350
6	4.500	16.09	1.403	-1.018	-0.727	0.812	-0.946	-0.472
7	6.200	5.50	3.884	-10.787	1.825	2.315	-7.059	-1.042
8	-	3.07	2.350	-1.365	-2.377	1.951	-4.917	-1.403

[표5.2] F-value[35].

5.3.3 실내 수직면 조도 추정

실내 수직면 조도(E_{IV})의 계산은 차양설치의 유무 여부에 따라 계산이 상이하며 실 외 수직면 조도(E_{TV})에 각각 창호의 투과율, 차양의 투과율을 곱한 값이며 식5.15~5.16 을 통해 구할 수 있다. 이때에 유리의 빛 투과율(τ_v), 유리의 빛 반사율(ρ'_v), 차양의 빛 투과율($\tau_{v,B}$), 차양의 빛 반사율($\rho'_{v,B}$)이 요구된다. 또한 각각의 투과율 및 반사율을 구 하기 위한 개념도는 그림5.3과 같으며 식 5.17~5.20을 통해 구할 수 있다[31].

실내 수직면 조도 계산(차양 無)

$$E_{IV} = \tau_v \cdot E_{TV}$$
 (5.15)

실내 수직면 조도 계산(차양 有) $E_{IV} = \tau_{v,t} \cdot E_{TV}$ (5.16)

실내에 차양 장치가 있는 경우의 조도 투과율

$$\tau_{v,t} = \frac{\tau_v \tau_{v,B}}{1 - \rho_v \bullet \rho_{v,B}}$$
(5.17)







[그림5.3] 각 소재의 투과율 및 반사율 개념

유리 투과율	
$\tau_v = E_{TV/} E_{AV}$	(5.18)
유리 반사율	
$\stackrel{'}{\rho_v} = E_{AV,BR} / E_{AV,GR}$	(5.19)
차양 투과율	
$\tau_{v,B}=E_{AV}/E_{IV}$	(5.20)
차양 반사율	
$\dot{ ho}_{v,B} = E_{AV}/E_{AV,BR}$	(5.21)





5.4 실내 조도 분포 추정

실내 수평면 조도 분포는 측정 지점(E_p)에서 벽체와 창호의 거리 계산을 통해 가능 하며 다음의 식 5.22를 통해 구할 수 있다. 또한 각각의 거리 값은 그림5.4를 통해 그 개념을 파악할 수 있다[38].

$$E_{p} = \frac{E_{IV}}{2} \left[\frac{z}{\sqrt{h_{p}^{2} + z^{2}}} (\tan^{-1} \frac{x_{w} + w_{w} - x_{p}}{\sqrt{h_{p}^{2} + z^{2}}} + \tan^{-1} \frac{x_{p} - x_{w}}{\sqrt{h_{p}^{2} + z^{2}}}) - \frac{z}{\sqrt{(h_{p} + h_{w}) + z^{2}}} (\tan^{-1} \frac{x_{w} + w_{w} - x_{p}}{\sqrt{(h_{p} + h_{w}) + z^{2}}} + \tan^{-1} \frac{x_{p} - x_{w}}{\sqrt{(h_{p} + h_{w}) + z^{2}}}) \right]$$
(5.22)







5.5 Dimming 제어 알고리즘

선행연구의 고찰을 통해 일사량계에 의해 측정된 외부 일사량에 의한 조도 분포를 확인하였다면 기존에 사무실 기준에 맞추어 설치된 Test-bed의 조도계를 통해 그 값이 오피스 건물 내부의 책상 면 조도기준인 5001x를 충족하는지 검증하고 센싱을 통해 보 충되어야할 조도 값을 조명기구에 명령을 보내어 충족하는 방식으로 이루어지는 방식 을 채택하였다[39].

이때에 Dimming 제어 방식은 출력신호에 대한 피드백은 없이 목표 입력 값으로만 제어를 하는 방식인 Open Loop Control System과 출력 신호로 인해 동작이 제어되는 방식인 Closed Loop Control System방식이 있으며 Test-bed 특성상 Input과 Output 데이 터 간의 피드백이 요구되므로 Closed Loop Control System을 채택하였다. 또한 제어 시 각각의 조명기구에 대한 보정 값 입력을 위해 태양일사가 존재하지 않는 야간 시간대 에 조명기구 Dimming 100% 기준 10단계로 나누어 단계별 6개의 기구별 보정 값을 산 출하였다.



[그림5.5] Test-bed 조광 제어 개념도









Collection @ chosun

제6장 통합제어알고리즘 개발 및 실증

본 장에서는 앞선 장에서 다루었던 각각의 액티브 설비 시스템 요소별 알고리즘을 종합하여 여름철 오피스 건물 냉방에너지 절감을 위한 최적의 통합 알고리즘을 개발하 고자 한다. 또한 개발한 알고리즘 검증을 위해 구축된 Test-bed를 통해 실증Data를 비 교하여 알고리즘의 효용성을 검증하고자 한다.

6.1 통합제어 알고리즘 개발

통합제어 알고리즘 개발에 있어서 우선이 되어야 할 부분은 차양, 공조, 조명 각각의 액티브 설비 시스템 요소별 상관관계를 파악하여 순서도를 선정할 수 있다. 보편적으 로 실의 열부하를 상승시키는 주요 원인은 창호를 통해 유입되는 일사, 외피를 통해 전도되는 열량 또는 조명기구에서 발행하는 발열이 주를 이룬다.

본 연구의 Test-bed 경우 외피는 직접 외기의 면하지 않도록 외벽과의 공간을 부여하 고 그 공간에 Damper를 설치를 통한 자연 순환으로 외기에 의한 부하는 거의 발생하 지 않도록 설계하였다.

조명의 경우 형광등은 발열 특성상 소비전력의 80%가 열로 발산하며, 그중 37%가 복사열로 전달되어 조명발열의 무시가 힘들다. 그러나 본 Test-bed의 경우 소비전력의 80%이상이 대류열로 소멸하는 LED 조명을 사용함으로써 전도와 대류를 통한 발열제 거가 가능하여 조명기구에 의한 발열은 무시하고 일사에 의한 내부 발열만을 고려하여 알고리즘 순서도를 작성하였다[40].

또한 조명기구의 제어에 있어서도 일사의 실내 유입량에 의해 측정 포인트의 조도 값이 변동되므로 공조, 조명 관련 액티브 설비 시스템 제어에 앞서 실내 유입 일사의 제어가 우선시 되어야 된다는 것을 파악하였다.



따라서 본 논문의 통합제어 알고리즘 개발에 있어서 일사유입에 의한 재실자의 작업 면까지의 유입깊이제어를 위한 차양의 수직제어를 최우선 조건으로 두었고, 차양의 수 직 제어로 인해 변화하는 실내 유입 일사로 인해 조도 및 내부 부하가 변동 할 것이 다. 이때에 조명과 공조 제어를 실시하여 실 내부 조건을 본 연구의 기준치에 부합하 도록 제어하는 방식을 채택하였고 아래의 그림6.1은 그 개념도를 나타낸 것이다.



a. 차양 폐쇄 상태

Shading	Lighting	HVAC
Heat Load ↑	Energy ↓	Energy †
	•	
	4	

b. 차양 개방 상태 [그림6.1] Test-bed 알고리즘 적용 개념도







[그림6.2] Test-bed 통합제어 알고리즘

Collection @ chosun



6.2 Test-bed 실험 개요

알고리즘에 대한 검증은 실제 오피스 건축물 규모를 구현하여 구축된 Test-bed를 통 해 진행하고자한다. 또한 Test-bed를 통해 나온 결과 값 비교를 통해 알고리즘의 효용 성을 검증하고자 한다.

본 연구의 실험 개요는 다음의 내용과 같다. 실험은 광주광역시에 위치한 C대학교 태양에너지 실증 연구단지에 구축되어 있는 Test-bed에서 진행하였다. 실험동의 위치는 위도 35.13°, 경도 126.92°에 위치해있으며, 건물의 창호는 커튼월을 선정하고 방향은 남향 174°를 선정하여 일사의 유입을 극대화하였다.

Data수집은 2018년 8월 13일부터 31일까지의 계절상 여름에 해당되는 Data를 사용하 여 개발알고리즘의 오피스 건축물 적용 시 여름철 냉방에너지 절감효과를 확인하고자 하며 측정 간격은 1분단위로 진행하였다.

또한 법정근로시간에 따르면 주간 40시간 1일 8시간 초과할 수 없다는 법적제제가 있으며, 보통의 오피스 건축물의 평균 이용 시간대인 AM. 09시부터 PM.05시까지를 근 로시간으로 사용하고 있으나 오전, 오후 각각 한 시간씩 여유율을 적용하여 AM. 08시 부터 PM.06시까지의 10시간의 Data를 수집하고 재실자가 존재하지 않는 야간시간의 Data는 제외하였다. Test-bed 실험개요에 대한 개요는 아래의 표 6.1과 같다[41].

