



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022年 8月

博士學位論文

건물에너지 절감을 위한 복사냉난방
복합형 광선반 시스템 개발

朝鮮大學校 大學院

建築工學科 (建築工學專攻)

高 範 錫

건물에너지 절감을 위한 복사냉난방 복합형 광선반 시스템 개발

**Development of lightshelf system integrated with radiant heating
and cooling for building energy saving**

2022年 8月 26日

朝鮮大學校 大學院

建築工學科 (建築工學專攻)

高 範 錫

건물에너지 절감을 위한 복사냉난방 복합형 광선반 시스템 개발

指導教授 황 태 연

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2022年 4月

朝鮮大學校 大學院

建築工學科 (建築工學專攻)

高 範 錫

高範錫의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授	<u>김 태 훈</u>	印
委員	朝鮮大學校	教授	<u>황 태 연</u>	印
委員	朝鮮大學校	教授	<u>김 주 욱</u>	印
委員	釜慶大學校	教授	<u>이 규 남</u>	印
委員	南部大學校	教授	<u>황 민 구</u>	印

2022年 6月

朝鮮大學校 大學院

차 례

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 연구 동향	1
1.2 연구 목적	12
1.3 연구 내용 및 방법	13

제2장 복사냉난방 복합형 광선반(TALS) 개념 및 Test bed 구축

2.1 TALS(Thermally Activated Light Shelf) 개념	15
2.2 Test bed 실증 실험 개요	20
2.2.1 Test bed	20
2.2.2 실증 실험 데이터 모니터링 시스템 개요	22
2.3 TALS 연계형 광센서 조광제어 시스템 정확도 평가	32
2.3.1 광센서 조광제어 시스템 알고리즘	32
2.3.1.1 Direct light(직접광) 예측 방법	32
2.3.1.2 Direct light & Indirect light(간접광) 고려한 작업면 조도 예측 방법	36
2.3.2 보정 계수 예측식 개발	41
2.3.3 정확도 평가	46

제3장 TALS 시스템 적용에 따른 빛환경 평가

3.1 빛환경 성능평가 지표	48
3.2 Test bed 빛환경 실험	53
3.2.1 실험 개요	53
3.2.2 실내조도	55
3.2.3 실내 균제도	64
3.2.4 평균 주광률	67
3.2.5 실내 창면 휘도	74
3.3 빛환경 시뮬레이션	81
3.3.1 실내조도	86
3.3.2 실내 균제도	104
3.3.3 평균 주광률	107
3.3.4 평균 조도비	108

3.3.5 실내 창면 휘도	109
3.4 소결	113
제4장 TALS 적용에 따른 열환경 평가	
4.1 열환경 성능평가 지표	115
4.2 Test bed 열환경 실험	120
4.2.1 실험 개요	120
4.2.2 실내 수직온도 분포 특성	124
4.2.3 수평온도	128
4.2.4 예상온열감	131
4.2.5 국부적 불쾌적 관측결과	134
4.3 열환경 시뮬레이션	140
4.3.1 수학적 모델 및 해석방법	141
4.3.1.1 물리적 모델 방정식	141
4.3.1.2 일사 복사모델	142
4.3.1.3 난류 모델	143
4.3.2 시뮬레이션 해석 영역 및 경계조건	144
4.3.3 시뮬레이션 해석 결과	146
4.3.3.1 실내온도 및 기류 속도 분포	146
4.3.3.2 국부적 불쾌감(수직온도차 및 불쾌적 비율)	155
4.4 소결	156
제5장 TALS 건물에너지 절감 효과 분석	
5.1 건물에너지 성능평가 지표	159
5.2 조명에너지 사용량 분석	160
5.3 냉난방에너지 사용량 분석	168
5.3.1 난방 에너지사용량 비교분석	170
5.3.2 냉방 에너지사용량 비교분석	176
5.4 소결	181
제6장 결론	182
참고문헌	185

표 차 례

<표 1.1> 광선반 설계 요소에 대한 연구 동향	9
<표 1.2> 광선반 기술 연계 연구	10
<표 1.3> 광선반 에너지 절감 효과 연구	11
<표 1.4> 광선반 빛환경 및 채광성능 개선 연구	11
<표 2.1> T-10A 조도계 성능	24
<표 2.2> 대면 동영상 휘도계 성능	25
<표 2.3> TEST0 PMV 측정기기 성능	27
<표 2.4> 열화상 카메라 성능	30
<표 2.5> 광센서 조광제어 시스템 작업면 조도와 조명기기 광센서 회귀분석 결과	42
<표 2.6> 디밍 레벨에 따른 작업면 조도(lx) 결과	43
<표 2.7> 조명기구 100% 디밍 시, 직접광 및 간접광 센싱값	44
<표 2.8> 조명기구 100% 디밍 시, 직접광 및 간접광 센싱값 비율	44
<표 3.1> 나라별 실내조도 기준	49
<표 3.2> 사무실 공간 조도 기준(중국, 유럽)	50
<표 3.3> KS A 3011. 우리나라 실내조도 기준	50
<표 3.4> 천공천명도 Origill and Hollands model 기준	54
<표 3.5> Test room(TALS) 동지 실내조도 측정 결과(lx)	56
<표 3.6> Reference room(Non-TALS) 동지 실내조도 측정 결과(lx)	57
<표 3.7> TALS 유무에 따른 동지 작업면 조도 측정결과(lx)	57
<표 3.8> Test room 춘분 실내조도 측정결과(lx)	59
<표 3.9> Reference room 춘분 실내 조도 측정결과(lx)	60
<표 3.10> TALS 유무에 따른 춘분 작업면 조도 측정결과(lx)	60
<표 3.11> Test room 하지 실내조도 측정결과(lx)	62
<표 3.12> Reference room 하지 실내조도 측정결과(lx)	62
<표 3.13> TALS 유무에 따른 하지 작업면 조도 측정결과(lx)	63
<표 3.14> TALS 유무에 따른 균제도 측정 결과	65

<표 3.15> Test room(TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(동지)	68
<표 3.16> Reference room(Non-TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(동지)	68
<표 3.17> Test room(TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(춘분)	70
<표 3.18> Reference room(Non-TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(춘분)	71
<표 3.19> Test room(TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(하지)	72
<표 3.20> Reference room(Non-TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(하지)	73
<표 3.21> TALS 유무에 따른 동지 창면 휘도 측정결과(cd/m^2)	75
<표 3.22> TALS 유무에 따른 춘분 창면 휘도 측정결과(cd/m^2)	78
<표 3.23> TALS 유무에 따른 하지 창면 휘도 측정결과(cd/m^2)	80
<표 3.24> 실내 빛환경 시뮬레이션 입력 조건	85
<표 3.25> 시뮬레이션을 위한 담천공 및 청천공 기준 전천공조도(lx)	86
<표 3.26> 천공조건에 따른 작업면 평균 조도 시뮬레이션 결과(lx)	87
<표 3.27> TALS 적용 시 춘분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	88
<표 3.28> TALS 미적용 시 춘분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	89
<표 3.29> TALS 적용 시 하지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	90
<표 3.30> TALS 미적용 시 하지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	91
<표 3.31> TALS 적용 시 추분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	92
<표 3.32> TALS 미적용 시 추분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	93
<표 3.33> TALS 적용 시 동지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	94
<표 3.34> TALS 미적용 시 동지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	95
<표 3.35> TALS 적용 시 춘분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	96
<표 3.36> TALS 미적용 시 춘분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	97
<표 3.37> TALS 적용 시 하지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	98
<표 3.38> TALS 미적용 시 하지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	99
<표 3.39> TALS 적용 시 추분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	100
<표 3.40> TALS 미적용 시 추분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	104
<표 3.41> TALS 적용 시 동지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	102
<표 3.42> TALS 미적용 시 동지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)	103
<표 3.43> 담천공 조건에서 평균 규제도	105
<표 3.44> 청천공 조건에서 평균 규제도	106
<표 3.45> TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 평균 주광률	107

<표 3.46> TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 평균 조도비	108
<표 3.47> TALS 적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(담천공)	111
<표 3.48> TALS 미적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(담천공)	111
<표 3.49> TALS 적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(청천공)	112
<표 3.50> TALS 미적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(청천공)	112
<표 4.1> 열환경 평가지표 분류	116
<표 4.2> 실내 온습도 기준(한국)	116
<표 4.3> 최적 실내온도 기준(외국)	117
<표 4.4> 열환경 평가 지표 및 쾌적 category 구분	117
<표 4.5> 수직 온도 분포(°C) - 동지(12.22)	135
<표 4.6> 수직 온도차(°C) 및 PD(%) 쾌적범위 기준	135
<표 4.7> 수직 온도차(°C) 및 PD(%) - 동지(12.22)	136
<표 4.8> 수직 온도 분포(°C) - 춘분(3.21)	137
<표 4.9> 수직 온도차(°C) 및 PD(%) - 춘분(3.21)	138
<표 4.10> 수직 온도 분포(°C) - 하지(6.21)	139
<표 4.11> 수직 온도차(°C) 및 PD(%) - 하지(6.21)	139
<표 4.12> 물리적 모델 방정식($k-\epsilon$ 모델)	141
<표 4.13> Test bed 일사량(W/m^2)과 실외온도(°C)	145
<표 4.14> Test bed 방위각 및 고도(°)	145
<표 4.15> 춘분 시뮬레이션 결과	147
<표 4.16> 하지 시뮬레이션 결과	149
<표 4.17> 추분 시뮬레이션 결과	151
<표 4.18> 동지 시뮬레이션 결과	153
<표 4.19> TALS 적용 유무에 따른 절기별 수직 온도 분포(°C)	155
<표 4.20> TALS 적용 유무에 따른 절기별 수직 온도차(°C)와 PD(%)	155
<표 5.1> 실험 시스템 개요	160
<표 5.2> 월간 조명에너지 사용량 비교	163
<표 5.3> 조명에너지 사용량(kWh) 비교(4.26, 최소 Kt 관측일)	166
<표 5.4> 조명에너지 사용량(kWh) 비교(4.17, 최대 Kt 관측일)	167

<표 5.5> 천공조건에 따른 조명에너지 사용량(kWh/day) 비교	167
<표 5.6> 겨울철 Reference room FCU 일간 소비전력량(Non-TALS)	173
<표 5.7> 겨울철 Test room FCU 일간 소비전력량(TALS)	173
<표 5.8> 겨울 난방 열량 사용량 비교	174
<표 5.9> 여름철 Reference room FCU 일간 소비전력량(Non-TALS)	178
<표 5.10> 여름철 Test room FCU 일간 소비전력량(TALS)	179
<표 5.11> 여름 냉방 열량 사용량 비교	179

그림 차례

[그림 1.1] 광선반 설계 요소 연구 사례 도식화	4
[그림 1.2] PV 일체형 분할 광선반	5
[그림 1.3] PV 부착형 광선반	5
[그림 1.4] 광선반과 차양이 복합된 시스템	6
[그림 1.5] 광선반 유무에 따른 실내주광환경 변화	7
[그림 1.6] 복사냉난방 광선반 연구 핵심 개념	12
[그림 1.7] 연구흐름도	14
[그림 2.1] TALS	15
[그림 2.2] TALS 구성 전개	16
[그림 2.3] TALS 시스템 설계안	16
[그림 2.4] TALS 시작품 내부 제작 과정	17
[그림 2.5] TALS 적용 전, 겨울철 실내 빛환경 및 열환경	18
[그림 2.6] TALS 적용 후, 겨울철 실내 빛환경 및 열환경	18
[그림 2.7] TALS 적용 전, 여름철 실내 빛환경 및 열환경	19
[그림 2.8] TALS 적용 후, 여름철 실내 빛환경 및 열환경	19
[그림 2.9] C대학 Test bed	20
[그림 2.10] C대학 Test bed(평면)	21
[그림 2.11] Test bed 모니터링 계획(평면)	23
[그림 2.12] Test bed 모니터링 계획(단면)	23
[그림 2.13] KONICA MINOLTA T-10A 조도계	24
[그림 2.14] 대면 동영상 휘도계	25
[그림 2.15] 조명기구 광센서	26
[그림 2.16] TESTO PMV/PPD 측정기기	27
[그림 2.17] 열전대 데이터로거	28
[그림 2.18] 실내 수직온도차 측정을 위한 비접촉식 열전대 설치 모습	29
[그림 2.19] FLIR C2 열화상 카메라	30
[그림 2.20] Test bed 냉난방 자동제어 시스템	31

[그림 2.21] 광센서 조광제어 시스템(직접조도 학습법)	33
[그림 2.22] 기존 광센서 조광제어 시스템의 직접조도 학습방법	34
[그림 2.23] 직접 및 간접조도의 영향을 받는 실제 조명환경	35
[그림 2.24] 직접조도 학습법 조도 유지 방식	35
[그림 2.25] 광센서 조광제어 시스템의 작업면 학습법	36
[그림 2.26] 광센서 조광제어 시스템의 간접조도 학습방법	37
[그림 2.27] 직접 및 간접조도 계산 방법	38
[그림 2.28] 실내 작업면 조도와 광센서 센싱값 회귀분석 추세식	42
[그림 2.29] 광센서 조광제어 알고리즘 제어 및 모니터링 시스템	45
[그림 2.30] 광센서 조광제어 시스템 정확성 평가를 위해 관측된 작업면 조도	46
[그림 2.31] 목표 조도 정확성 결과	47
[그림 2.32] 목표 조도 구현 정확성 실험 모습	47
[그림 3.1] TALS 빛환경 실험(Test bed)	53
[그림 3.2] Test room 내주부, 실내 중앙, 외주부 공간설정	55
[그림 3.3] 동지 실내 균제도	65
[그림 3.4] 춘분 실내 균제도	66
[그림 3.5] 하지 실내 균제도	66
[그림 3.6] 동지 실내 내주부 주광률 및 전천공조도	69
[그림 3.7] 춘분 실내 내주부 주광률 및 전천공조도	71
[그림 3.8] 하지 실내 내주부 주광률 및 전천공조도	73
[그림 3.9] 동지 실내 창면 휘도 및 Kt	75
[그림 3.10] 춘분 실내 창면 휘도 및 Kt	77
[그림 3.11] 하지 실내 창면 휘도 및 Kt	79
[그림 3.12] Radiance 시뮬레이션 예시	81
[그림 3.13] Radiance 프로그램 구성 흐름도 및 데이터 처리 과정	83
[그림 3.14] Test bed 3D 모델링	84
[그림 3.15] 실내 빛환경 해석을 위한 시뮬레이션 모델	84
[그림 3.16] TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 균제도(담천공)	105
[그림 3.17] TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 균제도(청천공)	106
[그림 3.18] TALS 적용 유무에 따른 실내 창면 휘도(담천공)	110

[그림 3.19] TALS 적용 유무에 따른 실내 창면 휘도(청천공) 110

[그림 4.1] TALS 열환경 실험(Test bed) 120

[그림 4.2] 겨울철(난방) 실험 환경 122

[그림 4.3] 여름철(냉방) 실험 환경 123

[그림 4.4] 수직온도차 및 불쾌적 비율 모니터링 124

[그림 4.5] 겨울철 수직 높이별 온도 분포곡선 125

[그림 4.6] 수직 온도 분포(15시) 126

[그림 4.7] 여름철 수직 높이별 온도 분포곡선 127

[그림 4.8] 수평 온도분포 모니터링 128

[그림 4.9] 창면으로부터 거리에 따른 겨울 실내 수평 온도 분포(Test room) 129

[그림 4.10] 창면으로부터 거리에 따른 겨울 실내 수평 온도 분포(Reference room) ... 129

[그림 4.11] 창면으로부터 거리에 따른 여름 실내 수평 온도 분포(Test room) 130

[그림 4.12] 창면으로부터 거리에 따른 여름 실내 수평 온도 분포(Reference room) ... 130

[그림 4.13] 겨울철 난방 시 PMV 132

[그림 4.14] 여름철 냉방 시 PMV 133

[그림 4.15] Star-CCM+ CFD Simulation 140

[그림 4.16] Test room(TALS) CFD 수치해석 모델링 144

[그림 4.17] 실내온도 및 기류 속도 측정 지점(CFD 수치해석) 146

[그림 4.18] TALS 적용 유무에 따른 춘분 CFD 해석 결과 148

[그림 4.19] TALS 적용 유무에 따른 하지 CFD 해석 결과 150

[그림 4.20] TALS 적용 유무에 따른 추분 CFD 해석 결과 152

[그림 4.21] TALS 적용 유무에 따른 동지 CFD 해석 결과 154

[그림 5.1] 조명에너지 사용량 실험 개요 161

[그림 5.2] 광센서 조광제어 시스템 제어 알고리즘 Flow chart 162

[그림 5.3] 월간 조명에너지 누적 사용량 164

[그림 5.4] 월간 조명에너지 사용량 비교 165

[그림 5.5] 공조시스템 설비계통도 169

[그림 5.6] 겨울 Reference room 난방시스템 제어특성 171

[그림 5.7] 겨울 Test room 난방시스템 제어특성 171

[그림 5.8] Reference & Test room 난방시스템 제어특성 비교 172

[그림 5.9] 시간에 따른 겨울철 난방에너지 사용량 174

[그림 5.10] 겨울철 난방에너지 일 사용량 비교 175

[그림 5.11] 여름 Reference room 냉방시스템 제어특성 176

[그림 5.12] 여름 Test room 냉방시스템 제어특성 177

[그림 5.13] Reference & Test room 냉방시스템 제어특성 비교 178

[그림 5.14] 시간에 따른 여름철 냉방에너지 사용량 180

[그림 5.15] 여름철 냉방에너지 일 사용량 비교 180

Abstract

Development of lightshelf system integrated with radiant heating and cooling for building energy saving

Go, Beom Seok

Advisor : Prof. Hwang, Tae Yon, Ph.D

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

This study was developed the TALS(Thermally Activated Light Shelf) and verified performance of the indoor light environment, thermal environment and energy saving. For performance verification, test bed experiments and simulations were conducted.