구분	개요
위치	광주광역시 C 대학 부지
위도/경도	35.13°/126.
방향	남향174°
측정기간	2018년 08월 13일~8월 31일
측정간격	1분
측정시간	AM. 08시 ~ PM.06(10시간)

[표6.1] Test-bed 실험 개요





또한 Data 비교를 위한 Reference Room과의 제어의 차이성을 두었다. Test_Room은 개발한 알고리즘을 적용하여 모든 액티브 설비 시스템 제어를 가동하였고 Ref_Room는 공조기기 제어만을 가동하여 실온도만 유지하였다. 두 가지 Ref_Room의 액티브 설비 시스템 요소별 제어 여부 정리는 아래의 표 6.2와 같다.

액티브 설비 시스템	Test_Room	Ref_Room	
차양	천공청명도 제어	Fully Open	
조명	조도제어	Dimming 100%	
공조	온도제어	온도제어	

[표6.2] 액티브 설비 시스템 요소별 제어 여부



a. Test-bed 전면



b. Test-bed 후면





6.3 통합제어알고리즘의 실증

본 논문에서 개발하는 통합제어알고리즘의 효용성 검증을 위한 실증을 진행하였다. 개발 알고리즘의 제어의 척도가 되는 Clearness Index(천공청명도)에 의한 분류를 통하 여 천공청명에 따른 기초에 Data분석을 진행하고자 하였으나 천공청명도의 특성상 순 시적으로 그 값이 변화하므로 특정 날에 대하여 하루 전체에 대한 대표 천공청명도 값 을 설정하기에 난해한 부분이 있다.

따라서 본 논문에서는 천공의 구름의 양에 따른 운량분류에 따라 담천공, 부분 담천 공, 청천공으로 분류하는 천공청명도와 유사한 개념인 기상청에서 제공하는 하루 평균 구름의 양을 나타내는 평균운량을 척도로 하여 측정기간 동안의 Data를 분류하여 분석 을 진행하였다.

6.3.1 일별 Data 비교

개발알고리즘의 검증을 위한 Data비교를 위하여 각각의 날짜별 비교를 진행하였다. 모든 날짜별 비교를 통한 검증을 진행할 수도 있으나 보다 효과적인 검증을 위하여 앞 서 언급되었던 일평균 운량으로 구분하여 일별 Data 비교를 진행하였다. 일평균 운량 은 0~2(맑음), 3~5(구름 조금), 6~8(구름 많음), 9~10(흐림)으로 구분되며 각각의 단계마 다 해당되는 날을 선정하였다.[42].

본 연구의 측정기간은 물론 8월 한 달 동안 맑음 상태의 운량은 관측되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 구름조금, 구름 많음, 흐림 세 가지 상태의 일별 데이터를 분당 순시 값을 기록하여 비교분석 하고자 한다.

첫 번째 비교군은 평균 운량 3.4로 구름 조금 상태의 8월 21일의 그림 6.4~6.5 Data 를 확인하였다. 타 Data에 비교적 맑은 날에 속하는 날로 하루 전체 분당 액티브 건축 설비시스템 사용량 측면에서는 오전과 야간시간대보다 오후 시간 사용량의 차이가 크 다는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있으며 절감률 역시 오전과 야간시간대에 역전현 상이 발생하며 오전시간에 그 현상이 더 심각하게 나타난다. 그러나 절감률의 평균값 을 확인해 보면 13.13%로 개발 알고리즘이 적용된 Test_Room이 에너지 효율이 더 우



수하다는 결론을 내릴 수 있다.

두 번째 비교군은 평균 운량 6.0으로 구름 많음 상태의 8월 15일의 그림 6.6~6.7 Data를 확인하였다. 그 결과 첫 번째 비교군과 마찬가지로 오전과 야간시간대보다 오 후 시간 사용량의 차이가 크다는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있으며 절감률도 역시 역전현상이 발생하며 오전시간 그 현상이 더 심각하게 나타난다. 그러나 하루 전체 분 당 액티브 건축설비시스템 절감률의 평균값은 12.88%로 구름 많음 상태 역시 구름 조 금 상태와 마찬가지로 개발 알고리즘이 적용된 Test_Room이 에너지 효율이 더 우수하 다는 결론을 내릴 수 있다.

세 번째 비교군은 평균 운량 10.0으로 흐림 상태의 8월 27일의 그림 6.8~6.9 Data를 확인하였다. 그 결과 앞선 구름 조금, 많음 상태와 다른 형상의 그래프가 나왔으며 Test_Room, Ref_Room 모두 에너지 사용률이 매우 유동적인 것으로 나타났다. 그러나 하루 전체 분당 액티브 건축설비시스템 절감률의 평균값은 10.22%로 흐림 상태 역시 개발알고리즘이 적용된 Test_Room이 에너지 효율이 더 우수하다는 결론을 내릴 수 있 으며 결과적으로 평균 운량상태에 따라 개발 알고리즘의 효용성과 유동성의 차이는 있 지만 알고리즘 적용 시 미적용 시보다 어느 상태에서나 효과적이라는 결론이 나온다.

아래의 그림6.4에서 6.9까지는 각각의 날짜의 Data를 그래프로 도식화 하여 나타낸 것이다.









[그림6.5] 구름 조금 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률 비교









[그림6.7] 구름 많음 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률 비교











[그림6.9] 흐림 상태 분당 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률 비교



위의 그래프 분석 결과 구름 조금과 많음 상태인 8월 15일, 21일 그래프에서 오전시 간에 국부적으로 액티브 건축설비시스템 절감률이 역전되는 상황이 발생한다. 일출 일 몰 시간의 낮은 태양고도로 인해 발생하는 일시적 역전형상이라면 좌우 그래프의 대칭 이 이루어져야 맞지만 본 연구의 실증 Data의 그래프는 대칭을 이루고 있지 않다.

또한 Ref_Room은 실의 좌우측이 외피와 직면 하지 않지만 Test_Room의 한쪽 면이 외피와 직면 시 발생하는 부하발생을 예상할 수 있다. 이 부분을 극복하고자 건물 외 벽과 Test_Room과의 공간을 두고 Damper를 설치하여 순환을 통해 열교현상을 극복하 고자 하였다. 또한 그 효과를 확인하고자 열화상 카메라를 촬영하였다.

그 결과 값의 사진은 아래의 그림6.10과 같으며 벽체 부분에서 열교 현상은 발생하 지 않으며 바닥 부분에 상이한 온도가 발견되지만 바닥의 경우 두 개의 실의 조건이 동일하므로 외벽에 직면시 발생하는 열교현상에 의한 현상은 아니라고 판단된다.





[그림6.10] Test-bed 열교현상 확인

따라서 Test-bed 좌측 전면 부에 위치한 철거예정 건축물에 의한 그림자 발생으로 생 긴 영향 여부를 Sketch-up을 통해 확인하고자 하였다. 그 결과 Test-bed 전면 부 건물에 의해 오전시간에 그림자가 발생하며 직접적으로 도달하지는 않지만 Test-bed로 유입되 는 일사에 영향이 생겨 액티브 건축설비시스템 절감률 측면에 문제가 발생된다고 예상 된다.

이 현상을 다른 측면으로 해석하자면 건물이 밀집되어 있는 도심지에서 발생할 수 있는 현상이라고 짐작할 수 있으며 액티브 건축설비시스템 절감률 측면에서 역전현상 이 발생하지만 전체 값을 놓고 봤을 때 AM08:00부터 11:00까지 8월 15일은 11.55% 8 월 21은 6.60%로 액티브 건축설비시스템 절감 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다.









b. 09:00



[그림6.11] Test-bed 전면 부 건물 그림자 영향





6.3.2 주간 Data 비교

개발알고리즘의 효용성 검증을 위하여 주간 Data비교를 실시하였다. 한 주의 기준은 오피스 건축물에 재실자가 거의 존재하지 않을 시기인 주말은 제외하고 주 5일 총 3주 간의 Data 비교를 진행하였다.

1주차인 8월 13일부터 8월 17일까지의 Data를 비교한 결과 개발 알고리즘의 적용 시 일 단위 상시 액티브 건축설비시스템 절감효과가 있으며, 최소 13%에서 최대 21%까지 의 절감률을 나타내는 것으로 나타났다.

2주차인 8월 20일부터 8월 24일까지 Data를 비교한 결과 1주차와 마찬가지로 개발 알고리즘의 적용 시 일 단위 상시 액티브 건축설비시스템 절감효과가 있으며, 최소 15% 최대 25%까지의 절감률을 보였다.

마지막 주차인 8월 27일부터 8월 31일까지의 Data역시 모든 일에서 개발알고리즘의 절감효과가 나타났으며, 그 효과는 최소 20%에서 최대 31%까지의 절감률을 보였다.

측정기간 동안의 모든 Data를 비교한 결과 매주 개발알고리즘의 절감효과는 발생하 였으며 그 효과는 최소 13%에서 최대 31%까지 나타났으며, 그림 6.11~6.13을 통해 확 인할 수 있다.

총 3주간의 Data에서 개발알고리즘의 절감효과는 증명되었지만 주차별로 절감효과가 상이하다는 결과를 확인할 수 있다. 이는 매주 발생하는 Test_Room과 Ref_Room과의 에너지 사용량의 절대량 차이와 온도변화를 확인하면 파악이 가능하다.

3주간의 Test_Room과 Ref_Room과의 총 액티브 건축설비시스템 사용량의 차이는 약 19KWh로 유사하지만 계절이 점차 중간기로 접어들면서 평균온도 하락과 동시에 전체 공조에너지 사용량이 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이는 똑같은 절감량을 가질지 라도 전체 액티브 건축설비시스템 사용량이 줄어들면서 반비례적으로 절감률은 커지는 현상을 확인할 수 있다.

다른 측면으로 해석하자면 평균기온이 하락함에도 매주 똑같은 액티브 건축설비시스 템 절감량을 갖는 다는 의미는 본 연구의 개발 알고리즘 적용 시 봄과, 가을과 같은 중간기에도 효과가 있을 것 이라는 것을 추정할 수 있으며 이는 곧 연간 에너지 사용 량 측면에서도 효과가 있을 것이라고 추정된다.

아래의 그림 6.12~6.14는 위의 분석내용을 그래프로 도식화하여 나타낸 것이다.

- 76 -







[그림6.12] 1주차 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교



[그림6.13] 2주차 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교



[그림6.14] 3주차 액티브 건축설비시스템 에너지 총 사용량 비교

Collection @ chosun

6.3.3 측정기간 전체 Data 비교

총 3주간의 개발 알고리즘 적용 결과를 알아보기 위하여 측정기간 전체 Data의 Test_Room과 Ref_Room과의 비교분석을 진행하였다. 그 결과 총 15일간 각각의 Room 간의 하루 액티브 건축설비시스템 총 사용량 비교 결과 개발알고리즘이 적용된 Test_Room이 측정기간 내내 절감된 사용량을 나타냈다.

또한 각 날짜별 액티브 건축설비시스템 총 사용량에 대한 절감률을 확인 한 결과 모 든 날짜에서 약 최소 13% 최대 31%까지의 에너지 절감효과가 나타났고 전체 절감률 은 약 20%정도를 보였다. 또한 일평균 운량 Data와 비교하여 나타낸 결과 일평균 운량 의 수치가 높을 때 절감률도 높아지는 비슷한 형상을 띄는 것을 확인할 수 있다.

그 원인 분석을 위해 각각의 액티브 설비 시스템 별로 분류하여 전력사용량을 파악 한 결과 차양부분의 전력사용은 Test_Room에서만 발생하지만 그 사용량이 미비하여 전체 절감률이 영향을 미칠 정도가 아니며, 조명의 경우에 Ref_Room의 조명 사용량은 고정적이지만 Test_Room은 일평균 운량의 수치가 높은 경우 오히려 사용량이 증가하 여 전체 절감률에는 마이너스 영향을 나타내었다.

마지막 공조부분에서 일평균 운량의 수치가 높아지는 경우 그 절감률의 폭이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 원인파악을 위해 일평균 운량이 낮은 맑은 날과 비교하였을 때 Test_Room과 Ref_Room의 총 에너지 절감의 절대량 차이를 비교한 결과 그 값은 유사하지만 절감율에서만 차이가 나며 그 원인은 내부 열부하에 영향을 미치는 외부 일사가 구름에 의해 거의 가려진 상태에서 순간적으로 발생하는 일사에 대해 Test_Room은 차양 장치를 이용하여 더욱 완전히 일사 부하를 차단하는 반면 Ref_Room은 그마저도 적극수용하면서 일사에 의한 부하가 발생하고 이때 Test_Room 과의 차이가 극대화되는 것으로 나타났다.

위의 분석을 통해 개발알고리즘 적용 시 흐린 날에도 그 효과가 존재하거나 더 증폭 되며 일사부분에 있어 순시적으로 미세한 컨트롤까지 가능하다는 것을 파악할 수 있 다. 다음의 그림 6.15, 6.16는 날짜별 액티브 건축설비시스템 총 사용량 및 절감률과 평 균운량과의 상관관계를 그래프로 도식화하여 나타낸 것이다











[그림6.16] 날짜별 액티브 건축설비시스템 에너지 절감률, 평균운량수치 비교





6.4 소결

본 연구를 통해 개발한 알고리즘의 효용성 검증을 위한 실증실험결과, 액티브건축설 비시스템에 대한 일별, 주간별, 계절별 단위에서의 실증효과가 기존 미제어 시 액티브 건축설비시스템대비 건물에너지절감에 효과가 매우 큰 것으로 증명되었다.

하루전체 순간단위로 입력되는 Data값은 국부적으로 Test_Room의 에너지 사용량이 Ref_Room을 역전하는 경우가 발생하였지만 이는 Test-bed 전면 부 철거건축물의 영향 이며 그 영향 속에서도 에너지 절감은 실현되었다. 그로 인해 도심지에 개발알고리즘 을 적용하여도 효과가 있을 것이라고 추정할 수 있다.

일 전체 사용량 측면에서는 하루도 전체 사용량이 역전되는 경우가 없어 개발 알고 리즘의 효과가 증명되었고 최소 13% 최대 31%까지의 효과가 있는 것으로 나타났다. 이때 하절기 막바지로 들어가면서 일평균온도가 하락함에도 반대로 에너지 절감률은 상승하거나 동등한 효과가 나타났다. 이로 인해 여름철 냉방에너지 절감을 목적으로 개발된 알고리즘이지만 실온도 유지에 있어서는 중간기인 봄과 가을에도 효력이 있을 것으로 판단할 수 있다.

측정기간 전체 사용량 비교 측면에서는 약 20%의 절감률을 보였으며 절감률 추세가 일평균운량의 수치와 비례하다는 것을 파악하였다. 이는 천공에 구름의 양이 많을수록 절감효과가 좋다는 뜻이며 앞선 6.3.3에서의 해석을 통해 알 수 있듯이 흐린 날 급작스 럽게 들어오는 일사에 대해 대처하기 위한 미세한 컨트롤이 가능하며 이로 인해 절감 률의 폭이 커진다는 것으로 판단할 수 있다.

또한 전체 건물 에너지 절감률 20%의 의미는 본 연구에서 개발한 알고리즘이 신재 생 시스템의 에너지 생산량에는 직접적인 관계는 없다. 그러나 에너지 자립률 측면의 관점에서 제로에너지 건축물 인증 에너지자립률 등급과 비교해 보았을 때, 에너지 자 립률 한 등급에 해당하는 절감률인 것을 알 수 있으며, 건물전체로 확장하면 액티브건 축설비시스템의 효율적인 제어만으로 건물에너지 자립률을 한 등급 올릴 수 있어서 그 에 해당하는 신재생에너지의 분담률을 크게 줄일 수 있는 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다[43].





ZEB 등급	에너지자립률
1등급	에너지자립률 100% 이상
2등급	에너지자립률 80이상 100%미만
3등급	에너지자립률 60이상 80%미만
4등급	에너지자립률 40이상 60%미만
5등급	에너지자립률 20이상 40%미만

[표6.3] 제로에너지건축물인증 에너지자립률 등급

[표6.4] Test-bed 측정 결과 정리

구분		절감률	비고		
분 단위		펴규 140/ 내외	순시적인 사용량 역전현상 분석을 통		
		0번 14/0 네뇌	해 도심지 적용효과 예측 가능		
일 단위	최소	13%	평균기온 상승과 비교 결과 중간기 적		
	최대	31%	용효과 예측 가능		
측정기간 전체		200/	흐린 날 급작스런 일사 유입에 대한		
		20%	미세한 컨트롤 가능 판단		





제7장 결론

본 연구에서는 오피스 건축물 여름철 냉방에너지 절감을 위해 액티브 건축설비시스 템인 차양, 공조, 조명의 개별 알고리즘을 제시하였고, 일사량이라는 단일 물리지표로 전체 시스템 제거가 가능한 통합제어 알고리즘 개발을 통해 전체 건물에너지 절감을 구현하고자 하였다. 또한 개발한 알고리즘의 효용성 검증을 위하여 Test-bed를 구축하 였고 실제 여름철 실증 Data를 통해 기존 건물에너지 사용량 대비 개발알고리즘 적용 시 건물에너지 절감효과를 확인하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 차양 시스템 제어 알고리즘 개발

직사일광 유입깊이에 따른 지능형 차양시스템의 자동제어 알고리즘은 건물과 태양이 이루는 일영각을 기준으로 산출이 되어 알고리즘 로직을 설정하였고, 외부 환경에 대 응하는 지능형 차양제어가 가능하도록 천공청명도(K_T) 값에 기반 한 제어알고리즘을 개발하였다.

천공청명도에 따른 기상조건 설정을 위해 Erbs Model, Orgill and Hollands Model 을 제시하였고, 본 연구에서는 중간 값인 $K_T < 0.3$ 일 때 담천공, $0.3 \le K_T < 0.8$ 일 때 부 분담천공, $0.8 \le K_T$ 일 때 담천공으로 설정하여 개발하였다.

2) 공조 시스템 제어 알고리즘 개발

공조 시스템 제어 알고리즘은 실내로 유입되는 예측 일사량에 대한 산정식을 개발하 였고, 이를 기반으로 실내 일사 유입량을 예측하였고 태양열 취득계수를 통하여 실내 열부하를 산정하였다. 산정된 열부하를 가지고 그에 반응하는 공조기기 냉방 제어 알 고리즘을 개발하였다.