The results of TALS light environment evaluation are as follows. TALS is installed in the perimeter zone of the indoor to block direct sunlight, create comfortable light environment by making the uniformity of indoor illuminance distribution through reflecting the sunlight into the interior zone. Also, TALS has a discomfort glare control effect by reducing the window luminance and maintains a bright indoor by improving the indoor daylight factor. Therefore, it has been proven that TALS can improve the light environment and create a visually comfort indoor environment by performing the original function of the light shelf.

The results of TALS thermal environment evaluation are as follows. TALS reduces heat transfer and maintains a stable indoor temperature by transferring radiant cooling and heating in the perimeter zone which occurs a lot of heat gain and heat loss. The result of the vertical temperature difference and discomfort ratio at the center of the indoor were analyzed that the comfortable range was improved and could feel a comfort thermal environment. In addition, it was shown that the horizontal temperature deviation was reduced by installing TALS to create a uniform temperature throughout the room. PMV was analyzed to increase Category A comfort range by about 3.7 times

when TALS was applied.

The building energy saving effects are as follows. The energy saving of TALS was analyzed with DRDS(Daylight Responsive Dimming System). When DRDS was applied, lighting energy was reduced by 73.2 %, and when TALS and DRDS were applied, lighting energy was reduced by 78.8 %. Lighting energy saving rate of TALS was 5.6 %, and it was confirmed that the amount of lighting energy savings increased under the conditions of the clear sky and partly overcast sky, but decreased in the overcast sky. Also, TALS can reduce air conditioning load that the heating energy saving rate was 39.38 % and the cooling energy saving rate was 7.86 %. Radiant heating and cooling technology of TALS has proven to be very effective in saving building energy by decreasing the perimeter zone load and improving the indoor thermal environments.

In this study, TALS was developed and verified performance. TALS is a crucial building equipment for realization of eco-friendly buildings and zero-energy buildings. and it has secured the original technology in the field of building environment. This study was proposed the operating mechanism of the TALS was quantitatively investigated such as the effect of thermal comfort, the heating and cooling energy saving, the light environment, and reducing lighting energy consumption. It is possible to present basic data for TALS application and operation, it is possible to propose technical standards and expand technology for radiant cooling and heating light shelf. Lastly, it is possible to meet the national energy conservation policy and the achievement of the global greenhouse gas emission reduction target. Furthermore, it is possible to expand related industries and upgrade in the field of building environment.

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 연구 동향

세계는 전 지구적인 기후변화 현상과 온실가스 및 환경 파괴에 대응하기 위해 다양한 정책들을 제정 및 추진 중이다. 그 중 유엔 기후변화협약 당사국총회(COP, Conference of the Parties)는 최근 2021년 개최된 COP26에서 글래스고 조약(Glasgow climate pact)을 타결하고 석탄 발전과 화석연료 보조금 감축을 위한 합의안을 발표하였다. 또한, 세계 각국은 지구 온도 상승 폭(1.5 °C)에 대응하는 온실가스 감축 목표를 재공표하기로 하였고, 선진국은 이상기후 적응을 위한 기금을 증액하였다^[1]. 유럽은 전체 1차 에너지 소비량의 40 %를 건물에서 소비하고, 미국은 전체 에너지사용량 중 39.8 %를 건물에서 사용한다^[2-3]. 미국 에너지 정보국이 발표한 ‘Electricity use in U.S. commercial buildings by major end uses’에 따르면, 조명에너지 사용량은 에너지 총사용량 중 약 17 %를 차지하는 것으로 발표되었다^[4]. 한국에너지공단이 발표한 우리나라 에너지 소비 조사에 의하면, 전체 에너지 소비량의 23.5 %가 건축물에서 사용되고, 조명에너지는 건축물에서 사용되는 에너지의 약 12 % - 20 %를 사용해 매우 높은 비율을 차지하는 것을 알 수 있다^[5-6]. 또한, 전체 온실가스 배출량의 25 %가 건물부문에서 발생하며, 주로 쾌적한 실내를 유지하기 위한 냉난방으로 많은 에너지가 사용된다. 주거용 건물의 연간 에너지 소비량을 보면 냉방, 난방, 급탕, 취사와 같은 열부하가 전체 에너지 소비의 70 % - 80 %를 차지한다. 사무용 건물의 경우, 난방 30.5 %, 냉방 26.6 %, 사무기기 및 기타 16.6 %, 조명 12.1 % 순으로 에너지를 소비한다^[7]. 이처럼 건물 부문의 에너지 사용 비중이 매우 크기 때문에 우리나라는 온실가스 배출과 건물에너지 소비를 90 % 이상 줄이기 위한 제로 에너지 빌딩 활성화 정책을 시행하고 있다^[8]. 또한, 국토교통부는 2030 온실가스 감축 로드맵 수정안을 발표하여, 건물부문 국가 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 감축률을 26.3 %에서 40 %로 목표를 상향하여 에너지 소비량과 온실가스 배출 감축을 위한 정책을 매우 활발히 추진 중이다^[9].

본 연구는 사무실 용도의 건축물을 대상으로 수행되는데, 사무실 건물은 다른 용도의 건물에 비해 창면적비가 큰 특징이 있다^[10]. 큰 창면적비는 건물 냉·난방 부하를 증가시키거나 재실자에게 시각적 불편함(현휘, 글레어)을 느끼게 할 수 있고, 쾌적한 실내상태를 유지하기 위해 많은 에너지를 소비하는 문제점들이 발생할 수 있다^[11]. 창면적비가 큰 사무실 건축물은 과도한 주광 유입과 일사를 차단하는 방법으로 일사열획득계수(SHGC: Solar Heat Gain Coefficient)가 낮은 창호를 주로 적용하고 있지만, 가시광선 투과율(VLT: Visible Light Transmittance)이 낮아^[12] 자연채광 성능을 떨어뜨려 조명에너지 사용량을 증가시키는 문제점이 있다. 또한, 큰 창면적비는 외주부 부하($40\text{--}120\text{ W/m}^2$)를 크게 증가시키고, 내주부 부하($20\text{--}40\text{ W/m}^2$)에 비해 2 - 3배 높게 나타나 균일한 실내환경 조성에 어려움이 있다^[13]. 예를 들어, 동절기에는 개구부(외주부)의 온도 저감과 편차로 인해 콜드 드래프트를 유발하여 재실자에게 불쾌적인 추위를 느끼게 하거나, 하절기에는 일광, 일사량을 증가시켜 불쾌적인 온열환경을 조성한다. 이러한 복사불균등(Radiant asymmetry) 현상은 재실자 쾌적감을 떨어뜨리고 공조 부하를 증가시켜 에너지사용량 증가와 온실가스 배출 문제의 원인이 된다^[14-15]. 또한, 큰 창면과 창틀로 이루어진 개구부는 재실자를 직사 일광에 노출시키고 현휘와 글레어를 발생시켜 시각적 불쾌감을 줄 수 있다^[16]. 높은 휘도(글레어)의 경우, 재실자에게 시각문제를 일으켜 업무 생산성과 집중력을 방해하여 작업 수행능력을 떨어뜨리고 부정적인 심리에 영향을 준다^[17-20]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 광선반, 차양, 커튼, 블라인드 등이 개발되어 적용되어 왔지만, 실제 재실자가 느끼는 쾌적감을 분석한 연구는 기초 수준이며, 특히 온열환경 분석연구는 국내외로 수행되지 않았다.

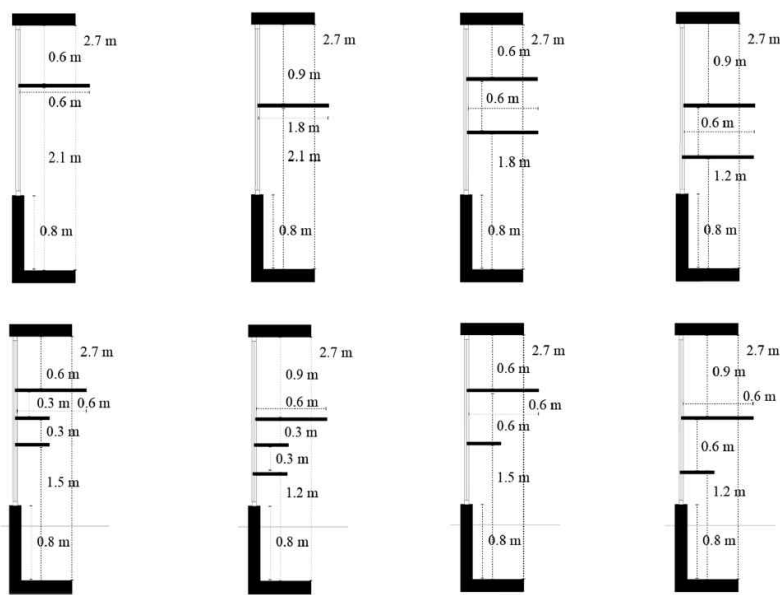
광선반은 건물 외피(실내·외)에 설치되어 직사 일광 유입을 차단하고 현휘를 방지하는 패시브 건축 요소 기술이며, 반사면을 통해 실내로 주광을 반사하여 자연 채광 효과를 개선하고 조명 부하를 줄이는 친환경 설계요소이다^[21-22]. 또한, 최근 우리나라에서는 녹색 건축 조성을 위한 기술 항목으로 광선반이 지정되어 건축물 적용사례가 증가하고 있다^[23]. 광선반은 국내·외로 다양한 선행연구들이 수행되어^[24-25], 개발 및 적용사례를 통한 개선 효과 검증이 활발히 진행중이다. 따라서, 본 절에서는 연구주제와 목적에 따라 연구 동향을 분류하고 문헌을 조사하여, 본 연구에서 새로운 광선반 시스템을 제안하게 된 배경을 설명하고자 한다.

(1) 광선반 설계 요소에 대한 연구

광선반은 유형별 및 매개변수(돌출 길이, 재질, 각도, 높이, 설치 공간 특성 등) 설정에 따라 실내 빛환경 및 채광성능의 결과가 다양하게 나타난다. 국내·외에서는 효율적인 광선반을 개발하기 위한 연구(표 1.1)가 최근까지 수행되고 있으며, 이 절에서 관련된 연구 동향을 설명한다.

Claros, S. T., et al(2001)은 반사율이 다른 4가지 설계안을 광선반 반사면에 적용하여 계절에 따른 채광성능을 비교분석하여 최적의 광선반을 제안하였다^[26,27]. 최봉철(2002)는 광선반 매개변수(돌출길이, 재질, 각도, 천공조건)에 따라 가장 효율적인 광선반 유형을 제시하고, 시뮬레이션 분석하여 기초자료 및 평가방법을 제시하였다^[28]. 김정태 외(2003)는 광선반 형태(폭, 설치 높이, 천공상태, 개수)별 채광성능을 시뮬레이션 평가하고 건물 외피 적용 대안을 제시하였다^[29]. Al-Sallal, K. A.(2006)은 사막 기후에서 실내 일광 개선 및 시각적 편안함을 개선할 수 있는 광선반 설계방안을 제안하였다^[30]. 정유근(2007)은 창호와 일체화된 광선반의 채광성능을 매개변수(설치 높이, 형태 및 외부 광선반 유동각도)에 따라 분석하여, 높이 1.8 m, 폭 0.6 m가 가장 효과적인 것을 증명하였다^[31]. 김동수 외(2011)는 곡면형 광선반을 제안하고, 광선추적기법을 활용하여 실내조도와 균제도 및 휘도분포를 자연채광 해석 시뮬레이션을 활용하여 정량적으로 분석하였다^[32]. Raphael, B.(2011)은 건축물 외피에 적용된 광선반의 각도와 깊이를 기후조건에 따라 자동으로 제어하는 매커니즘을 제안해 실내조도 확보와 에너지 절약 가능성을 입증하였다^[33]. 채우리(2013)는 외부, 내부, 혼합형 광선반의 크기와 각도를

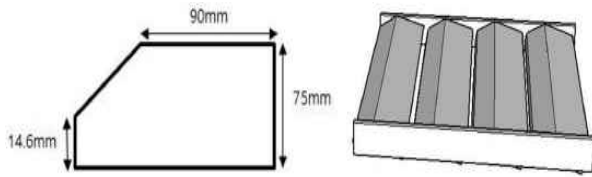
조절하여 형태별, 계절별로 최적의 효과를 검증하였다^[34]. Lim, Y. W., et al(2015)은 열대기후에서 광선반 각도와 채광 조건에 따른 성능을 분석하였고(그림 1.1)^[35], 열대지방의 고층 건물의 높은 실내조도와 눈부심 현상을 감소하기 위한 형상 설계 연구를 통해 최적 사례를 제안하였다^[36]. Meresi, A.(2016)은 블라인드와 결합된 광선반의 폭, 장착 높이, 각도 및 반사율을 변수로 설정하여 시뮬레이션을 통해 일광 성능을 검증하고 최적 특성을 정의하였다^[37]. Moazzeni, M. H., et al(2016)은 이란의 교육 연구 시설에 광선반을 적용하고, 매개변수인 크기, 회전 각도, 방향에 따라 일광 효율성 및 시각적 쾌적성 영향을 분석했고, 광선반 크기(폭)가 가장 큰 영향을 미치는 것을 증명하였다^[38]. Lee, H., et al(2019)은 곡면 반사면을 제안하고 테스트베드 실험을 통해 태양 고도에 따라 성능을 평가하고, 각도 20°, 호 각도 60° 최적 규격을 도출하였다^[39]. 백정엽 외(2021)는 광선반 상단 유리의 재질 변화(오목렌즈, 볼록렌즈, 확산필름) 및 각도 조절에 따라 채광성능 및 현휘를 개선하는 방법을 제안하였다^[40].



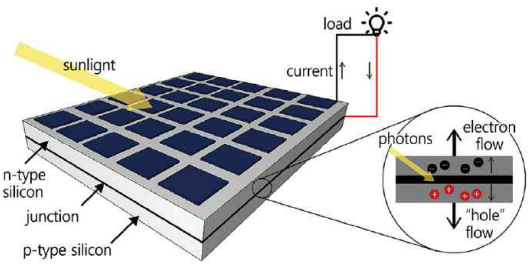
[그림 1.1] 광선반 설계 요소 연구 사례 도식화^[35]

(2) 기술 연계 연구

광선반은 패시브 건축요소로서 다른 기술들과의 융복합을 통한 성능개선 및 에너지 절감 효과가 있다. 광선반은 액티브 건축요소와 융합하여 새로운 형태의 디자인이나 기술을 제안하는 연구가 많으며, 신재생에너지 발전과 연계된 복합 기술을 고도화 하는 연구들이 수행되고 있다. 또한, 조광제어 및 재실자 인식 디밍 제어 등의 기술이 연계된 연구 동향(표 1.2)을 이 절에서 소개한다.