3) 조명 시스템 제어 알고리즘 개발

조명시스템의 제어 알고리즘은 공조시스템과 마찬가지로 직산분리 된 각각의 일사요 소를 Perez Model을 적용하여 실내유입 일조량으로 변환하여 유입일조량을 예측하였고 이에 따른 예측유입일조량을 기반으로 인공조명 Dimming 제어시스템의 제어 보정 값 으로 설정하여 알고리즘을 개발하였다.

4) 통합 시스템 제어 알고리즘 개발

본 연구에서 개발한 액티브건축설비시스템의 각 요소별 제어 알고리즘을 기반으로 차양, 조명, 자연채광, 공조를 통합제어 가능한 알고리즘을 개발하였다. 본 연구의 Test-bed를 통한 실증결과 전체 액티브건축설비시스템을 외부 전천공 일사량 하나의 물 리지표를 통해 전체 액티브건축설비시스템 제어가능 여부를 확인하였다. 또한 액티브 건축설비 시스템의 에너지 사용량을 제어 방식만으로 약 20%까지 절감하는 것을 증명 하였다.

통합제어 알고리즘을 통한 건물에너지 20%절감의 의미는 제로에너지 건축물 인증제 도 한 등급에 해당하며, 건물전체로 확장하면 신재생에너지의 분담률을 크게 줄일 수 있으며 신재생에너지 역시 일사량에 의한 제어가 이루어져 신재생으로의 확장 시 추가 요소에 대한 절감 또한 효과로 얻을 것으로 예상된다.



◎향후연구계획

본 연구에서 정의한 액티브건축설비시스템은 차양, 조명, 공조시스템을 의미한다. 저 에너지 건축물 구현을 위한 세 가지 기술요소로는 패시브 기술, 액티브 기술, 신재생 에너지를 예로 들 수 있는데, 본 연구에서 주제로 다루고 있는 액티브건축설비시스템 은 액티브 기술요소에 포함이 된다. 또한 보다 효율적인 저에너지 건축물 구현을 위해 서는 액티브건축설비시스템의 신재생 발전시스템과 결합이 되었을 때 효과가 극대화 될 수 있다.

따라서 향후 연구과제는 액티브건축설비시스템의 통합제어 알고리즘과 신재생 발전 시스템의 발전량을 결합한 수요반응 형 통합제어시스템으로의 확장이 필요하며 이것은 최근 연구과 활발히 이루어지고 있는 BEMS(건물에너지관리시스템, Building Energy Management System, 이하 BEMS)의 최종 목표와 부합하므로 이에 대한 연구를 향후 진 행할 계획에 있다.





참고문헌

- [1] International Energy Agency(IEA), CO2 Emissions from Fuel Combustion, 2012
- [2] 관계부처합동, 제1차 기후변화대응 기본계획, 2016
- [3] IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland pp. 151, 2014
- [4] 기상자료개발포털 https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do, 검색일자 : 2018년 07월 21일
- [5] 국토교통부, 지역 녹색건축물 조성계획 수립 매뉴얼, 2015.
- [6] British Petroleum, BP Statistical Review of World Energy, 2011.
- [7] 에너지 관리공단, 기후변화대응 건물에너지 정책 포럼 발표자료, 2008
- [8] U.S. Department of Energy, 2010 Building Energy Data Book, 2011
- [9] 지식산업정보원, 『제로에너지 건축물 신기술 동향분석-그린리모델링/에너지/건자 재/조명-』 pp. 47, 2017
- [10] 이선우, 조명에너지와 냉난방에너지 절약을 위한 베네시안 블라인드의 최적 제어, 서울대학교 박사학위논문, 2015
- [11] 양자강, 사무용 건물의 에너지 절감을 위한 요소별 에너지 성능 분석에 관한 연 구, 고려대학교 석사학위논문, 2016
- [12] 박영준, 백주영, 김지현, 여명석, 김광우, 하절기 자동 블라인드 적용에 따른 환경 성능에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제26권, 제1호, 2006
- [13] 김덕우, 박철수, 최적화 알고리즘을 이용한 실내 블랑인드 최적제어 전략, 한국건 축친환경설비학회 추계학술발표대회 논문집 pp. 5, 2008
- [14] 강기남, 박준원, 강규민, 정정화, 송두삼, 시뮬레이션을 통한 공조, 조명 및 블라인 드를 연계한 통합제어시스템의 성능 평가에 관한 연구, 대한설비공학회 하계학술 발표대회 논문집 pp. 222~228, 2012
- [15] A. Guillemin, N. Morel, An Innovative Lighting Controller Intergrated in a Self-Adaptive Building Control System, Energy and Buildings, 2001





- [17] H. Mutso, 省エネルギーと環境, 快適性を考慮した協調制御に關する研究, 日本建築 學會大會學術講演梗概集, 2004
- [18] 한국에너지공단, 국토교통부, 건축물의 에너지절약 설계기준 설명서, 2017.
- [19] Korean Srandartds Service Network, KS C 9306, Domestic Air Conditioner Cooling Capacity Conversion Table, 1991
- [20] Basics for measuring optical radiation, AHLBORN (<u>http://www.ahlborn.com/en_UK/opti</u> cal-radiation), 검색일자 : 2018년 10월 21일
- [21] T-10A and T10MA illuminance Meters, KIONICA MINORTA(<u>https://sensing.konicamin</u> olta.us/products/t-10a-t-10ma-illuminance-meters/), 검색일자 2018년 10월 21일
- [22] 국토해양부, 건축기계설비 설계기준 pp. 47 표 2.32, 2016
- [23] EHL16-2CR, E&S TEC(<u>http://www.selfcable.com/?page_id=439</u>), 검색일자 2018년 11 월 1일
- [24] 백주영, 김지헌, 여명석, 김광우, 오피스 건물의 재실자 블라인드 사용실태 분석, 대한건축학회논문집 계획계, 2006
- [25] D. G. Erbs, S. A. Klein, J. A. duffie, Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-average Global Radiation, Solar energy. 1928
- [26] J. F. Orgill, K. G. T. Hollands, Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface, Solar Energy, 1977.
- [27] 박웅규, 강규민, 박준원, 이상엽, 송두삼, 일사 차폐 장치가 있는 외피의 실내 유입일사량 산출 방법, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집 pp. 155~161, 2012
- [28] Sokol Dervishi, Ardeshir Mahdvai, Computing Diffuse Fraction of Global Horizontal Solar Radiation : A Model Comparison, Solar energy, 2012
- [29] Masanori Shukuya, Environmental Architecture in Light and Heat by Numerical Study, Maruzen Co. Ltd, 1993
- [30] Stefano Paolo Corgnati, Experimental assessment of the performance of an active transparent facade during actual operating conditions, Solar Energy, 2007



- [31] Solar Protection Devices Combined with Glazing-Calculation of Solar and Light Transmittance-Part 1: Simplified Method, DIN EN 13361-1, 2007
- [32] 슈쿠야 마사노리, 송두삼 ,황태연 공역, 빛과 열의 건축환경학 pp. 127, 2014
- [33] 최정민, 조성우, 자연대류열전달계수와 강제대류열전달계수에 따른 대류열전달특 성에 관한연구, 대한건축학회논문집 계획계 제27권 pp. 205~212 제6호, 2011
- [34] Korean Srandartds Service Network, KS A 3011 Recommended levels of illumination, 1998
- [35] M. Shukuya, Environmental Architecture in Light and Heat by Numerical Study, Maruzen co, 1993
- [36] S. Janjai, R. Wattan, M. Nunez, A statistical approach for estimating diffuse illuminance on vertical surfaces, Building and Environment, 2009
- [37] R. Perez et al., A New simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces, Solar Energy, 1987
- [38] Vartiainen. E, Peippo. K, Lund. P, Daylight Optimization of Multifunctional Solar Facades, Solar Energy, Vol. 68, Issue 3 pp.223~235, 2000
- [39] ISO7730, Moderate Thermal Environments Determination of the PMV and PPD Indices and Spercification of the Conditions of Thermal Comfort, ISO, 1984
- [40] 박지우, 안병립, 김종훈, 정학근, 장철용, 송규동, 사무소건물의 LED조명기구 방열 장치의 성능 분석 연구-덕트 내 유량변화를 중심으로-, KIEAE Journal, Vol. 14. no.6 pp.81~86, 2014
- [41] 고용노동부, 근로기준법 제50조, 2018
- [42] 기상청국가기상종합정보, 지상관측자료,(http://www.weather.go.kr/weather/climate/ past_cal.jsp?stn=108&yy=2018&mm=8&obs=1&x=16&y=10), 검색일자 : 2018년 11월 15일
- [43] 국토교통부. 산업통상자원부, 제로에너지건축물 인증제도, 2017





부록

SSCI 논문게재 실적

- 학 술 지 : SUSTAINABILLITY
- 집 권 호 : Vol. 10, Iss, 11
- 논 문 명 : Advanced Dimming Control Algorithm for Sustainable Building by Daylight Responsive Dimming System
- I S S N : 2071-1050
- 발행일자 : 2018. 11. 07









Article Advanced Dimming Control Algorithm for Sustainable Buildings by Daylight Responsive Dimming System

In-Tae Kim¹, Yu-Sin Kim¹, Hyeonggon Nam² and Taeyon Hwang^{2,*}

- Lighting Platform Research Center, Korea Photonics Technology Institute (KOPTI), Gwangju 61007, Korea; itkim@kopti.re.kr (I.-T.K.); yskim@kopti.re.kr (Y.-S.K.)
- ² School of Architecture, Chosun University, Gwangju 61452, Korea; hyeonggon.nam@chosun.kr
- * Correspondence: taeyon.hwang@chosun.ac.kr

Received: 17 October 2018; Accepted: 5 November 2018; Published: 7 November 2018



Abstract: This study aims to evaluate the accuracy and energy savings of a daylight responsive dimming system (DRDS) when considering the influence of indirect illuminance. In the case of the existing DRDS, during the calibration process of each luminaire, the other luminaires were turned off to detect the illuminance of both the luminaire and the incoming daylight. However, the work plane illuminance under the luminaires was affected by the indirect illuminance from the other luminaires. The final work plane illuminance would thus be higher than the target illuminance during real system operation. To improve the accuracy and energy savings of the DRDS, an improved dimming control algorithm was applied to the DRDS when considering the influence of indirect illuminance. The real-time power consumption and accuracy of the target illuminance of the DRDS when considering the influence of an analyzed (for 23 days, from 22 June to 18 July 2018). As a result, the average accuracy of the target illuminance was 98.9% (SD 0.5%), and the average saving in lighting energy was 77%.

Keywords: LED dimming system; energy savings; daylight; indirect illuminance

1. Introduction

1.1. Study Objective

Since the 1997 Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, the international community has been pursuing various policies to cope with climate change. The Republic of Korea has announced its greenhouse gas emissions reduction goals. To fulfill these goals, research and development has been actively carried out to reduce the greenhouse gas emissions and energy consumption in each field. In the field of architecture, which accounts for 25% of the total greenhouse gas emissions in the Republic of Korea, for example, a zero-energy building activation policy is being implemented to reduce the energy consumption of buildings by more than 90% when combining energy consumption and production [1]. To realize a zero-energy building, it is necessary to improve the efficiency of the facilities used in the building and to actively utilize renewable sources of energy. Among the various facilities of a building, the lighting installation occupies a relatively high proportion of about 20% of the total energy used [2]. To reduce the energy consumption of a lighting installation, LED luminaires with the advantages of high efficiency and a long life are used. In addition, studies were implemented to increase daylight availability and daylight factor through architectural design [3–8]. To further reduce the energy consumption of the lighting, a DRDS that utilizes daylight incident to an indoor area is typically used.

Sustainability 2018, 10, 4087; doi:10.3390/su10114087



Sustainability 2018, 10, 4087

The DRDS predicts the work plane illuminance by measuring the daylight incident to the indoor area through a photosensor installed on the ceiling or in the luminaire itself. If the predicted work plane illuminance exceeds the set target illuminance, the luminaire is turned off, and if it does not meet the target illuminance, the luminaire is dimmed based on the insufficient illuminance value. According to previous research, the saving in lighting energy achieved through daylight responsive dimming is about 60-80% on average [9]. This saving is a theoretical value that requires an accurate prediction of the work plane luminance, and precise control of the dimming. With a conventional DRDS, it is difficult to accurately predict the work plane illuminance, and the theoretical saving in lighting energy is not achieved when applying a simple dimming control algorithm. The simple dimming control algorithm applied to a conventional DRDS uses a direct illuminance learning method, which learns the work plane illuminance value of only a single point, and the value of a photosensor attached to the luminaire according to the available dimming level. This learning method is not suitable because an actual luminous environment is indirectly influenced by many luminaires at the same time. Therefore, in this study, a dimming control algorithm was developed that considers the indirect illuminance affecting the work plane illuminance as a way to improve the energy saving of the DRDS, and the target illuminance accuracy and saving in lighting energy were analyzed. The term of "indirect light" is generally used to indicate light reflected from non-emitting surfaces. In this paper, the term of "direct light" was used to indicate incident light from a specific luminaire to the work plane at a position directly under the specific luminaire. Also, the term of "indirect light" was used to indicate incident light from the other luminaires except the specific luminaire to the work plane at a position directly under the specific luminaire.

1.2. Previous Research

Several previous studies have analyzed the accuracy and energy saving of a DRDS. Al-Ashwal and Budaiwi (2011) investigated the energy performance of office buildings resulting from an integration of daylight and artificial lighting in hot climates according to the window design, including the window area, height, and glazing type. The results showed that as much as a 35% reduction in lighting energy consumption can be achieved using daylight and artificial lighting integration [10]. Fernandes et al. (2013) evaluated the lighting energy saving of split-pane electrochromic (EC) windows controlled to satisfy key visual comfort parameters. Using Radiance lighting simulation software, the interior illuminance and luminance levels were computed for a south-facing private office illuminated by a window split into two independently controlled EC panes. Depending on the work plane illuminance for which the electrochromics were controlled, the energy savings ranged from 43% to 67% [11]. Caicedo et al. (2011) proposed a control method for achieving a target illuminance at the workspace plane using illuminance measurements from light sensors situated on the ceiling, as well as additional prior information from a sensor calibration. The proposed method achieved 10% less power savings on average than when the light sensors were located at the workspace plane [12]. Yoo et al. (2014) calculated the distribution of daylight illumination into an office, as well as the dimming ratios for individual control of LED lights using light simulation software. As a result, the power consumption of electrical lighting was reduced by 40–70% depending on the season and weather conditions [13]. Gentile and Dubois (2017) investigated the effectiveness of lighting control systems in office rooms located in Lund, Sweden. This study used simulations based on the actual occupancy data. The simulations focused on the portion of standby energy use on the total lighting energy use. The results showed that the standby energy use accounts for about 30% of the total lighting energy use, but it can increase up to 55% in extreme cases [14]. Nagy et al. (2015) presented an occupant-centered lighting control strategy and its successful implementation through a case study. A double-blind occupancy study was conducted, and the system performed as intended, adapting well to the occupants and achieving significant energy savings. The best result achieved was a 37.9% energy saving compared to the baseline mode, and 73.2% compared to the worst-case situation, for an all-day lighting mode [15]. Gentile et al. (2016) presented the results of a monitoring study according to four different lighting





Collection @ chosun

Sustainability 2018, 10, 4087

control systems (a manual switch at the door, a presence detector, daylight dimming with an absence detector, and an LED task lamp). The energy performance of the manual switch with an absence detector was 75%. The daylight-linked lighting control systems achieved only slightly higher savings (79%) owing to the relatively high standby losses. The desk lamp achieved an energy saving of 97% [16]. Kaminska and Ożadowicz (2018) evaluated reduced energy consumption from lighting in non-residential buildings equipped with KNX. The energy savings of offices were 28%, and in educational buildings, energy savings totaled 24% [17].

In a previous study related to lighting control according to occupancy patterns and daylight, Yun et al. (2012) reported field survey results on the illuminance distributions, occupancy, and lighting use patterns, as well as the resulting lighting energy demand. No significant relationships were found between the available daylight and the use of lighting by the occupants. The lighting use patterns are significantly related to the occupancy patterns [18]. Pandharipande and Caicedo (2011) considered an energy-efficient illumination control design of LED-based lighting systems in office spaces. The goal of this study was to determine the optimum dimming levels of the LED sources to minimize the power consumption while rendering a uniform illumination at a given illumination level in occupied workspace regions, and a minimum illumination level of the lower value in unoccupied regions, while taking the daylight distribution over the workspace plane into account. As a result of this study, the power saving was 55–57% according to an overlap in occupancy [19].

Other previous studies suggested the use of a dimming control algorithm when considering indirect illuminance. Wang and Tan (2013) developed an illumination control for LED systems based on a neural network model and energy optimization algorithm when considering indirect illuminance. This study developed a dimming control algorithm considering indirect illuminance; however, the dimming control algorithm of this study can be applied to the DRDS, whereas the dimming control algorithm of our study cannot be applied to the DRDS [20]. Choi et al. (2016) suggested an "indirect illuminance" concept (method B) to improve the system performance and predict the potential savings in the lighting energy of a system. Certain inherent problems caused by the open-loop proportional control algorithm used were identified, and the energy saving potential of this method was 36.9–73.8% [21].

In a previous study related to predicting indoor illuminance by daylight, Yun and Kim (2018) developed the algorithm of the calculation formula from sky luminance distribution to vertical illuminance and indoor illuminance. Yun and Kim proposed a method to analyze the sky conditions using HDRI with a CCD camera [22]. Park et al. (2011) developed the improved closed-loop proportional control algorithm for the integrated systems to predict the varying correlation of photosensor signal to daylight work plane illuminance according to roller shade height and sky conditions for the improvement of the system accuracy [23].

In addition, Parise and Martirano (2013) suggested a criterion for evaluating the yearly daylight impact on the energy saving of internal lighting according to the daylight availability, the lighting system layout, and the control system arranged using a daylight lumen method [24]. Ul Haq et al. (2014) reviewed various existing technologies used for lighting control according to the input parameters, their control method, the control algorithm, the cost of installation, and the complexity of commissioning, among other factors. This study aimed at investigating the various control system types, the development of their associated technologies, the saving reported from their application, and the factors affecting their performance [25].