[그림 1.2] PV 일체형 분할 광선반^[46]



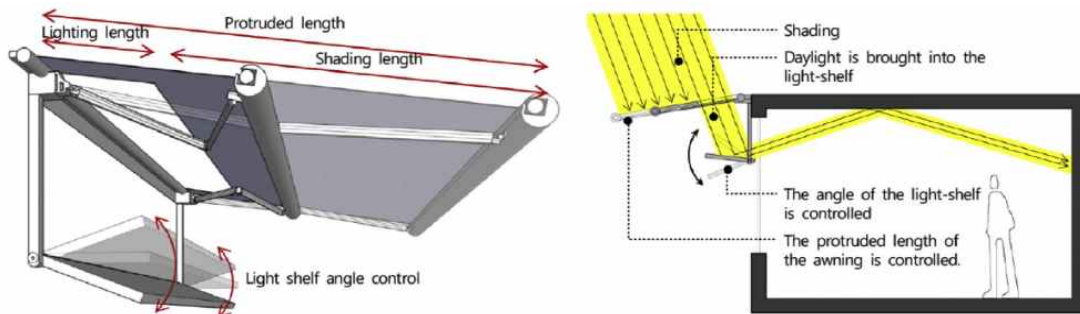
[그림 1.3] PV 부착형 광선반^[48]

박훈 외(2012)는 PV 일체형 광선반 시스템의 성능을 스케일 실험을 통해 평가하였고, 광선반 각도가 커질수록 발전효율이 감소하는 것을 증명하였다^[41]. 이종수(2013)는 기상조건에 대응하는 폴리카보네이트 광선반을 개발하여, 채광성능을 평가하고 부하 감소 효과 기초자료를 정리하였다^[42]. 김상훈 외(2014)는 재실자 위치에 따라 광선반 각도를 자동으로 조절하는 시스템을 제안하여 96.9 % 조명에너지 절감 효과를 검증하였다^[43]. Hwang, T., et al(2014)는 PV 통합형 광선반 시스템을 개발하고 스케일 모델을 구성하여 전력발전 성능을 도출하고 기본데이터를 평가하였다^[44]. 이행우 외(2015)는 결정면 반사판 광선반을 제안하여, 실내 균제도 29.9 % - 34.3 % 개선 및 조명에너지 7.98 % - 13.3 % 절감을 실험을 통해 검증하였다^[45]. 김기훈 외(2016)는 반사면이 분할된 광선반에 PV 패널을 부착하고 개별 각도 제어하여 실내 주광 활용도 및 발전효율을 증명하였다(그림 1.2)^[46]. 정성권 외(2017)는 광선반과 조광제어 시스템 적용을 제안하고, 천공 및 주광 조건에 대해 시뮬레이션하여 조명에너지 50 % 절감 효과가 있는 것을 확인하였다^[47]. 김정민 외(2018)는 광선반 반사판에 PV를 부착하고, 각도와 부착 면적별로 집광 및 조명에너지 절감 효율을 분석하여 성능검증 및 적정규격을 도출하였다(그림 1.3)^[48]. 장민우(2018)는 프리즘 시트를 반사면과 개구부 상부에 적용하여, 자연채광 성능과 조명에너지 사용량을 분석하였다. 균제도는 빛의 굴절로 감소하였고, 조명에너지

는 14.9 % 절감되었다^[49]. Kim, K., et al(2019)은 재실자 인식 및 디밍 조절이 가능한 통합 시스템을 제안하고 테스트베드 실증평가를 통해 조명에너지 절감 효율성을 평가하였다^[50]. Bahdad, A. A. S., et al(2020)은 유전 알고리즘 제어를 통한 광선반 주광 성능을 최적화하기 위해 파라메트릭 설계와 시뮬레이션을 통해 15.6 % 채광성능 향상을 증명하였다^[51]. 윤연주 외(2020)는 실내 유입 주광의 효율성을 높이기 위해 광선반과 조광제어 시스템을 운용하여 안정적인 조명제어와 조명에너지 절감 효과를 분석하였다^[52].

(3) 에너지 절감 효과 연구

광선반은 디밍 제어 시스템이나 재생에너지 발전기술과 융복합하여 자연채광성능을 개선하고 건물에너지 사용량을 절감할 수 있다. 본 절에서는 건물에너지 절감 기술 개발 및 효과 분석에 대한 선행 연구(표 1.3)를 리뷰한다.

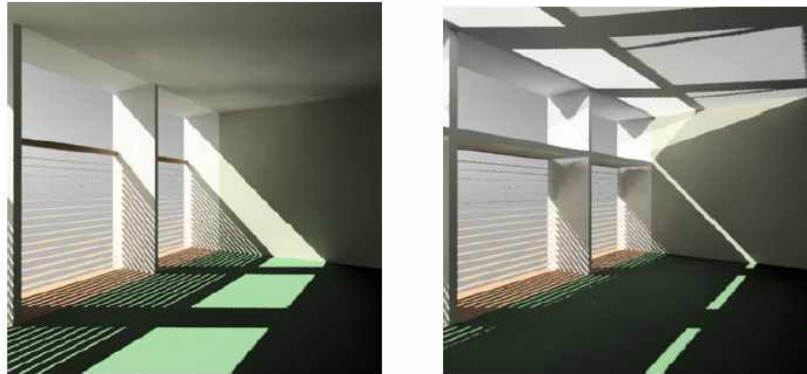


[그림 1.4] 광선반과 차양이 복합된 시스템^[56]

김덕우 외(2009)는 광선반이 설치된 건물의 에너지 사용특성을 EnergyPlus 시뮬레이션으로 분석하여 연간 9.6 % - 38.7 % 냉방에너지가 감소하는 효과를 증명하였다^[53]. 전강민(2016)는 광선반 적용으로 조명 및 냉난방에너지 절감효과를 테스트베드를 통해 유효성을 검증하였다^[54]. Lee, H., et al(2017)은 높은 풍압에 적용 가능한 청공 광선반을 개발하여, 청공 비율, 각도, 크기에 따라 시나리오를 제안하고 디밍 제어 실험으로 조명에너지 소비 절감량을 평가하였다^[55]. Lee, H., et al(2018)은 광선반이 설치된 새로운 차양 시스템을 개발하여 균제도를 개선시키고 조명에너지 소비량 감소효과를 실험을 통해 증명하였다(그림 1.4)^[56]. Mesloub, A., et al(2020)은 사막에 위치한 건축물에 PV 광선반을 제안하여, 채광 개선 효과를 개선하고 에너지 사용을 85 % 이상 감소시키는 효과를 검증하였다^[57].

(4) 빛환경 및 채광성능 개선 연구

광선반은 개구부를 통해 실내로 유입되는 직사일광을 차단하고 반사면을 통해 실내 깊숙이 주광을 유입시켜 빛환경을 개선하고 사람이 느끼는 시각적 쾌적감을 증가시키는 효과가 있다. 본 절에서는 광선반이 실내 빛환경을 개선하고 채광성능을 향상시키는 효과를 검증한 연구와 결과를 정리한다(표 1.4).



[그림 1.5] 광선반 유무에 따른 실내주광환경 변화^[63]

Beltran, L. O., et al(1994)는 광선반을 개발하고 스케일 모형을 제작 및 실증하여 실내조도 및 균제도 향상을 평가하여 빛환경 개선 효과를 증명하였다^[58]. Littlefair, P. J.(1995)는 초기 컴퓨터 프로그램을 통해 광선반 채광성능을 검증하였다. 광선반은 실내조도를 15 % 증가시키고 균제도를 향상하여 빛환경을 개선하는 것을 검증하였다^[59]. Lee, E.S., et al(1996)은 지붕 채광창과 광선반이 융합된 시스템을 개발하여 사무실 건물에 적용해 과도한 주광 유입을 방지하는 효과를 실험을 통해 증명하였다^[60]. Soler, A., et al(1996)는 광선반이 설치된 실내공간에서 태양고도와 방위각에 따라 변화하는 평균 실내조도 비율을 정량적으로 계산하였다^[61,62]. 조일식 외(2001)는 광선반을 통해 직달 일사와 현취를 방지하고 실내 안쪽 깊은 곳까지 조도 레벨을 유지해 시환경 개선 및 조명에너지 절감 효과를 연구하였다(그림 1.5)^[63]. 김기철(2004)는 경사형 광선반 채광시스템을 개발하여 채광성능을 평가하였다. Mock-up 실험을 통해 평균 주광 조도비가 개선되고 실내 채광성능이 향상된 것을 증명하였다^[64]. 김태형(2006)은 학교 교실 공간에 광선반을 실증실험하여 재실자 시환경 개선 효과를 정량적으로 산출하여 실효성을 검증하고 기초자료를 정리하였다^[65]. 한은수 외(2008)는 광선반 적용으로 발생하는 불쾌 현

휘의 원인을 규명하고 광선반 재료와 시야각을 변형시키는 조건으로 실험하여 불쾌 현휘를 방지하는 방법을 도출하였다^[66]. Freewan, A. A., et al(2008)는 아열대 기후에 위치한 건축물의 작업면 조도와 균제도를 향상하기 위해 광선반과 실내 천장 형상을 제안하고 시뮬레이션 분석을 통해 실내조도 개선과 균제도를 증가시키는 결과를 정리하였다^[67].

이처럼 광선반에 관한 연구는 대학 및 주요 연구소를 중심으로 광선반 형상에 따른 실내 빛환경 및 시각적 쾌적감을 개선하는 효과와 에너지 절감기술과 연계하여 조명 부하 저감을 검증하는 다양한 선행연구들이 수행되었지만, 광선반 자체를 열환경 제어 요소로 활용하여 실내 열환경 및 재실자 쾌적감을 개선하거나 냉난방에너지 사용량을 절감하는 연구는 지금까지 수행되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 광선반을 열적으로 활성화시킨 복사냉난방 복합형 광선반 시스템을 개발하여 빛환경 및 열환경 개선 효과와 건물에너지 절감 성능을 실증 실험과 시뮬레이션을 통해 친환경건축물 설계요소 및 녹색 건축 조성 기술로서의 적용 효과를 분석하여 복사냉난방 복합형 광선반 시스템 적용 가능성을 검증하고자 한다.

<표 1.1> 광선반 설계 요소에 대한 연구 동향

저자	채광성능 개선을 위해 고려된 요소		실험 실증	시뮬레이션	주요 결과	성능평가 중 열환경 고려
	광선반 요소	기술 적용				
Claros, S. T. et al (2001) ^[26]	Material (metacrilate)	Overhang system	0 (mock-up)	X	Daylight performance	Not considered
Claros, S. T. et al (2002) ^[27]	Material (reflectance)	-	0 (test-bed)	X	Indoor illumination distribution	Not considered
최봉철(2002) ^[28]	폭, 각도 반사재질(경면, 확산)	-	X	0 (RADIANCE)	변수에 따른 다양한 분석을 시뮬레이션하여 설계단계 기초자료 및 평가방법 제시	Not considered
김정태 외(2003) ^[29]	폭, 높이, 개수, 반사율, 내·외부 설치 유무	-	X	0 (Lumen Micro 2000)	채광성능과 건축적 적용성을 고려해 1m이하 크기의 광선반 설계 제안	Not considered
Al-Sallal, K. A. (2006) ^[30]	Adding a light shelf, material(reflectance)	-	0 (test-bed)	X	Visual environment, Glare	Not considered
정유근(2007) ^[31]	높이, 형태, 외부 광선반 유동각도	-	X	0 (Lightscape)	1.8m 높이에 혼합형 광선반(외부 폭 600mm, 각도 15° / 내부 폭 400mm, 각도 0°)을 설치할 때, 균제도 및 채광성능 가장 효과적	Not considered
김동수 외(2011) ^[32]	곡면형 반사판	-	X	0 (Lightscape)	확산광 대량 발생으로 모든 계절에 균제도 향상, 평균 휘도 하향 효과	Not considered
Raphael, B. (2011) ^[33]	Angle, width	Adaptable geometry	X	0 (Radiance)	Energy saving, daylight performance	Not considered
채우리(2013) ^[34]	폭, 각도, 설치 위치 (외부, 내부, 혼합)	-	0 (test-bed)	X	내부형, 외부형, 혼합형 광선반의 각도와 폭을 조정해 채광성능과 균제도 최적인 도출	Not considered
Lim, Y. W. et al (2015) ^[35]	Dimension, angle, orientation	-	X	0 (Radiance)	Daylight distribution uniformity, Indoor visual comfort	Not considered
Meresi, A. (2016) ^[37]	Angle, width combination with louvers,	-	X	0 (Radiance)	Indoor illumination distribution	Not considered
Moazzeni, M. H. et al(2016) ^[38]	Dimension, angle, window direction	-	X	0 (Radiance, DIVA for Rhino)	Indoor daylight distribution, Visual comfort	Not considered
Lee, H. et al (2019) ^[39]	Curved reflector, angle, thickness	Dimming system	0 (test-bed)	X	Indoor illumination uniformity, Lighting energy	Not considered
백정엽 외(2021) ^[40]	각도, 반사면 재질	-	X	0 (Ecotect, Radiance)	확산필름 부착된 30° 광선반이 실내 조도 및 현휘를 개선, 광선반 위 창에 볼록&오목 렌즈 적용시, 에너지 부하 증가 및 쾌적성 불리	Not considered

<표 1.2> 광선반 기술 연계 연구

저자	채광성능 개선을 위해 고려된 요소		실험 실증	시뮬레이션	주요 결과	성능평가 중 열환경 고려
	광선반 요소	기술 적용				
박훈 외(2012) ^[41]	각도	PV 일체형 태양광 시스템	0 (mock-up)	X	반사면 각도 0° 일 경우, 발전성능과 최대 전력 비가 가장 큼, 각도가 커질수록 발전효율 감소	Not considered
이종수(2013) ^[42]	두께, 반사율, 반사면 재료 (Polycarbonate)	-	0 (mock-up)	0 (Energy Plus, ECOTECH)	반사면 두께가 커질수록 채광성능 감소, 반사율 이 증가할수록 조명 부하 감소(8.9~15.5%), 난 방 부하 감소(2.4~4.4%), 냉방부하 증가 (9.2~16.3%)	Not considered
김상훈 외(2014) ^[43]	광선반 각도, 광선반 모듈 각도	재실자 위치 인식기술	0 (test-bed)	X	재실자 위치에 따라 광선반 각도를 자동으로 조 절하는 이 시스템은 위치 인식기술 미적용 시스 템보다 96.9% 조명에너지 저감 가능	Not considered
Hwang, T. et al(2014) ^[44]	Angle,	PV module (attached to the reflector)	0 (mock-up)	X	Luminance, solar radiation, Electricity generation	Not considered
이행우 외(2015) ^[45]	반사 결정면	-	0 (test-bed)	X	결정면 광선반은 실내 균제도 29.9%~34.3% 개 선, 조명에너지 7.98%~13.3% 저감	Not considered
김기훈 외(2016) ^[46]	각도, 분할 반사면	PV 시스템, 분할 반사면 각도 제어 시스템	X	0 (Relux)	실내 조도와 균제도 향상 및 실내 후면 주광 유 입량 증가, PV 시스템 적용 면적이 증가하여 (28.08%) 발전 효율 향상	Not considered
정성권 외(2017) ^[47]		조광제어 시스템	X	0 (Lightscape)	청천공 및 부분 담천공에서 광선반과 조광제어 시스템으로 조명에너지 사용량 50% 이상 저감	Not considered
김정민 외(2018) ^[48]	각도, PV 부착 면적	PV 시스템	0 (test-bed)	X	PV 광선반은 23.7%~58.1% 조명에너지 저감, 하 지와 동지의 최적 각도와 PV 면적 제안	Not considered
장민우(2018) ^[49]	각도, 프리즘시트 반사면	-	0 (test-bed)	X	프리즘시트 광선반은 일반 광선반에 비해 조명 에너지 사용량 14.9% 저감, 균제도 매우 낮음	Not considered
Kim, K. et al (2019) ^[50]	Angle, width, height	User recognition, dimming system	0 (test-bed)	X	Lighting energy saving, Standards and energy consumption	Not considered
Bahdad, A. A. S. et al(2020) ^[51]	Angle, width, ratio, height, reflectivity	Genetic algorithm	0 (mock-up)	0 (Radiance)	Optimized daylight design parameter	Not considered
윤연주 외(2020) ^[52]	-	조광제어 시스템	X	0 (Lightscape)	안정적인 조명제어와 조명에너지 절약 효과를 다양한 천공조건에서 분석	Not considered

<표 1.3> 광선반 에너지 절감 효과 연구

저자	채광성능 개선을 위해 고려된 요소		실험 실증	시뮬레이션	주요 결과	성능평가 중 열환경 고려
	광선반 요소	기술 적용				
김덕우 외(2009) ^[53]	광선반 설치위치 (외부, 내부, 혼합)	-	X	0 (EnergyPlus 3.0)	형태에 따른 연간 에너지 절감량 도출(외부:9.6~38.7%, 내부:1.4~5.2%, 혼합:9.3~26.3%)	Not considered
전강민(2016) ^[54]	각도	-	0 (test-bed)	X	광선반 각도 30° 일 때, 조명사용량 10.2% 저감, 냉방사용량 0.203kWh 저감, 동지시 오히려 난방에너지 증가시킴	Not considered
Lee, H. et al (2017) ^[55]	Angle, width, perforated reflector	-	0 (test-bed)	0 (Radiance)	Indoor illumination distribution, Lighting energy consumption	Not considered
Lee, H. et al (2018) ^[56]	Lighting length, shading length, angle, width, height	Awning system (change length)	0 (test-bed)	X	Cooling load reduction, Visual comfort lighting energy consumption	Not considered
Mesloub, A. et al(2020) ^[57]	Angle, height	PV module	X	0 (DIVA for Rhino)	Visual comfort, daylight distribution, Lighting energy consumption	Not considered

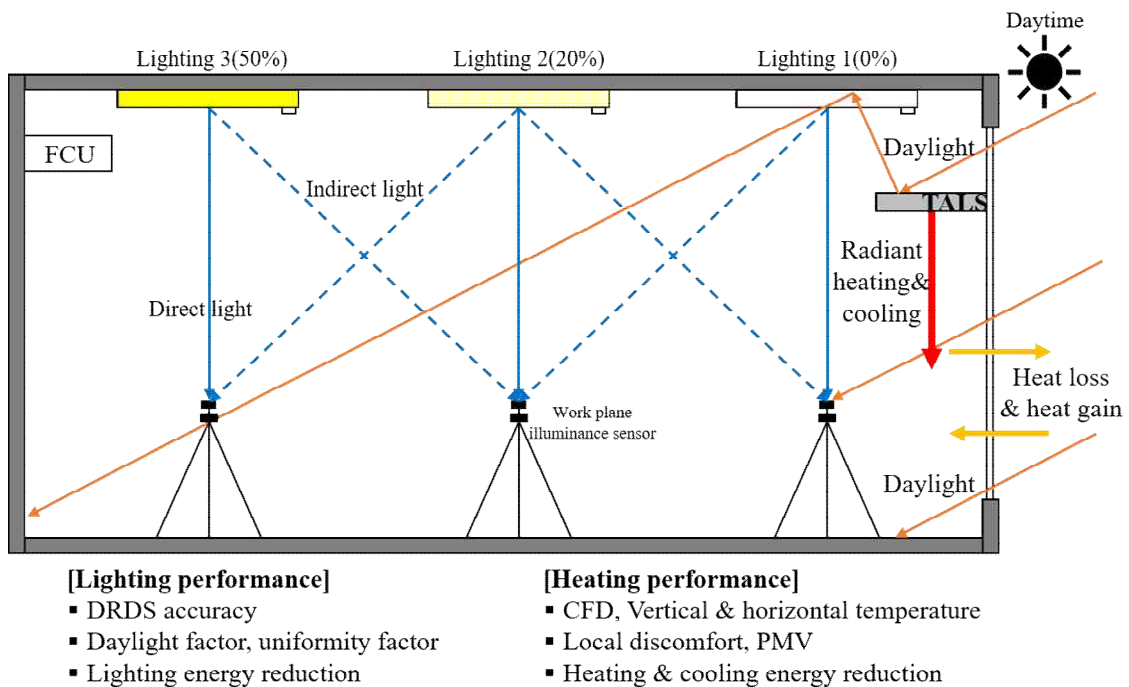
<표 1.4> 광선반 빛환경 및 채광성능 개선 연구

저자	채광성능 개선을 위해 고려된 요소		실험 실증	시뮬레이션	주요 결과	성능평가 중 열환경 고려
	광선반 요소	기술 적용				
Beltran, L.O. et al (1994) ^[58]	Optimized geometry	-	0 (test-bed)	X	Daylight level, Luminance gradient, Lighting&cooling energy consumption	Not considered
Lee, E.S. et al (1996) ^[60]	Angle	Light redirecting skylight system	0 (test-bed)	0 (Radiance)	Light redirection, balance, and quality Lighting energy saving	Not considered
조일식 외(2001) ^[63]	-	-	X	0 (Lightscape)	시뮬레이션 해석방법 결과 분석(Ray tracing, Radiosity), 혼합해석방법 알고리즘 제안	Not considered
김기철(2004) ^[64]	외부 경사형 반사면 내부 평판형 반사면	-	0 (mock-up)	0 (Lightscape)	실내 평균 주광 조도비 0.2~1.3% 상승, 실내 중앙 채광성능 향상(외주부 채광 Collector 제안)	Not considered
김태형(2006) ^[65]	광선반 적용 유무	-	0 (test-bed)	0 (Modeling)	시환경 개선 효과를 정량적으로 분석해 실효성 검증과 기초자료 제시,	Not considered
한은수 외(2008) ^[66]	-	광선반 위창 재료 (한지, 셀로판지)	0 (test-bed)	X	광선반 위창 재료와 각도 조정, 불쾌 현취 저감	Not considered
Freewan, A. A., et al(2008) ^[67]	-	Ceiling geometry	0 (mock-up)	0 (Radiance)	Indoor illumination distribution	Not considered

1.2 연구 목적

광선반은 자연채광성능 향상과 조명에너지 절감 관점에서 연구 및 실용화가 많이 이루어졌다. 앞 절의 국내·외 연구 동향은 설계안을 변경하거나(폭, 너비, 높이, 각도, 곡률, 반사율, 천장면 형태) 구동 형태(자동화, 높이 및 각도 조절) 및 복합 기술(유전 알고리즘, 기술 융복합 및 최적화) 적용으로 빛환경 개선 및 에너지 절감을 위한 다양한 연구가 진행되었다. 하지만, 광선반에 의한 실내 열환경 및 공조 부하에 미치는 영향에 대한 연구는 기초적인 수준이며 매우 제한적이다.

광선반은 하절기에 실내로 유입되는 태양광 또는 일사 에너지를 증가시켜 냉방부하 증가와 열적 불균형 문제를 일으킬 수 있고, 동절기에는 콜드 드래프트를 발생시켜 재실자의 쾌적성을 침해할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 복사냉난방 복합형 광선반을 개발하여, 냉난방 공조 부하를 저감하고 실내 냉난방 에너지를 절감하는 친환경 설비시스템 요소 기술 효과를 검증한다. 또한, 복합패널의 광선반 시스템과 광센서 조광제어 시스템을 융복합하여 빛환경 개선 효과와 시각적 쾌적감을 분석하고, 자동 디밍 제어를 통해 조명에너지의 절감 효과를 실증한다. 그림 1.6에 연구 핵심 개념을 정리하였다.



[그림 1.6] 복사냉난방 광선반 연구 핵심 개념

1.3 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 건물 실내 빛환경을 개선할 수 있는 광선반을 열적으로 활성화시킨 즉, 광선반 하부면을 가열 및 냉각할 수 있는 복사냉난방 광선반 시스템을 개발하여 빛환경 성능평가와 광센서 조광제어 시스템을 적용하여 조명에너지 절감 효과를 검증한다. 또한, 열환경 성능평가 및 냉난방에너지 절감 성능을 검증한다.

1장에서는 광선반 연구 배경과 동향(문헌조사)을 고찰하여 본 연구에서 제안하는 복사냉난방 복합형 광선반 개발의 창의성을 설명하고, 연구 목적, 연구 내용, 연구 방법을 소개한다. 2장에서는, 새롭게 제안된 복사냉난방 통합형 광선반 시스템의 기능과 효과를 개념설명 하고, 빛환경 및 열환경을 성능평가하는 Test bed 개요와 모니터링 방법 및 실험 프로세스를 정리한다. 또한, 광선반과 연계된 광센서 조광제어 시스템의 정의와 보정계수 예측식 개발 및 정확도 평가를 설명한다. 3장에서는, 광선반 적용 유무에 따른 실내 빛환경 성능평가 지표를 고찰하고 실증 실험과 빛환경 시뮬레이션을 통해 개선효과를 정량적으로 검증한다. 4장에서는, 광선반의 복사냉난방 운전 및 가동상태에 따른 열환경 개선 효과를 실내온도 분포, 온도차 및 재실자가 느끼는 쾌적감으로 평가하였으며, CFD 시뮬레이션을 통해 열적 성능을 증명하였다. 5장에서는, 광센서 조광제어와 광선반 빛환경 개선 효과를 통한 조명에너지 절감량과 복사냉난방을 통한 냉난방에너지 절감량을 실험을 통해 증명하여, 본 연구에서 제안하는 광선반의 건물에너지 절감 효과를 분석한다(그림 1.7). 6장에서는, 본 연구의 결과를 총정리하고 경제, 산업, 사회적 기대효과와 향후 연구를 제시한다.

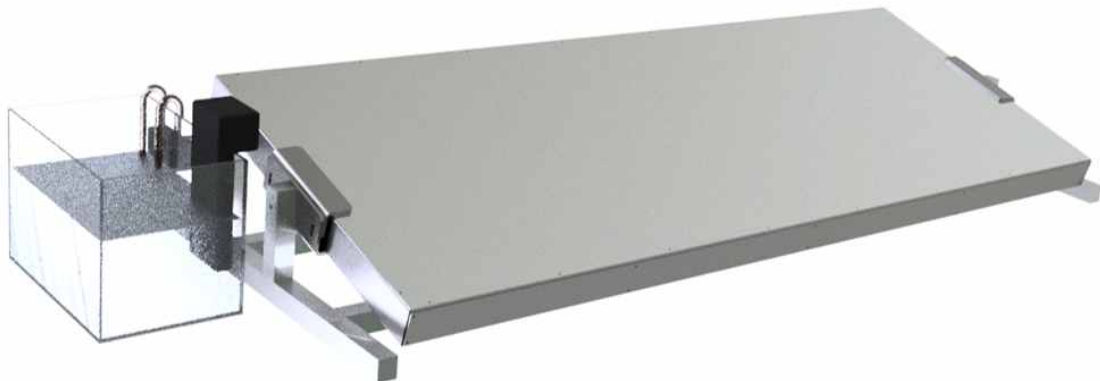


[그림 1.7] 연구흐름도

제2장 복사냉난방 복합형 광선반(TALS) 개념 및 Test bed 구축

2.1 TALS(Thermally Activated Light Shelf) 개념

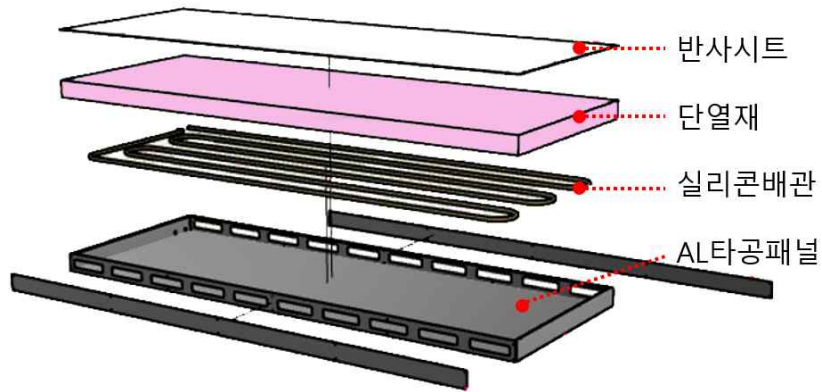
본 장에서는 실내 자연채광 성능 향상과 외주부 부하를 저감하여 조명 및 냉난방 에너지 절감이 가능한 복사냉난방 통합형 광선반 시스템을 제안하고 성능평가를 위한 Test bed 구축에 대한 이론 및 내용을 설명한다. TALS(Thermally Activated Light Shelf, 이하 TALS)는 냉난방복사 시스템을 융복합하여 자연채광 성능, 재실자 쾌적감 개선 및 건물에너지 절감 효과를 향상할 수 있는 복합형 광선반 시스템이다(그림 2.1).



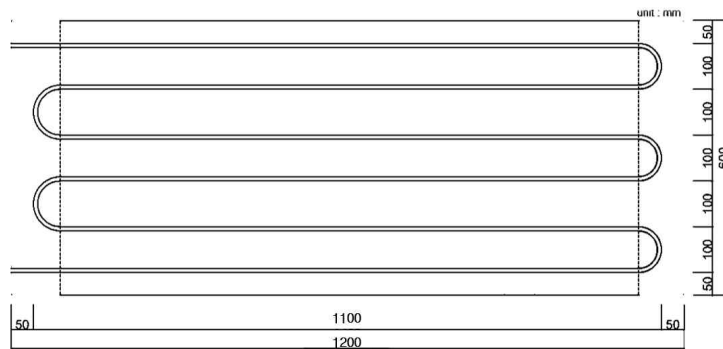
[그림 2.1] TALS

TALS는 상부면, 중간부, 하부면으로 구성되고, 각각의 구성요소와 기능을 설명한다. 먼저, TALS 상부면은 일반 광선반 반사면과 같은 기능을 하고 반사율 95 % 시트가 부착되어 외주부에 유입되는 주광을 실내 안쪽으로 빛을 반사해 균일한 빛환경을 조성하고 재실자 작업능률 및 시각적 쾌적감을 증가시킨다. TALS 중간부는 복사냉난방 순환수를 공급하는 실리콘 재질의 순환용 배관을 하부면 위에 동코일 열전도 테이프로 고정하고, 하부 표면으로 방열량과 방냉량을 극대화하기 위해 두께 50 mm 단열재를 설치하였다. TALS 복사냉난방 급수(난방공급온도 45 °C, 냉방공급온도 15 °C)는 설비시스템 펌프장치를 통해 열원이 공급된다. 하부면은 열전

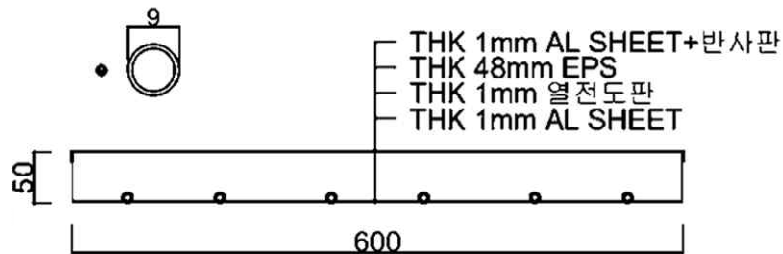
도울과 방사율이 뛰어난 알루미늄 소재로 계획하여 TALS가 설치된 외주부에서 냉·난방복사열 교환 기능을 한다(그림 2.2). TALS 시스템은 그림 2.3의 설계안을 기본으로 제작되었다. 전체적인 구조는 두께 1 mm의 알루미늄 시트에 열교환을 촉진시키기 위해 0.05 mm 홀을 타공하였다. TALS는 1,200 mm(L) × 600 mm(W) × 50 mm(H) 크기로 설계 및 제작되었다. 제작 과정은 그림 2.4와 같다.