In summary, previous studies have examined the energy savings of DRDS; however, most of the studies have used a direct illuminance learning method or a simulation case study. Therefore, in this study, the real-time power consumption and target illuminance accuracy of the DRDS when considering the influence of indirect illuminance on a full-scale mock-up were measured and analyzed.



Sustainability 2018, 10, 4087

2. Daylight Responsive Dimming System (DRDS)

2.1. System Works of Conventional DRDS

A DRDS analyzes the sky conditions through an external solar radiation sensor, as shown in Figure 1, and measures the amount of incident daylight into the room through a photosensor attached to the luminaire. Based on the measured amount of incident daylight in the photosensor, the work plane illuminance is predicted through the slope of the pre-learned photosensor/work plane illuminance. To consistently maintain the work plane at the target illuminance and save energy, if the predicted work plane illuminance exceeds the set target illuminance, the luminaire is turned off, and if it does not meet the target illuminance, the luminaire is dimmed based on the insufficient illuminance value. The photosensor can detect the difference between daylight and electric lighting by comparing the initial photosensor value and final photosensors can detect only the changed amount of incident daylight based on the detected difference between daylight and electric lighting.



Figure 1. Concept of the daylight responsive dimming system (DRDS).

2.2. Conventional Dimming Control Algorithm (Direct Illuminance Learning Method)

The direct illuminance learning method is a method for learning the work plane illuminance and the photo-sensor value according to the dimming level of the luminaire at night. As shown in Figure 2, an illuminance meter is installed at a position directly under the luminaire. The values of the work plane illuminance directly under the luminaire and the photosensor are both logged according to the dimming level of each luminaire. For example, when learning about luminaire 1, the values of the work plane illuminance directly under luminaire 1 and the photosensor attached to luminaire 1 are logged according to the dimming level of the luminaire. At this time, the values of the work plane illuminance directly under luminaire 2 and the photosensor attached to luminaire 2 are not learned. Likewise, when learning about luminaire 2, only the values of the work plane illuminance directly under luminaire 2 are learned.

Collection @ chosun


(a)



(b)

Figure 2. System process of direct illuminance learning methods: (**a**) learning process for luminaire 1, (**b**) learning process for luminaire 2.

The direct illuminance learning method is relatively simple and is able to learn the necessary information in a short period of time. However, when applied to an actual luminous environment, the work plane illuminance exceeds the target illuminance owing to the influence of indirect illuminance by the other luminaires (Figure 3).



Figure 3. Actual luminous environment affected by direct and indirect illuminance.

If the photosensor attached to the luminaire recognizes that the work plane illuminance has been exceeded, the luminaires are dimmed by the amount of target illuminance exceeded. The direct illuminance learning method algorithm does not recognize whether the excess illuminance is influenced by the indirect illuminance of the other luminaires, however. For this reason, the luminaires are excessively dimmed. As shown in Figure 4, the DRDS applying a direct illuminance learning method maintains the target illuminance by repeating the process of exceeding and not exceeding the target illuminance. Depending on the particular case, when the target illuminance is converged after a repetition of about 10 to 30 times, if the system is set for control once per minute, the lighting energy is over-consumed, and the occupant may feel visual discomfort for about 10 to 30 min (Figure 4a). In addition, when the indirect illuminance component is larger than the direct illuminance component, the illuminance diverges without convergence to the target illuminance, and the target illuminance cannot be maintained (Figure 4b).

For example, assuming that the direct illuminance directly under an individual luminaire (when the dimming level is 100%) is 500 lx, and the total amount of illuminance (direct + indirect) directly under an individual luminaire (when the dimming level is 100%) is 1010 lx, each luminaire will illuminate at 100% to maintain the target illuminance of 500 lx. When all luminaires are turned on at







100%, the work plane illuminance reaches 1010 lx, which exceeds 510 lx. To reduce the illuminance, the luminaires are completely turned off and diverge without converging to the target illuminance (Figure 4b).



Figure 4. Maintaining the target illuminance of the daylight responsive dimming system applying the direct illuminance learning method: (a) convergence and (b) divergence cases.

2.3. Proposed Dimming Control Algorithm (Indirect Illuminance Learning Method)

To solve the shortcomings of the direct illuminance learning method, this study proposes a learning method that considers the influence of indirect illuminance. Indirect illuminance learning is conducted at night when the daylight is not incident, as in a direct illuminance learning method. Unlike a direct illuminance learning method, the work plane illuminances of all points and the photosensor values of all luminaires are logged according to the dimming level per luminaire (Figure 5).



Figure 5. System process of indirect illuminance learning methods: (a) learning process for luminaire 1, (b) learning process for luminaire 2.

Assuming that six luminaires are installed in a room where daylight is incident, as shown in Figure 6, the final work plane illuminance (ET1) at a position directly under luminaire 1 can be defined as in Equation (1). The final work plane illuminance is referred to as the sum of the direct illuminance, indirect illuminance, and daylight illuminance. Based on Equation (1), the final work plane illuminance (ETj) of the other points can be calculated using the standardized Equation (2).







Figure 6. Calculation method of direct and indirect illuminance.

$$ET_1 = ED_1 + E_{11} + E_{21} + E_{31} + E_{41} + E_{51} + E_{61}$$
(1)

 ED_1 = Work plane illuminance at the position directly under the luminaire (1) by daylight; E_{ij} = Work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*j*) by luminaire (*i*);

$$ET_j = ED_j + \sum_{i=1}^n E_{ij} \tag{2}$$

 ET_j = Final work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*j*); ED_j = Work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*j*) by daylight n = Number of luminaires.

When the target work plane illuminance at each point is set to 500 lx, assuming that ED1 is 200 lx, the required illuminance at a position directly under luminaire 1 (ER1) can be calculated through the following Equation (3). The required illuminance at a position directly under luminaire (j) (ERj) can be defined through Equation (4) based on Equation (3).

$$\sum_{i=1}^{6} E_{i1} = ET_1 - ED_1 = 500lx - 200lx = 300lx = ER_1$$

$$E_{11} + E_{21} + E_{31} + E_{41} + E_{51} + E_{61} = ER_1 \\ E_{12} + E_{22} + E_{32} + E_{42} + E_{52} + E_{62} = ER_2 \\ E_{13} + E_{23} + E_{33} + E_{43} + E_{53} + E_{63} = ER_3 \\ E_{14} + E_{24} + E_{34} + E_{44} + E_{54} + E_{64} = ER_4 \\ E_{15} + E_{25} + E_{35} + E_{45} + E_{55} + E_{65} = ER_5 \\ E_{16} + E_{26} + E_{36} + E_{46} + E_{56} + E_{66} = ER_6$$
(3)

If the regression equations of the work plane illuminance according to the dimming level when using the indirect illuminance learning method are defined through Equation (5), Equation (4) can be defined as a simultaneous linear equation with six variables, as shown in Equation (6).

$$E_{ij} = IE_{ij}g(L_j) \tag{5}$$

 $g(L_j)$ = Regression equation of work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*j*) according to the dimming level of luminaire (*j*);





 IE_{ij} = Proportion of work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*i*) and work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*j*) by luminaire (*i*).

$$IE_{11g}(L_1) + IE_{21g}(L_2) + IE_{31g}(L_3) + IE_{41g}(L_4) + IE_{51g}(L_5) + IE_{61g}(L_6) = ER_1$$

$$IE_{12g}(L_1) + IE_{22g}(L_2) + IE_{32g}(L_3) + IE_{42g}(L_4) + IE_{52g}(L_5) + IE_{62g}(L_6) = ER_2$$

$$IE_{13g}(L_1) + IE_{23g}(L_2) + IE_{33g}(L_3) + IE_{43g}(L_4) + IE_{53g}(L_5) + IE_{63g}(L_6) = ER_3$$

$$IE_{14g}(L_1) + IE_{24g}(L_2) + IE_{34g}(L_3) + IE_{44g}(L_4) + IE_{54g}(L_5) + IE_{64g}(L_6) = ER_4$$

$$IE_{15g}(L_1) + IE_{25g}(L_2) + IE_{35g}(L_3) + IE_{45g}(L_4) + IE_{55g}(L_5) + IE_{65g}(L_6) = ER_5$$

$$IE_{16g}(L_1) + IE_{26g}(L_2) + IE_{36g}(L_3) + IE_{46g}(L_4) + IE_{56g}(L_5) + IE_{66g}(L_6) = ER_6$$
(6)

To calculate the simultaneous equations, the equations in (6) were converted into a matrix, as shown in Equation (7). The inverse roughness ratio matrix of Equation (7) was transformed into Equation (8) by taking the inverse matrix and multiplying both sides. By converting Equation (7) into Equation (8), it is possible to calculate the dimming level that satisfies the required illuminance value of each point.