[그림 2.2] TALS 구성 전개



(a) TALS 배관 평면도



(b) TALS 단면도

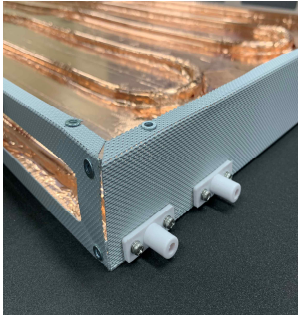
[그림 2.3] TALS 시스템 설계안



(a) 실리콘 배관 부착



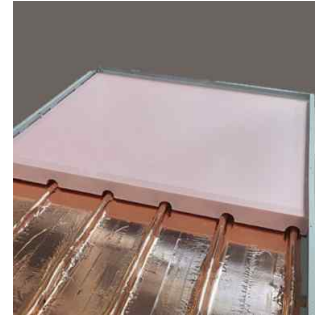
(b) 동테이프 부착



(c) 배관 연결구 부착



(d) 단열재 재단



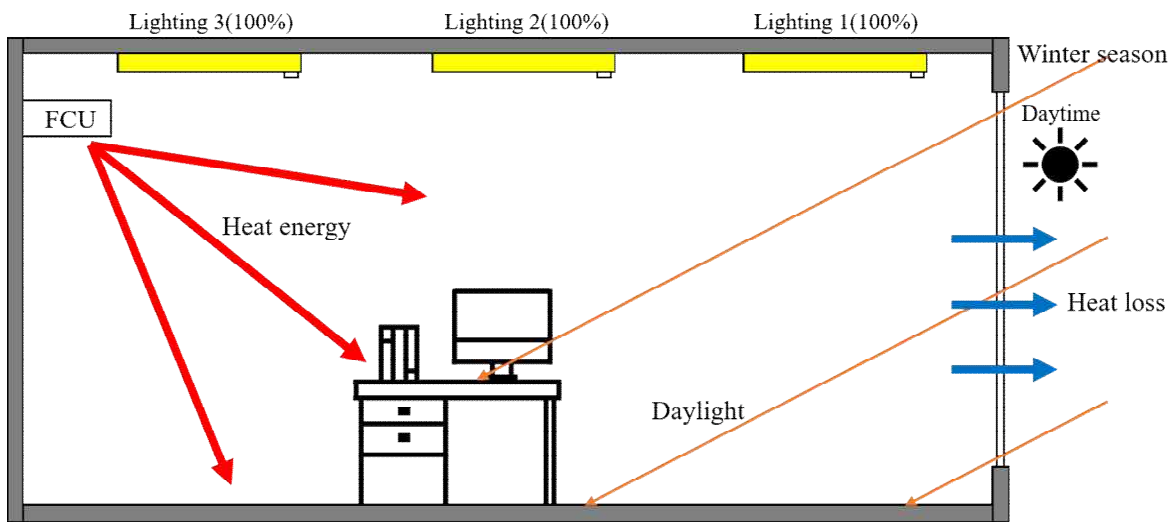
(e) 단열재 설치

[그림 2.4] TALS 시작품 내부 제작 과정

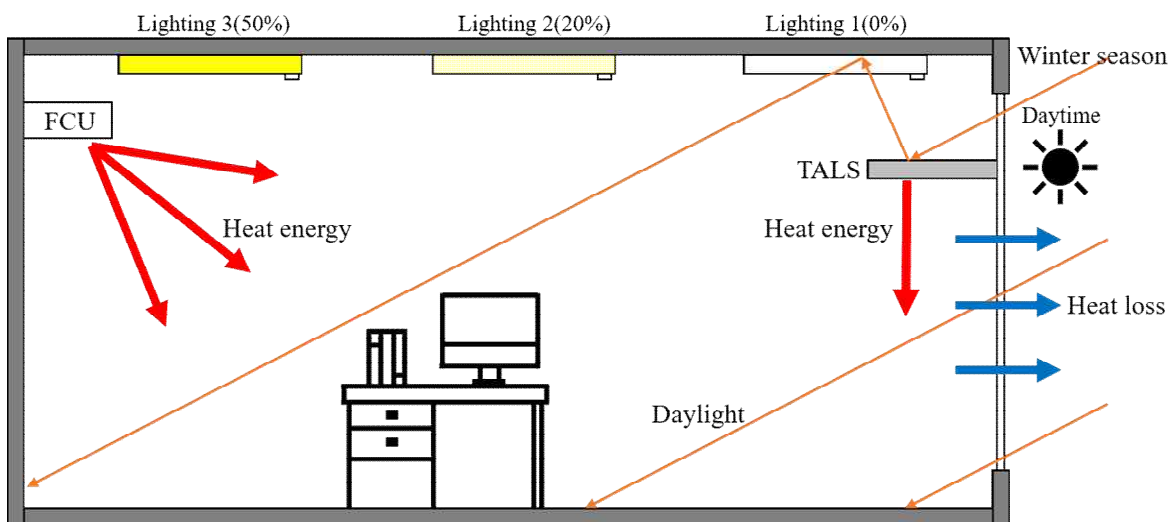
TALS는 패시브 기술과 액티브 기술을 결합한 복합 요소 기술로 건축물 적용으로 열적 부하 및 조명 부하를 저감할 수 있는 기대효과가 있다. 사무소, 학교, 헬스케어 용도 등의 건물에 그린 리모델링 기술로도 적용 가능하며, 기존 외피를 변경하지 않고 추가 설치하는 방법으로 기존 외피를 유지하면서 빛환경 및 열적 성능을 개선할 수 있다. 특히, 외피 부하가 큰 건물의 경우 개선 효과가 매우 뛰어날 것으로 보인다. 또한, 기존 공조설비에 TALS를 병렬시스템으로 설치 가능하여 간단한 시공의 장점이 있다. TALS는 빛환경 및 열환경을 통합 조절할 수 있는 시스템으로 에너지 수요가 많은 건축물의 에너지 절약에 큰 효과가 있을 것으로 보인다. 그림 2.5와 2.6은 TALS 설치 전·후의 겨울철 실내 빛환경 및 열환경을 도식화한 그림이다. 그림 2.7와 2.8은 TALS 적용 전·후의 여름철 실내 빛환경 및 열환경을 나타내었다. 또한, TALS 반사면으로 반사된 빛은 재실자가 현휘를 느끼게 하는 원인이 될 수 있기에 시야 높이보다 높은 2.1 m에 설치하여 현휘를 방지하고 외부 조망 및 채광을 확보하였다.

TALS 제어 프로세스는 다음과 같다. 사무실 용도 건축물 운용시간은 오전 9시부터 오후 6시까지로 우리나라 법정근로시간을 기준으로 하였다^[68]. 빛환경은 광센서

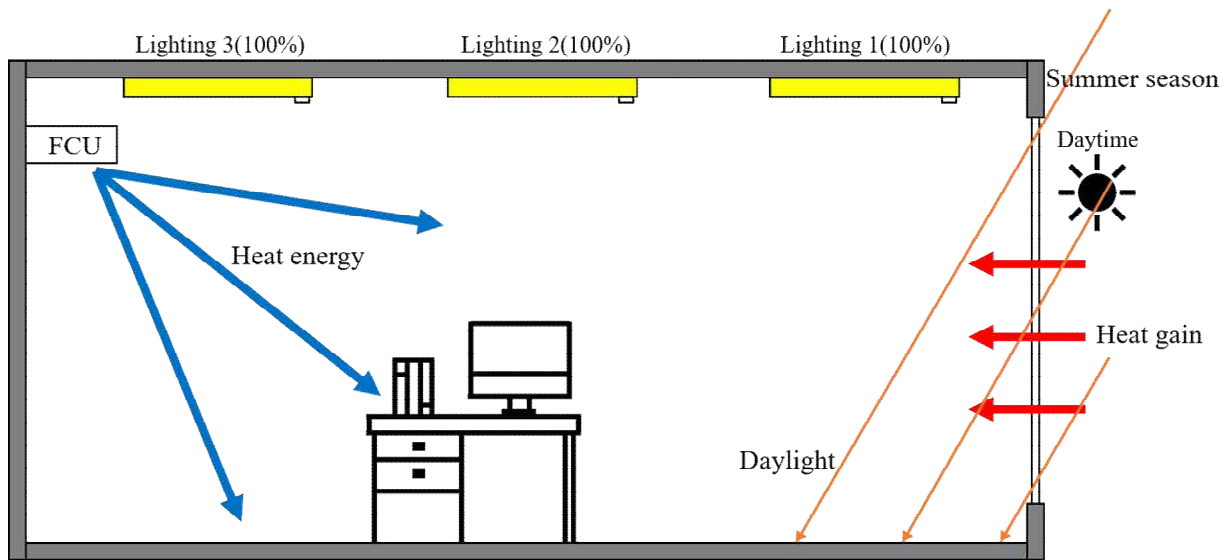
조광제어 시스템과 연동하여 실내로 들어오는 주광으로 연산된 데이터 결과를 기준으로 조명을 디밍 제어하여 실내 작업면 조도 600 lx를 구현하는 방법으로 운용된다. 열환경은 Test bed의 항온을 유지하는 자동제어 시스템과 연계하여, 공조기와 TALS 열원 공급은 난방 시 45 °C, 냉방 시 15 °C로 재실시간에 공급되고, 실내 난방 온도 기준 20 °C, 냉방 온도 기준 26 °C에 Dead band 0.5 °C 범위로 유지한다. TALS에 공급되는 열원은 공조시스템 냉·난방수 온도와 동일하고 7 LPM 유량이 공급된다. 냉방 공급 열원은 하절기 설계조건(온도: 26 °C, 상대습도: 50 %)을 고려하고 결로 발생을 방지하기 위해 15 °C로 설정하였다.



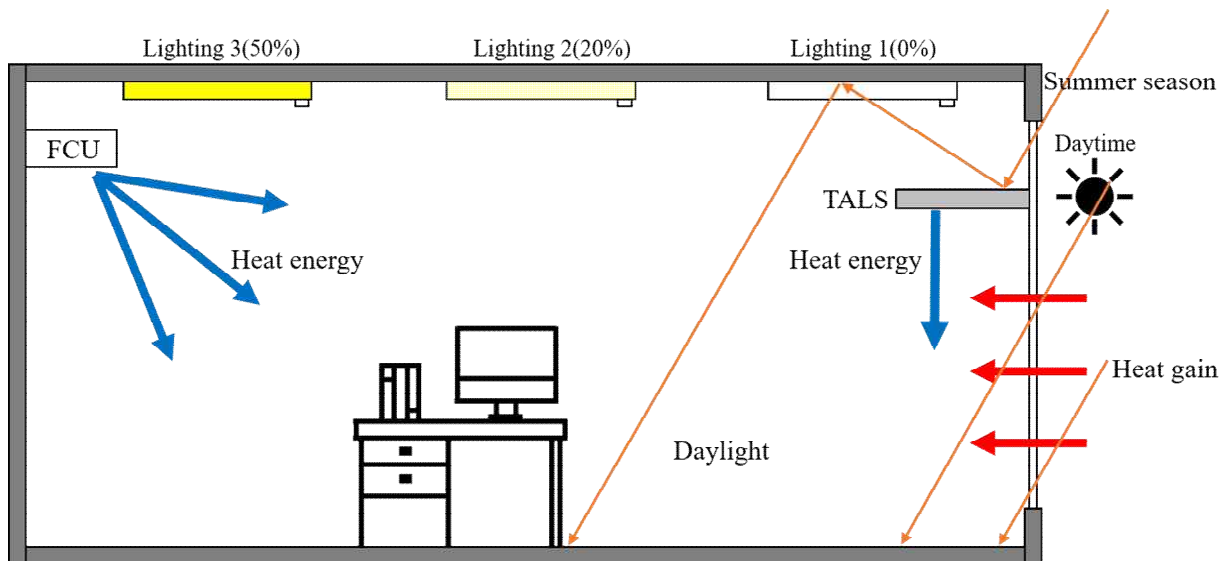
[그림 2.5] TALS 적용 전, 겨울철 실내 빛환경 및 열환경



[그림 2.6] TALS 적용 후, 겨울철 실내 빛환경 및 열환경



[그림 2.7] TALS 적용 전, 여름철 실내 빛환경 및 열환경



[그림 2.8] TALS 적용 후, 여름철 실내 빛환경 및 열환경

2.2 Test bed 실증 실험 개요

2.2.1 Test bed

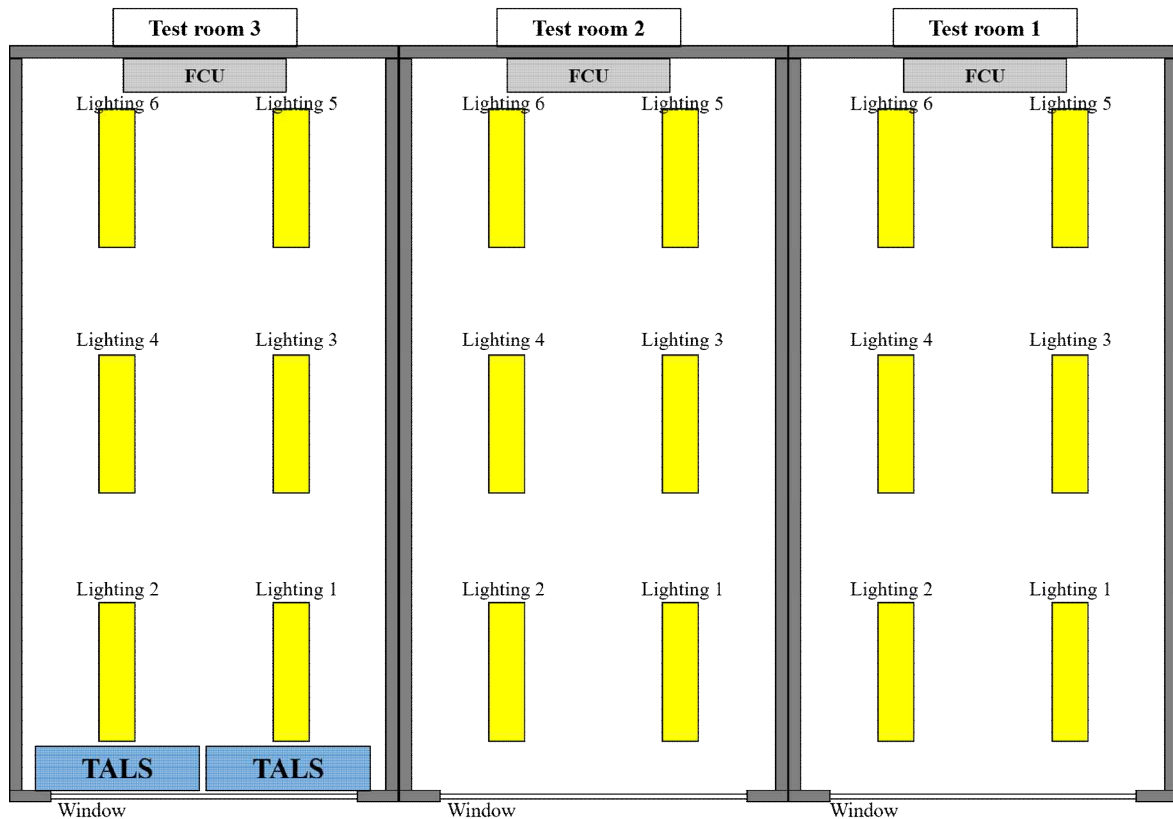
Test bed는 광주광역시 C 대학에 위치(위도 35.13° , 경도 126.92° , 방위각 23°)한 교육연구시설로 제어실, 기계실, 3개의 실험실로 구성되어 그림 2.9과 같다. 크기는 폭 10.35 m , 너비 12.4 m 로 연면적은 128.34 m^2 이다. 주변 건물과 인공환경에 의한 간섭을 받지 않는 고지대에 위치한 1층 건물이다. Test room은 빛환경 및 열환경 실험 조건에 맞게 셋팅하여 성능평가를 진행하였다.

실외 환경에 의한 열교 현상 및 실내부하 변동을 최소화하기 위해 갑종방화문(차압 25 Pa 에서 공기누설량 $0.9\text{ m}^3/\text{min}$)을 설치하고, 지붕면과 간접 면하는 공간을 만들기 위해 실험실 상부에 여유 공간을 두었다. 또한, 국토교통부고시 ‘건축물의 에너지 절약 설계기준’ 남부지역에 위치한 건축물 열관류율(외벽 $0.320\text{ W/m}^2\text{K}$, 지붕 $0.260\text{ W/m}^2\text{K}$ 이하)을 충족시킨 단열공사가 되었다^[69]. 바닥은 외기에 직접 면하지 않고 바닥난방을 하지 않는 $0.350\text{ W/m}^2\text{K}$ 이하 기준을 충족하고, 창호는 THK26 로이복층유리(5LE+16AR+5LE)가 전면 설치되어 $1.800\text{ W/m}^2\text{K}$ 이하 기준을 부합한다.



[그림 2.9] C대학 Test bed

본 연구에서 제안한 TALS의 환경 개선 및 에너지 절약 성능을 평가하기 위해 각
 각의 Test room 조건을 계획하였고, 1개의 실험실 공간의 크기는 2,750 mm(W) ×
 6,200 mm(L) × 2,700 mm(H)이며, 바닥면적은 17.05 m²이다. Test bed는 3개의
 실험실 공간으로 이루어져 있고, 조명기구는 20단계 디밍 제어가 가능한 40 W
 LED 6개가 설치되어 있다(그림 2.10).

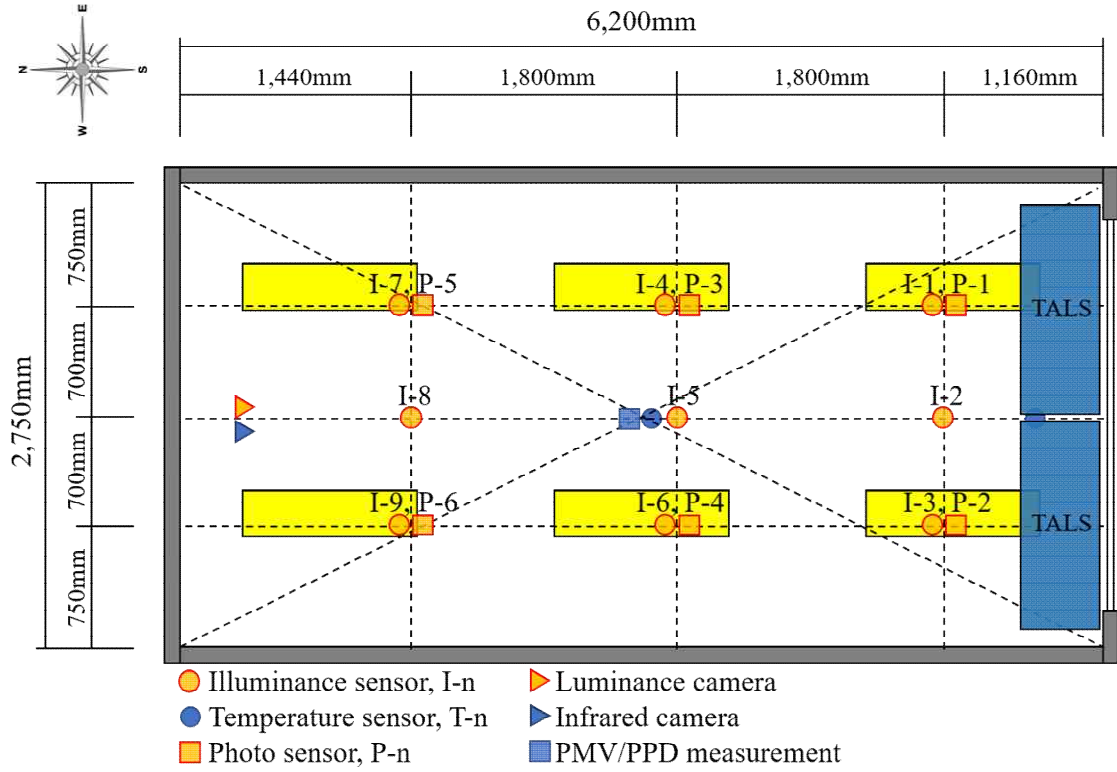


[그림 2.10] C대학 Test bed(평면)

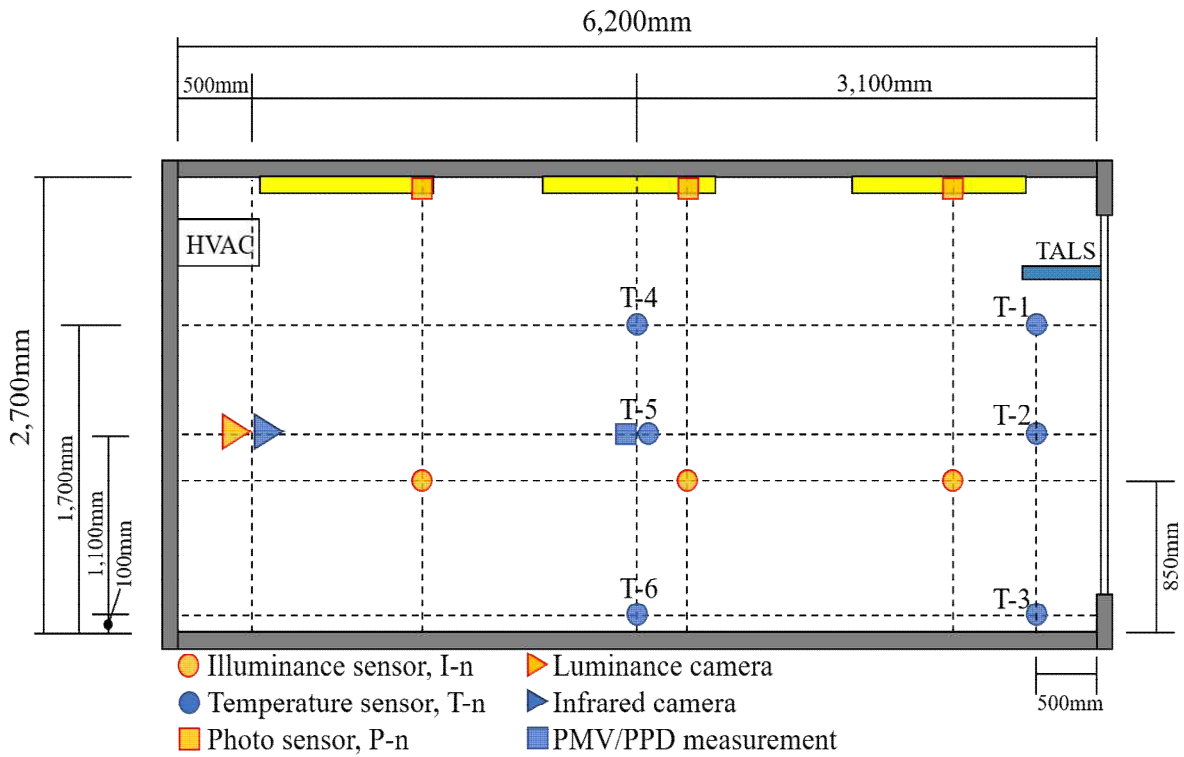
2.2.2 실증 실험 데이터 모니터링 시스템 개요

TALS의 빛환경 및 열환경 개선 효과를 분석하기 위해 설치된 모니터링 장치와 방법을 설명한다. 먼저, Test room과 Reference room은 실내 구성요소, 재료 및 크기가 동일하다. 모니터링 상세 계획은 그림 2.11, 2.12에 나타내었고 내용은 다음과 같다. 작업면 조도를 측정하는 조도계는 바닥면으로부터 850 mm 높이에 일정한 간격으로 배치되었고 각 조명기구의 수직면 아래에 설치하였다. 광센서는 조명기구에 자체 내장되어 6개의 광센서가 천장면 조도 값을 센싱하여 디밍 제어에 필요한 알고리즘 Input 값을 전달한다. 실내온도를 측정하는 열전대는 실내 정중앙의 1,100 mm 높이에 설치하였다. 모니터링된 실내온도는 공조시스템 냉·난방 온도제어 기준으로 사용되기 때문에 외부 열적 요소에 의한 간섭을 최소화 해야한다.

휘도계와 열화상 카메라는 실내 안쪽에서 사람이 앉아서 바라보는 시선 기준 1,100 mm 높이에서 창면을 측정하여 창면 휘도와 글레어 현상을 측정하고, 외주부 온도변화를 비교하였다. 수직 온도분포를 측정하는 열전대는 1,700 mm, 1,100 mm, 100 mm 높이에 실내 중앙과 외주부에 각각 설치하였고, 외주부 센서는 창면으로부터 500 mm 간격을 두었다. PMV 측정기는 실내 정중앙에 설치하고 기류 간섭, 온도변화 등 결과에 영향을 미칠 수 있는 외부 요소를 제거 후 모니터링하였다. 또한, 모든 모니터링 장치는 Test room과 Reference room에 동일하게 설치 및 운용하였다. 모든 실험은 외부 환경의 간섭을 최소화하기 위해 최대한 밀폐된 환경에서 수행되었다.



[그림 2.11] Test bed 모니터링 계획(평면)



[그림 2.12] Test bed 모니터링 계획(단면)

(1) 조도계(Illuminance sensor, I-n)

실내 작업면 조도 및 실내 균제도의 정확한 측정을 위해 KONICA MINOLTA T-10A 조도계를 사용하였다(그림 2.13)^[70]. T-10A는 수광부 분리형 디지털 조도계로 상대 분광 응답도가 뛰어나고 측정범위가 0.01 lx - 299,900 lx이다. JIS C 1609-1: 2006(Illuminance meter Part 1: General measuring instruments) 규격^[71]에 부합하고 최대 30개 포인트의 조도를 연속으로 측정할 수 있다(표 2.1). 실내 빛환경 실험 모니터링을 위해 3개의 Test room에 작업면 높이인 바닥면으로부터 850 mm 높이에 일정한 간격으로 조도계 설치하고 데이터 로거를 통해 데이터를 수집하였다. 각 조도계는 조명기구 직하에 배치되었고, 실내 내주부 주광률을 평가하기 위한 조도계가 추가 설치되었다.



[그림 2.13] KONICA MINOLTA T-10A 조도계^[70]

<표 2.1> T-10A 조도계 성능

특징	설명
타입	수광부 탈부착이 가능한 다기능 디지털 조도계
조도계 분류	Conforms to requirements for Class AA of JIS C 1609-1: 2006 (Illuminance meter Part 1: General measuring instruments)
상대적 분광 응답	within 6% of the CIE spectral luminous efficiency
측정 범위	0.01 to 299,900 lx
선형성	±2% ±1 digit of displayed value
측정 속도	2 times/sec
측정 기능	조도(lx), 조도 차(lx), 조도비(%), 샘플링(h), 평균 조도(lx)

(2) 휘도계(Luminance camera)

실내 휘도 및 글레어 발생 현상을 측정하기 위해 하이랜드 코리아의 동영상 휘도계(ACE system)을 사용하였다(그림 2.14)^[72]. 남측이 창면인 실험실은 실외 환경변화에 따라 실내로 입사하는 빛의 양이 끊임없이 변화하는데, 동영상 휘도계는 면휘도 측정을 동영상으로 연속 측정이 가능하여(1초당 15프레임 촬영) 짧은 시간에도 휘도의 변화를 안정적이고 편리하게 측정할 수 있다. 표 2.2는 휘도계 성능을 정리하였다. 측정 정확도는 $\pm 3\%$ 로 매우 우수하며, 측정 목적과 빛의 세기에 따라 필터를 선택하여 관측할 수 있다. 또한, $30,000\text{ cd/m}^2$ 범위까지 측정 가능하며, 글레어 발생 여부를 파악할 수 있고 측정 정확도가 매우 높다. 빛환경 평가하기 위해 휘도계를 재실자 시야 높이인 바닥으로부터 $1,100\text{ mm}$ 에서 실내 안쪽에서 창면을 수평으로 바라보고 측정하였다.



[그림 2.14] 대면 동영상 휘도계

<표 2.2> 대면 동영상 휘도계 성능

특징	설명
카메라	640*480 pixels, USB CCD Camera
파장 감광도	Luminosity correction filter
렌즈	Standard : 6mm fixed focus lens H35° V26°
	Option : 4mm fixed focus lens H50° V37°
	Option : 6mm fixed focus lens H90° V67°
	Option : 12.5~50mm zoom lens H21° V16°
필터	Option : ND filter
측정 범위	0.1 - 30,000 cd/m^2
측정 정확도	$\pm 3\%$ Standard A lamp
측정 재현성	$\pm 0.5\%$ within

(3) 조명기구 광센서(Photo sensor, P-n)

조명기구는 실험실 천장면에 설치되어 있고 광센서는 그림 2.15과 같이 조명기구에 내장되어 천장면 조도를 측정한다. 실제 모니터링 광센서 센싱값은 게이트웨이를 통해 전달되어 광센서 조광제어 시스템 Input 값으로 계산되어 작업면 조도를 일정하게 디밍하는 알고리즘 데이터로 활용된다. 광센서는 광선반 반사면에 의해 반사된 빛이나 실내·외 환경에 의해 측정값에 영향을 미칠 수 있는 요소를 제거한 후 정확한 측정이 이루어지도록 조건을 설정하였다. 또한, 조광제어 알고리즘 연산을 위해 작업면 조도계와 수직인 위치가 되도록 계획해야한다.



[그림 2.15] 조명기구 광센서

(4) PMV/PPD 측정기

실내 예상온열감 측정을 위해 TESTO PMV 측정기를 사용하였다(그림 2.16)^[73]. PMV 측정기는 신진대사량과 착의량을 설정하고 온도, 습도, 흑구 온도, 기류 속도를 측정하여 실내 예상온열감 및 불쾌감을 자동으로 계산 분석한다. 측정기기 성능에 대한 자세한 설명은 표 2.3에 정리하였다. 본 연구에서는 광선반 복사냉난방 패널로 실내 열환경 개선 효과와 재실자가 느끼는 쾌적도를 검증하기 위해, 실내 정중앙에 바닥면으로부터 1,100 mm 높이에서 모니터링하였다. TALS 설치로 실내 열환경 개선 효과를 정량적으로 비교하기 위해 Reference room과 Test room에 동일하게 측정기를 설치하고 관측시간과 측정주기를 보정해 결과를 정리하였다.



[그림 2.16] TESTO PMV/PPD 측정기기^[73]

<표 2.3> TESTO PMV 측정기기 성능

기기	특징	설명
흑구 온도계	측정 범위	0 °C - +120 °C
	Application	ISO 7243, ISO 7726, DIN EN 27726, DIN 33403 ^[74-76]
난류 측정기	온도 측정 범위, 정확도, 분해능	0 °C - +50 °C, ±0.5 °C, 0.1 °C
	절대압 측정 범위, 정확도, 분해능	+700 - +1,100 hpa, ±3 hpa, 0.1 hpa
	기류 속도 측정 범위, 정확도, 분해능	0 - 5 m/s, ±0.03 m/s, 0.01 m/s
CO ₂ 측정기	온도 측정 범위, 정확도, 분해능	0°C - +50 °C, ±0.5 °C, 0.1 °C
	습도 측정 범위, 정확도, 분해능	+5 - +95 %RH, ±3 %RH, ±0 %RH
	절대압 측정 범위, 정확도, 분해능	+700 hpa - +1,100 hpa, ±3 hpa, 0.1 hpa
	CO ₂ 측정 범위, 정확도, 분해능	0 ppm - +10,000 ppm, ±50 ppm+3 측정값의 %, 1 ppm

(5) 열전대(수직 높이별 설치)

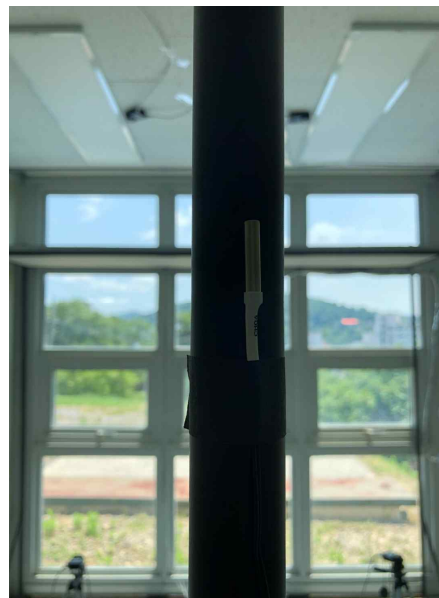
열전대는 EN 7726^[75]와 ASHRAE standard 55^[77]의 기준에 따라, 100 mm(Ankle), 1,100 mm(Torso), 1,700 mm(Head) 수직 높이에 각각 비접촉식 열전대를 실험실에 설치하였다. 모니터링은 다중채널 운용이 가능하고 릴레이 출력이 되는 데이터로거(그림 2.17)를 통해 데이터를 취득하였다. 그림 2.18에 열전대 설치 모습을 정리하였고, 열전대는 각 실에 외주부(창면으로부터 수평으로 500 mm 떨어진 지점)와 실내 중앙에 설치하여 수직 온도차와 수직 온도차에 의한 불쾌적을 평가하는 모니터링 데이터로 사용하여 TALS의 열환경 개선 효과를 분석한다.