$$\begin{pmatrix} IE_{11} & IE_{21} & IE_{31} & IE_{41} & IE_{51} & IE_{61} \\ IE_{12} & IE_{22} & IE_{32} & IE_{42} & IE_{52} & IE_{62} \\ IE_{13} & IE_{23} & IE_{33} & IE_{43} & IE_{53} & IE_{63} \\ IE_{14} & IE_{24} & IE_{34} & IE_{44} & IE_{54} & IE_{64} \\ IE_{15} & IE_{25} & IE_{35} & IE_{45} & IE_{55} & IE_{65} \\ IE_{16} & IE_{26} & IE_{36} & IE_{46} & IE_{56} & IE_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g(L_1) \\ g(L_2) \\ g(L_3) \\ g(L_4) \\ g(L_2) \\ g(L_3) \\ g(L_4) \\ g(L_5) \\ g(L_6) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} IE_{11} & IE_{21} & IE_{31} & IE_{41} & IE_{51} & IE_{61} \\ IE_{12} & IE_{22} & IE_{32} & IE_{42} & IE_{52} & IE_{62} \\ IE_{13} & IE_{23} & IE_{33} & IE_{43} & IE_{53} & IE_{63} \\ IE_{14} & IE_{24} & IE_{34} & IE_{44} & IE_{54} & IE_{64} \\ IE_{15} & IE_{25} & IE_{35} & IE_{45} & IE_{55} & IE_{65} \\ g(L_6) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} ER_1 \\ ER_2 \\ ER_3 \\ ER_4 \\ ER_5 \\ ER_6 \end{pmatrix}$$
(8)

3. Evaluation

3.1. Test Bed

To evaluate the accuracy of the work plane illuminance and the energy savings of the daylight responsive dimming system proposed in this study, the DRDS was applied by considering the influence of indirect illuminance on the full-scale test bed, as shown in Figure 7. The size of the test bed was 2750 (W) \times 6000 (L) \times 2700 (H) [mm], and six luminaires (LED, 1200 \times 300 [mm], 40 W, with a built-in photosensor) were installed. The test bed was located in Gwangju, a metropolitan city in the Republic of Korea. The azimuth angle of the test bed was 23° (SW). The work plane illuminance monitoring was conducted after installing an illuminance meter (P1–P6) at the work plane height (750 mm) directly under each luminaire.



Figure 7. Outline of full-scale test bed.



Indirect illuminance learning was performed on the full-scale test-bed. The regression equation $(g(L_j))$ of work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*j*) according to the dimming level of luminaire (*j*) was analysed as in Figure 8 and Table 1. Also, the proportion of work plane illuminance (*IE*_{*ij*}) at the position directly under the luminaire (*i*) and work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*i*) and work plane illuminance at the position directly under the luminaire (*i*) was analysed as in Table 2.



Figure 8. Work plane illuminance according to dimming level.

Table 1. Regression equations $(g(L_i))$ of dimming level work plane illuminance.

	x ⁴	x ³	x ²	x	<i>R</i> ²
$g(L_1)$	0.0051	-0.2112	2.9129	7.1438	0.9999
$g(L_2)$	0.0045	-0.1894	2.6403	7.0639	0.9999
$g(L_3)$	0.006	-0.251	3.4595	7.2117	0.9999
$g(L_4)$	0.0055	-0.2328	3.2959	7.0318	0.9999
$g(L_5)$	0.006	-0.2531	3.5007	8.2746	0.9999
$g(L_6)$	0.0058	-0.2436	3.413	8.2883	0.9999

Table 2. Proportion of indirect work plane illuminance (IE_{ij}).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L_1	1	0.557	0.356	0.269	0.095	0.092
L_2	0.470	1	0.245	0.372	0.085	0.099
L_3	0.361	0.264	1	0.558	0.339	0.257
L_4	0.247	0.372	0.471	1	0.222	0.338
L_5	0.094	0.086	0.362	0.273	1	0.567
L_6	0.092	0.100	0.267	0.379	0.510	1

3.2. Accuracy Evaluation

The target illuminance accuracy of the proposed dimming control algorithm was evaluated in this study. Therefore, to eliminate errors in the prediction of the work plane illuminance when applying a photosensor attached to the luminaire, the measured work plane illuminance value used as the initial work plane illuminance utilized daylight instead of the predicted value. As shown in Figure 9, the initial work plane illuminance from daylight was measured when all luminaires were turned off. The required dimming level for each luminaire was calculated by inputting the measured initial work plane illuminance value into the dimming control algorithm proposed in this study (step 1). The required dimming level values for each luminaire were input into each luminaire, and all luminaires were





dimmed automatically. After all of the luminaires were automatically dimmed, the final work plane illuminance, which was a combination of daylight and artificial light, and the power consumption of the luminaires were measured (step 2).



Figure 9. Process for evaluating target illuminance accuracy and energy saving.

Assuming the use of the test bed as an office, the target illuminance was set to 500 lx (Korean standard illuminance), and the evaluation was conducted for 27 days, from 22 June to 18 July 2018 [26]. The daily measurement time was from 9:00 a.m. to 6:00 p.m. at 1 min intervals. The Republic of Korea has its summer from June to September. The summer in the Republic of Korea experiences a lot of sunshine, which, with the exception of the rainy season, has a long duration.

The accuracy of the target illuminance was calculated by comparing the target illuminance and final measured illuminance. The point at which the work plane illuminance exceeds the target illuminance owing to the initial incident daylight was excluded from the calculation of the accuracy of the target illuminance. For example, if only the initial illuminance by incident daylight of P1 and P2 near the window exceeds the target illuminance, the accuracy and energy saving calculation for all measurement points are not excluded. The accuracy and energy savings for P3~P6 except P1 and P2 were calculated. Figure 10 shows the measurement of the final work plane illuminance of the luminous environment controlled using the proposed dimming control algorithm from 22 June to 18 July 2018, and the results of the analysis of the accuracy of the target illuminance are shown in Figure 11.



Figure 10. Daily measurement results of the final work plane illuminance.





Figure 11. Daily accuracy result of target illuminance.

As shown in Figure 10, the final work plane illuminance of P1 and P2 located near a window was often more than the target illuminance (500 lx). In contrast, the final work plane illuminance of P5 and P6 near a door almost never exceeded 500 lx, and it was found that it remained constant at 500 lx when using the dimming control algorithm proposed in this study. The accuracy of the target illuminance, shown in Figure 11, is the average accuracy of the target illuminance for all measurement points from P1 to P6. The average accuracy of the target illuminance was 98.9% (SD 0.5%), which is quite high. The maximum accuracy was 100%, and the minimum accuracy was 96.9%.

The results of the comparison analysis of the total average target illuminance accuracy with the clearness index (K_T) for each day are shown in Figure 12. At a larger clearness index, the sky is without clouds. As shown in Figure 12, the higher the clearness index, the higher the daily average target illuminance accuracy. However, the accuracy was 98.80% or more regardless of the clearness index.



Figure 12. Daily average target illuminance accuracy and clearness index.

The average target illuminance accuracy of points (P1–P6) according to the sky condition was analyzed and the results are shown in Table 3. A clearness index of 0.75 or more was classified as clear sky. If the clearness index was less than 0.75 but more than 0.25, it was classified as a partly cloudy sky. In addition, if the clearness index was less than 0.25, it was classified as an overcast sky [27–29]. In the case of clear sky, P1–P4 were excluded from the accuracy calculation because the initial work plane illuminance by daylight of P1–P4 exceeded the target illuminance. In the case of a partly cloudy sky, as





with the clear sky case, P1 and P2 were excluded from the accuracy calculation. As shown in Table 3, the average target illuminance accuracy was above 98% in all sky conditions.

(%)						
Sky Condition	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Clear	12	<u>19</u> 0	12	<u>=</u>	99.00	98.97
Partly cloudy	-	-	99.68	99.41	98.93	98.93
Overcast	98.90	99.06	98.96	99.08	98.69	98.89

Table 3. The average target illuminance accuracy of points (P1–P6) according to the sky condition.

3.3. Energy Savings Evaluation

The lighting energy saving ratio was calculated by comparing the lighting energy consumption with the dimming control algorithm proposed in this study and the lighting energy consumption without dimming control. When all of the LED luminaires (40 W) installed in the full-scale test-bed were turned on 100%, the average work plane illuminance was measured to be about 1000 lx. The power consumption was measured as 104 W (936 Wh per day) by dimming the luminaire to satisfy work plane illuminance 500 lx of all points from P1 to P6. Therefore, the lighting energy savings waere analyzed based on 104 W (936 Wh per day). Figure 13 shows the graph of the lighting energy saving ratio.



Figure 13. Daily result of lighting energy saving ratio.

As a result of the analysis of the lighting energy saving, the average lighting power consumption was 23.9 W (210.6 Wh per day), and the average lighting energy saving ratio was 77%. Whereas the amount of lighting energy saving is generally high in the summer, a higher lighting energy saving occurred under a clear sky than under an overcast sky. Because this study was conducted during the summer, the average lighting energy saving ratio for the other seasons and the rainy season could be less than 77%. Although the initial illuminance of all points exceeded 500 lx, the maximum lighting energy saving ratio was analyzed as 90.1%, and not 100%. This result was caused by the standby power of the luminaire; although all luminaires were turned off, they consumed a total of about 9.6 W of standby power (1.6 W per luminaire). The maximum lighting energy saving ratio and the average lighting energy saving ratio are expected to increase if a luminaire with little or no standby power is installed. The minimum lighting energy saving ratio was 10.9%, which was demonstrated under a rainy or overcast sky.