[그림 2.17] 열전대 데이터로거



(a) 실내 외주부 수직높이별 열전대 설치 모습



(b) 실내중앙 수직높이별 열전대 설치 모습

[그림 2.18] 실내 수직온도차 측정을 위한 비접촉식 열전대 설치 모습

(6) 열화상 카메라

TALS의 열전도 및 대류 현상을 관측하기 위해 FLIR C2 열화상 카메라를 사용하였다(그림 2.19). 열화상 카메라 성능은 표 2.4와 같다. 적외선 분해능이 80×60으로 4,800개 픽셀 해상도로 표면 온도를 측정하고, 온도 분해능은 0.1℃로 정확한 온도 측정이 가능하다. 41° ×31° 시야각, 이미지 주파수 9 Hz, 파장대역 7.5 μm - 14 μm, 측정범위 -10 °C - +150 °C, 방사율과 측정치 보정이 가능하고 4가지의 팔레트 사용이 가능하다^[78]. 외주부에서 주로 발생하는 드래프트 위험도, 불균등 복사와 같은 열환경에 대한 TALS 복사냉난방 효과를 정량적으로 관측하고 평가하기 위해 열화상 카메라를 사용했다. 또한, TALS 내부에 설치된 배관의 점검과 펌프 및 유량계 작동 점검 등에 사용했다.



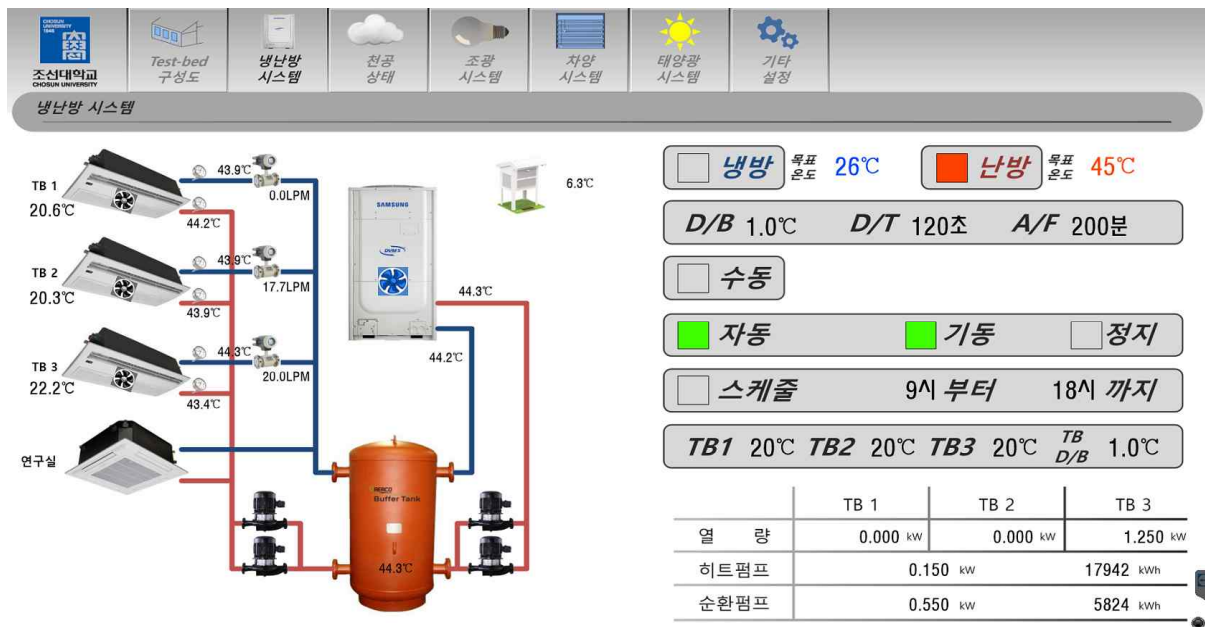
[그림 2.19] FLIR C2 열화상 카메라^[78]

<표 2.4> 열화상 카메라 성능

특징	설명
온도 측정범위	-10 °C - +150 °C
온도 분해능	0.1 °C
정확도(%)	25 °C ± 2 °C
적외선 해상도	80 × 60(4800 pixels)
시야각	41 ° * 31 °
이미지 주기	9 Hz
파장 주기	7.5 μm - 14 μm
색상 팔레트	mono, iron, rainbow, rainbow HC

(7) 냉·난방 자동제어 시스템

Test bed 공기조화설비는 자동제어가 가능한 시스템으로, 냉난방 운전 제어, 모니터링 및 작동상태를 실시간으로 확인할 수 있다. 목표 실내온도를 설정하면 제어 알고리즘을 통해 실내온도를 조절한다. 그림 2.20은 겨울철 실내 난방 제어 모습으로 난방 열원이 45 °C로 각 Test room에 공급되어 실내온도를 20 °C로 유지한다. 목표 온도가 초과하면 제어 신호를 보내 FCU 가동을 정지한다. 그림의 TB3은 TALS가 설치된 실험실으로 복사난방으로 다른 실험공간에 비해 실내온도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이처럼 목표 온도를 초과하는 경우 별도의 냉각을 위한 제어는 하지 않는다. 마찬가지로, 여름철 실내온도가 26 °C보다 낮아도 난방하지 않는다. 냉난방 공조는 수동 및 자동으로 운전할 수 있고 스케줄 제어가 가능하다. Test bed에는 KS C 9306에 규정하는 사무실 기준 단위 면적당(m^2) 부하량(150 kcal/h)을 만족하는 1way 3.5 kW(8.3 LPM) 용량의 실내기가 각각의실에 설치되었다^[79]. 히트펌프는 42 kW 용량(120 LPM)이고 열원 순환 펌프, 냉·온수 순환 펌프로 운용되고 있다. 각각 유량은 120 LPM, 60 LPM으로 소비전력은 0.75 kW이다. 또한, 버퍼 탱크를 설치하여 펌프 기동으로 발생하는 배관 압력과 열원 온도를 일정하게 유지한다. 팽창 탱크는 팽창된 열원의 배출을 방지하여 열손실을 방지한다.



[그림 2.20] Test bed 냉난방 자동제어 시스템

2.3 TALS 연계형 광센서 조광제어 시스템 정확도 평가

2.3.1 광센서 조광제어 시스템 알고리즘

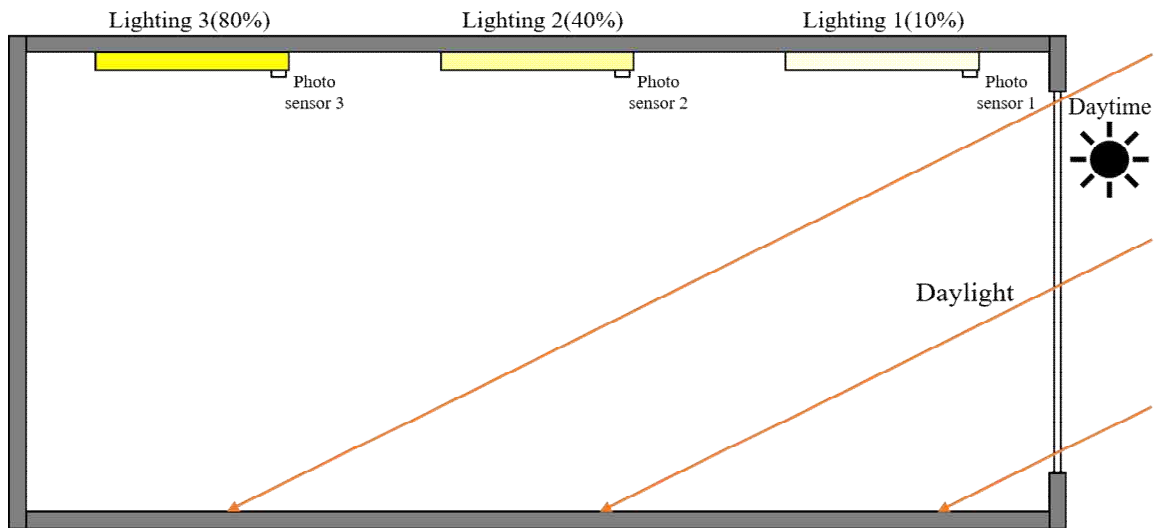
광센서 조광제어 시스템(Daylighting Responsive Dimming System, 이하 DRDS)은 실내로 유입되는 주광량에 따라 인공조명 디밍을 조절하여 빛환경을 개선하고 에너지 사용량을 절감하는 시스템이다. 기존 조광제어 시스템은 주광의 직접광만을 고려한 시스템이고, 본 연구에서 제안하는 DRDS는 직접광과 간접광을 동시에 연산하는 알고리즘을 개발하여 목표 조도 구현 정확성 및 에너지 절감 효과를 개선한 시스템이다. 본 장에서는 기존 조광제어 시스템을 고찰하고, TALS와 연계되어 실내에서 발생하는 간접광과 확산광을 고려하는 DRDS 보정 계수 예측 방법과 알고리즘을 설명한다.

2.3.1.1 Direct light(직접광) 예측 방법

기존 조광제어 시스템은 천장이나 조명기구에 설치된 광센서를 통해 작업면 Direct light를 파악하고 부족 조도 수치만큼 조명기구를 디밍하는 시스템이다(그림 2.21). 기존 조광제어 시스템은 광센서가 설치된 특정 지점의 Direct light만 고려하여, 근접한 위치에 설치된 인공조명이나 주광에 의한 확산광 및 간접조도를 고려하지 않는다. 디밍은 사전에 측정된 작업면 조도와 광센서 센싱값의 상관관계를 통해 제어된다. 예를 들어, 작업면 조도가 설정된 목표 조도를 초과할 경우 조명을 소등하고, 작업면 조도가 설정된 목표 조도보다 낮을 경우, Direct light 학습법으로 연산하여 부족한 조도만큼 조명기구를 조광하여 목표 조도를 일정하게 유지한다.

Direct light 학습법에 관한 선행연구는 제어 정확성, 에너지 사용 개선과 운용 평가를 위한 시운전 또는 시뮬레이션 사례 연구가 대부분이다. Wang and Tan(2013)은 작업면과 거리가 먼 조명기구의 조도를 고려한 신경망 모델과 에너지 최적화 알고리즘을 기반으로 LED 시스템 제어방법을 개발하였다^[80]. Caicedo et al. (2014)는 천장에 설치된 조도 센서를 사용하여 작업면 목표 조도 달성을 위한

제어방법을 제안하였다. 제안된 방법은 작업 공간에 광센서가 위치한 경우와 비교해 평균 10 % 전력 사용 저감을 보였다^[81]. Yoo et al. (2014) 은 조명 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 사무실 내 조광제어 시스템의 조명에너지 절약을 평가하였고, 약 40 % - 70 %의 에너지 절약 효과를 검증하였다^[82]. Gentile et al. (2016) 은 4가지의 조명제어 시스템을 사용하여 모니터링 연구를 수행하였다. 주광 연계 제어 시스템은 79 % 조명에너지 절약을 보였다^[83].

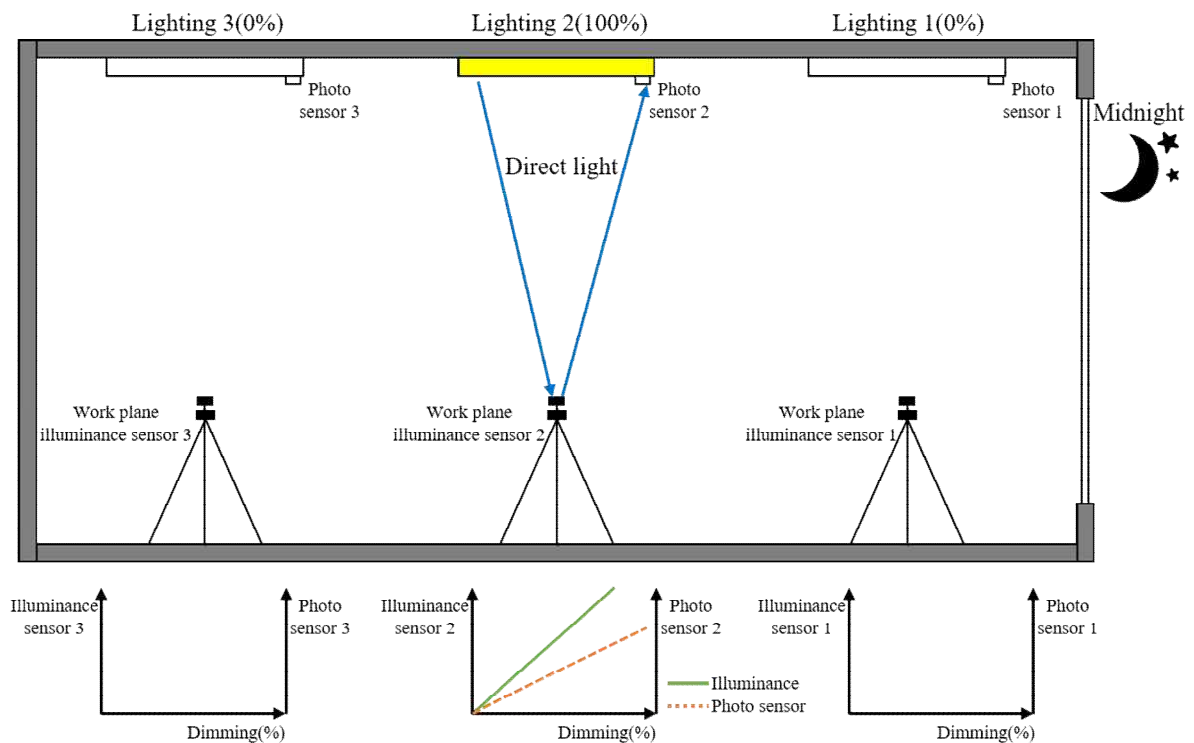


[그림 2.21] 광센서 조광제어 시스템(직접조도 학습법)

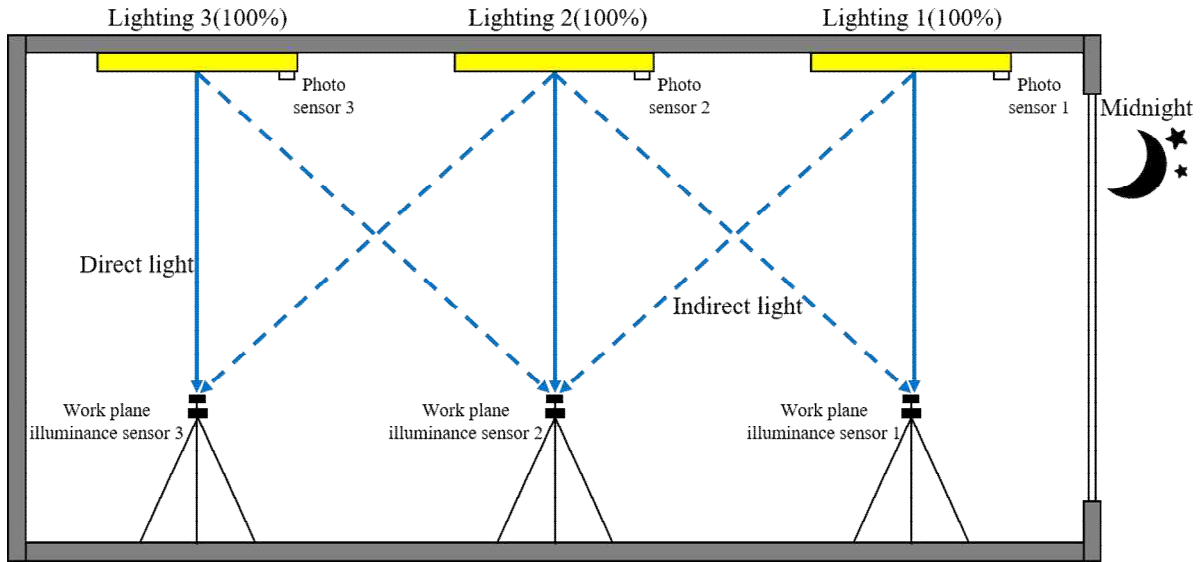
기존 조광제어 시스템 설정 프로세스는 다음과 같다. 먼저, 주광이 없는 야간에 조명기구의 조광값에 따른 작업면 조도와 광센서 값을 학습한다. 그림 2.22와 같이 조명기구 직하에 조도계를 설치하고, 조명기구 조광 단계에 따른 작업면 조도와 광센서 값을 학습한다. 예를 들어 Lighting 2의 상관관계를 학습하면, Lighting 2의 조광값에 따라 변화하는 직하 작업면 조도값과 광센서 값을 학습한다. 이때 Lighting 1, 3의 직하 작업면 조도값과 광센서 값은 측정하지 않는다. 이와 마찬가지로 Lighting 1, 3에 대한 학습을 진행할 경우 Lighting 1, 3 직하 작업면 조도값과 조명기구 1, 3에 부착된 광센서 값만을 학습시킨다.