The results of the comparison analysis of the total lighting energy saving ratio with the clearness index (KT) for each day were shown in Figure 14. As shown in Figure 14, the higher the clearness



index, the higher the daily lighting energy saving ratio. The lighting power consumption and lighting energy saving ratio according to the sky condition were analyzed, and the results are shown in Table 4. As can be seen in Table 4, the lighting energy saving ratio was highest with a clear sky. Secondly, the lighting energy saving ratio was higher with a partly cloudy sky. The clear sky and partly cloudy sky did not show a significant difference regarding the lighting energy saving ratio. With an overcast sky, the lighting energy saving ratio was lowest at 64.32% and showed a great difference from the lighting energy saving ratio with a clear sky and partly cloudy sky.

 Table 4. The lighting power consumption and lighting energy saving ratio according to the sky condition.

Sky Condition	Average Power Consumption (W)	Daily Power Consumption (Wh)	Savings (%)	
Clear	12.81	115.25	87.69	
Partly cloudy	16.80	151.22	83.84	
Overcast	37.11	333.96	64.32	



Figure 14. Daily average lighting energy saving ratio and clearness index.

4. Discussion and Conclusions

A dimming control algorithm considering the influence of indirect illuminance was developed and was evaluated to verify whether the accuracy of the target illuminance and the lighting energy saving of the DRDS developed in this study could be maintained.

As a result of the accuracy analysis of the target illuminance, the average accuracy was determined to be 98.9% (SD 0.5%). The maximum accuracy was 100% and the minimum accuracy was 96.9%, which is quite accurate.

As a result of the lighting energy saving ratio analysis, the average lighting power consumption was 23.9 W (210.6 Wh per day), and the average lighting energy saving ratio was 77%. The maximum lighting energy saving ratio was 90.1%, and the minimum lighting energy saving ratio was 10.9%. This result was caused by the standby power of the luminaire; although all luminaires were turned off, they consumed a total of about 9.6 W of standby power (1.6 W per luminaire).

The dimming level of the luminaire applied to the dimming control algorithm proposed in this study was applied in 20 steps. If the dimming level is further subdivided, the accuracy of the target illuminance can be improved. In contrast, if the work plane illuminance value predicted through a photosensor attached to the luminaire is used as the initial work plane illuminance by applying daylight instead of the measured value, the accuracy of the target illuminance may be reduced. Therefore, in a future study, an algorithm that increases the accuracy of the work plane illuminance prediction will be developed for a photosensor attached to a luminaire, thereby maximizing the amount of lighting





energy saving and providing a comfortable luminous environment. Also, to increase practicality, a cost/benefit analysis will be implemented.

Author Contributions: Conceptualization, I.-T.K. and Y.-S.K.; Methodology, Y.-S.K.; Software, H.N.; Validation, I.-T.K., Y.-S.K. and T.H.; Formal Analysis, I.-T.K.; Investigation, Y.-S.K.; Resources, H.N.; Data Curation, I.-T.K.; Writing-Original Draft Preparation, I.-T.K.; Writing-Review & Editing, T.H.; Visualization, H.N.; Supervision, T.H.; Project Administration, T.H.; Funding Acquisition, T.H.

Funding: This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20182010600110). This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20184010201650).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Nomenclature

DRDS	Daylight responsive dimming system
ET_i	Final work plane illuminance at the position directly under the luminaire (j)
Ej	Work plane illuminance at the position directly under the luminaire (j)
Eij	Work plane illuminance at the position directly under the luminaire (j) by luminaire (i)
EDj	Work plane illuminance at the position directly under the luminaire (j) by daylight
n	Number of luminaires in the room
ERj	Required illuminance at the position directly under the luminaire (j)
g(Lj)	Regression equation of work plane illuminance at the position directly under the luminaire
(j)	According to the dimming level of luminaire (j)
IEij	Proportion of work plane illuminance at the position directly under the luminaire (i) and
	work plane illuminance at the position directly under the luminaire (j) by luminaire (i)

References

- 1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. To Cope with Climate Change Zero Energy Building Promotion Plan. In *National Building Policy Committee Reporting*; Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Korea): Sejong, Korea, 2016.
- Seoul Energy Dream Center. Commercialization of Green Building Remodelling Project for Private Buildings. In Building Energy Seminar; Seoul Energy Dream Center: Seoul, Korea, 2015.
- 3. Costanzo, V.; Evola, G.; Marletta, L.; Pistone Nascone, F. Application of Climate Based Daylight Modelling to the Refurbishment of a School Building in Sicily. *Sustainability* **2018**, *10*, 2653. [CrossRef]
- 4. Piderit Moreno, M.B.; Labarca, C.Y. Methodology for assessing daylighting design strategies in classroom with a climate-based method. *Sustainability* **2015**, *7*, 880–897. [CrossRef]
- Lee, K.S.; Han, K.J.; Lee, J.W. Feasibility study on parametric optimization of daylighting in building shading design. Sustainability 2016, 8, 1220. [CrossRef]
- Guan, Y.; Yan, Y. Daylighting Design in classroom based on yearly-graphic analysis. Sustainability 2016, 8, 604. [CrossRef]
- Mohelníková, J.; Míček, D.; Floreková, S.; Selucká, A.; Dvořák, M. Analysis of Daylight Control in a Chateau Interior. *Buildings* 2018, 8, 68. [CrossRef]
- Moazzeni, M.H.; Ghiabaklou, Z. Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in Tehran, Iran. *Buildings* 2016, 6, 26. [CrossRef]
- Kim, S.H.; Kim, I.T.; Choi, A.S.; Sung, M. Evaluation of Optimized PV Power Generation an Electrical Energy Savings from the PV Blind-integrated Daylight Responsive Dimming System Using LED Lighting. Sol. Energy 2014, 107, 746–757. [CrossRef]
- 10. Al-Ashwal, N.T.; Budaiwi, I.M. Energy savings due to daylight and artificial lighting integration in office buildings in hot climate. *Int. J. Energy Environ.* **2011**, *2*, 999–1012.
- 11. Fernandes, L.L.; Lee, E.S.; Ward, G. Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort. *Energy Build*. **2013**, *61*, 8–20. [CrossRef]







- 12. Caicedo, D.; Pandharipande, A.; Willems, F.M. Daylight-adaptive lighting control using light sensor calibration prior-information. *Energy Build.* 2014, 73, 105–114. [CrossRef]
- 13. Yoo, S.; Kim, J.; Jang, C.Y.; Jeong, H. A sensor-less LED dimming system based on daylight harvesting with BIPV systems. *Opt. Express* **2014**, *22*, A132–A143. [CrossRef] [PubMed]
- 14. Gentile, N.; Dubois, M.C. Field data and simulations to estimate the role of standby energy use of lighting control systems in individual offices. *Energy Build.* **2017**, *155*, 390–403. [CrossRef]
- 15. Nagy, Z.; Yong, F.Y.; Frei, M.; Schlueter, A. Occupant centered lighting control for comfort and energy efficient building operation. *Energy Build*. 2015, 94, 100–108. [CrossRef]
- Gentile, N.; Laike, T.; Dubois, M.C. Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of electricity savings and occupants' satisfaction. Sol. Energy 2016, 127, 113–123. [CrossRef]
- 17. Kaminska, A.; Ożadowicz, A. Lighting Control Including Daylight and Energy Efficiency Improvements Analysis. *Energies* **2018**, *11*, 2166. [CrossRef]
- Yun, G.Y.; Kim, H.; Kim, J.T. Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption. Energy Build. 2012, 46, 152–158. [CrossRef]
- 19. Pandharipande, A.; Caicedo, D. Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing. *Energy Build*. 2011, 43, 944–950. [CrossRef]
- 20. Wang, Z.; Tan, Y.K. Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm. *Energy Build*. 2013, 62, 514–521. [CrossRef]
- Choi, H.; Hong, S.; Choi, A.; Sung, M. Toward the accuracy of prediction for energy savings potential and system performance using the daylight responsive dimming system. *Energy Build.* 2016, 133, 271–280. [CrossRef]
- Yun, S.I.; Kim, K.S. Sky Luminance Measurements Using CCD Camera and Comparisons with Calculation Models for Predicting Indoor Illuminance. *Sustainability* 2018, 10, 1556. [CrossRef]
- Park, B.C.; Choi, A.S.; Jeong, J.W.; Lee, E.S. Performance of integrated systems of automated roller shade systems and daylight responsive dimming systems. *Build. Environ.* 2011, 46, 747–757. [CrossRef]
- Parise, G.; Martirano, L. Daylight impact on energy performance of internal lighting. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2013, 49, 242–249. [CrossRef]
- Ul Haq, M.A.; Hassan, M.Y.; Abdullah, H.; Rahman, H.A.; Abdullah, M.P.; Hussin, F.; Said, D.M. A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 33, 268–279. [CrossRef]
- Korean Standards Association. Korean Industrial Standards, KS A3011, KS Recommended Levels of Illumination; KSA: Seoul, Korea, 1998.
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- Park, B.C.; Choi, A.S.; Jeong, J.W.; Lee, E.S. A Preliminary Study on the Performance of Daylight Responsive Dimming Systems with Improved Closed-Loop Control Algorithm. *Leukos* 2011, *8*, 41–59.
- Jeong, K.Y.; Choi, A.S.; Sung, M. A mock-up study for validation of an improved control algorithm for automated roller shade. *Indoor Built Environ.* 2016, 25, 17–28. [CrossRef]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