Direct light만 고려한 방법은 시간 소요가 작고 프로세스가 간단하지만, 그림 2.23과 같이 실제 실내 조명환경에 적용할 경우 주변 사물과 조명기구 간접조도의 영향으로 목표 조도 구현 정확성이 낮아질 수 있다. 정확한 작업면 조도를 구현하

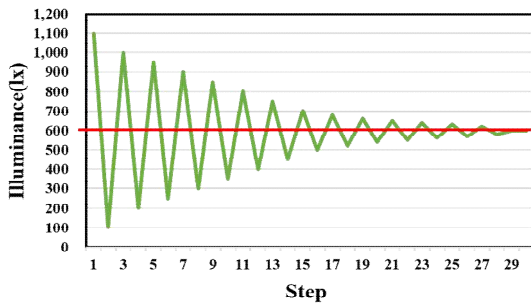
기 위해 연산 과정이 반복되겠지만, 정확도가 감소하여 재실자에게 불편한 시환경을 느끼게 할 수 있다. 즉, Direct light 학습방법은 인접한 조명기구의 Indirect light에 의한 영향을 분별할 수 없어서 그림 2.24와 같이 목표 조도를 초과 및 미달하는 과정을 반복해서 목표 조도를 수렴한다. 하지만, 실험 환경과 조건에 따라 수 분 동안 반복되기 때문에 재실자에게 시각적 불쾌감을 줄 수 있고 불필요한 조명에너지 사용량 증가의 원인이 될 수 있다.



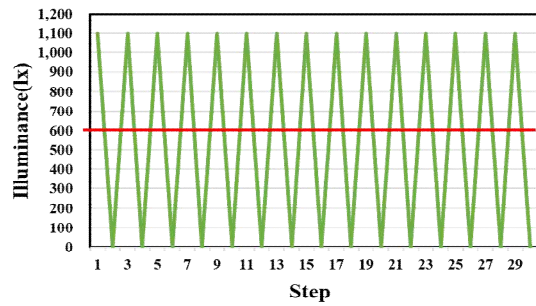
[그림 2.22] 기존 광센서 조광제어 시스템의 직접조도 학습방법



[그림 2.23] 직접 및 간접조도의 영향을 받는 실제 조명환경



(a) 수렴 예시

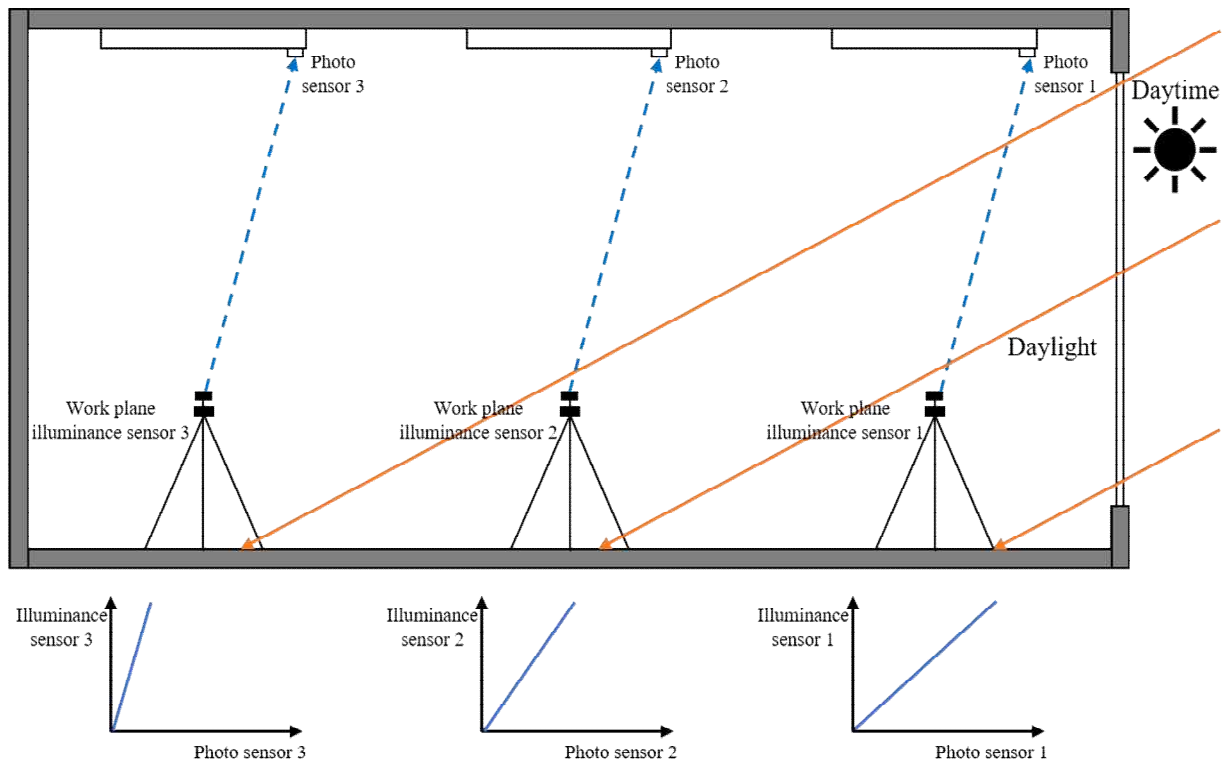


(b) 발산 예시

[그림 2.24] 직접조도 학습법 조도 유지 방식

2.3.1.2 Direct light & Indirect light(간접광) 고려한 작업면 조도 예측 방법

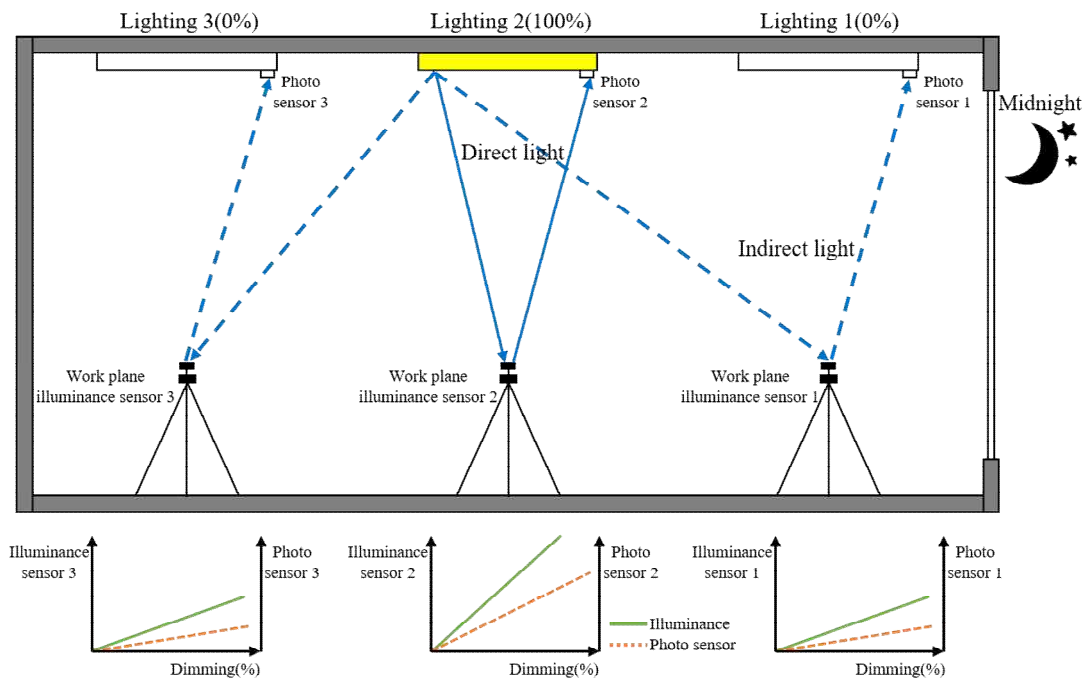
TALS는 상부 반사면을 통해 직접광 뿐만 아니라 실내로 많은 확산광을 유입시키기 때문에, 직접광만 고려하는 기존 조광제어 시스템을 적용하기에는 한계점이 있다. 따라서, 본 절에서는 기존 Direct light 제어 이론에 Indirect light의 영향을 고려하여 개발된 DRDS 프로세스와 알고리즘을 설명한다. DRDS 시스템은 작업면 조도를 일정하기 유지하기 위해 천공상태에 의해 시시각각 변화하는 실내조도를 정확하게 측정하고 알고리즘 계산을 통해 목표 조도에 요구되는 조광을 디밍한다. 실내 작업면 조도는 책상 높이(850 mm)에 조도계를 설치하여 확인할 수 있지만, 실제 사무실 업무공간에서 작업면에 설치된 모니터링 장치는 재실자 및 사용물 등에 가려져 오작동을 하거나 측정 오류의 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 외부 간섭이 적은 조명기구에 광센서를 설치하여 간접적으로 작업면 조도를 예측하는 방식을 구현하였다^[84]. 또한, 작업면 목표 조도 정확성을 확인하기 위해 작업면에 조도계를 설치하여 실험 및 모니터링하였다.



[그림 2.25] 광센서 조광제어 시스템의 작업면 학습법

우리나라 주간 시간대에 실내로 유입되는 직사일광을 작업면 조도계를 통해 데이터를 측정하고, 각 조도계의 수직 방향에 위치한 인공조명 광센서 센싱값을 측정하고 회귀분석하여 작업면 조도와 천장면 조도의 추세식을 산출한다(그림 2.25). 회귀분석 데이터는 다양한 천공상태, 날씨, 계절 등 다양한 환경에서 기록된 데이터가 많아질수록 정확성이 높아진다. 작업면 조도예측 알고리즘 학습이 완료되면 작업면에 설치된 조도계를 제거하고 조명기구 광센서 데이터로 작업면 조도를 예측한다.

Direct light 학습방식의 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 Indirect light에 의한 영향을 고려한 학습방식을 제안하였다. Indirect light 학습방식은 직접조도 학습방법과 동일하게 주광 유입이 없는 야간에 수행한다. 그림 2.26와 같이, 직접조도 학습방식과 다르게 각 조명기구를 개별 조광할 때 해당 조명기구 직하 작업면 조도와 광센서 센싱값만을 학습하지 않고 실내에 설치된 모든 조명기구의 직하 작업면 조도와 광센서 센싱값을 동시에 모니터링 한다^[85].



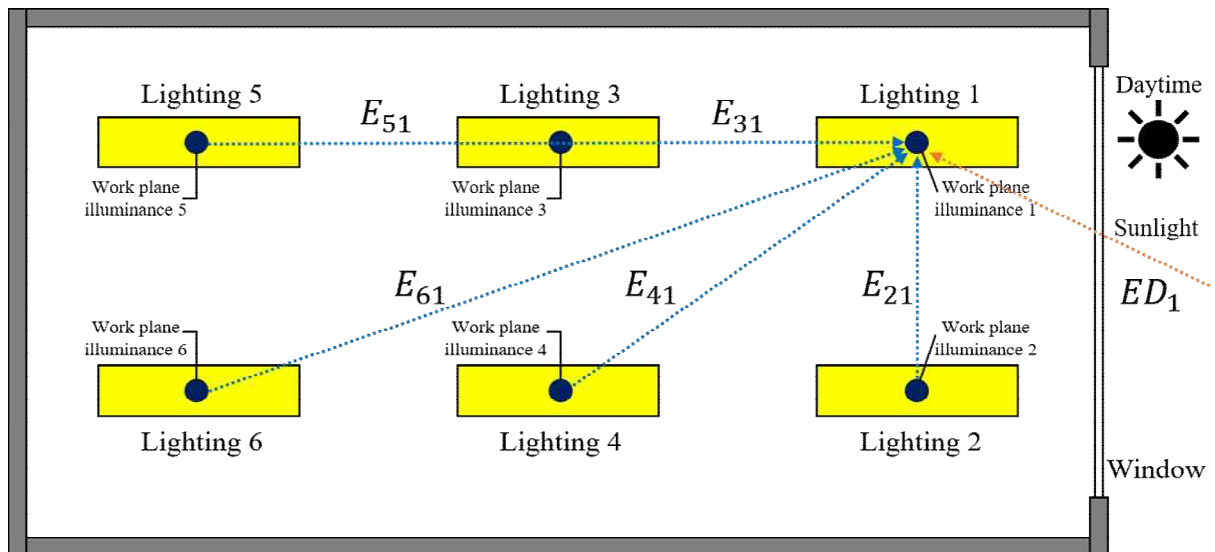
[그림 2.26] 광센서 조광제어 시스템의 간접조도 학습방법

실험이 이루어진 Test room과 같은 공간에 주광이 유입되고 인공조명 6개가 설치되어 있는 공간을 가정한다면(그림 2.27), Lighting 1 직하 위치의 작업면 조도(ET_1)는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다. 식 (1)을 기반으로 나머지 지점의 작업면 조도(ET_j)는 표준화된 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

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

$$ED_1 = \text{Work plane illuminance 1 from daylight} \tag{1}$$

$$E_{ij} = \text{Work plane illuminance (j) from the lighting (i)}$$



[그림 2.27] 직접 및 간접조도 계산 방법

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

$$ET_j = \text{Total work plane illuminance (j)}$$

$$ED_j = \text{Work plane illuminance (j) from daylight} \tag{2}$$

$$n = \text{Number of lighting}$$

각 지점의 작업면 목표 조도를 600 lx로 설정하였을 경우, Lighting 1의 직하 작업면 조도 1에 입사되는 주광량(ED_1)이 400 lx라고 가정한다면 작업면 조도 1에 필요한 요구조도(ER_1)는 다음 식 (3)을 통해 계산할 수 있다. 식 (3)을 활용하여 각 작업면 조도에 요구되는 조도 수식을 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^6 E_{i1} = ET_1 - ED_1 = 600 \text{ lx} - 400 \text{ lx} = 200 \text{ lx} = ER_1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 E_{11} + E_{21} + E_{31} + E_{41} + E_{51} + E_{61} &= ER_1 \\
 E_{12} + E_{22} + E_{32} + E_{42} + E_{52} + E_{62} &= ER_2 \\
 E_{13} + E_{23} + E_{33} + E_{43} + E_{53} + E_{63} &= ER_3 \\
 E_{14} + E_{24} + E_{34} + E_{44} + E_{54} + E_{64} &= ER_4 \\
 E_{15} + E_{25} + E_{35} + E_{45} + E_{55} + E_{65} &= ER_5 \\
 E_{16} + E_{26} + E_{36} + E_{46} + E_{56} + E_{66} &= ER_6
 \end{aligned} \quad (4)$$

간접조도 학습법을 통해 특정 조명기구의 조광에 따른 특정 작업면 조도값에 대한 추세식을 식 (5)와 같이 정의한다면, 식 (4)를 식 (6)과 같이 6원 1차 연립 방정식으로 정의할 수 있다. 다원 연립방정식을 계산하기 위해 식 (7)과 같이 행렬의 형태로 정리하고 식 (7)의 간접조도 비율 행렬을 역행렬을 취해 양변에 곱하여 식 (8)과 같이 결과를 정리한다. 최종 도출된 식 (8)을 활용해 각 작업면의 요구조도값을 만족하는 조명기구별 조광 단계를 산출할 수 있다.

$$E_{ij} = IE_{ij}g(L_i)$$

$g(L_i)$ = Work plane illuminance (i) according to dimming level of lighting (i) (5)

IE_{ij} = Proportion of work plane illuminance (i) and work plane illuminance (j) from lighting (i)

$$\begin{aligned}
 IE_{11}g(L_1) + IE_{21}g(L_2) + IE_{31}g(L_3) + IE_{41}g(L_4) + IE_{51}g(L_5) + IE_{61}g(L_6) &= ER_1 \\
 IE_{12}g(L_1) + IE_{22}g(L_2) + IE_{32}g(L_3) + IE_{42}g(L_4) + IE_{52}g(L_5) + IE_{62}g(L_6) &= ER_2 \\
 IE_{13}g(L_1) + IE_{23}g(L_2) + IE_{33}g(L_3) + IE_{43}g(L_4) + IE_{53}g(L_5) + IE_{63}g(L_6) &= ER_3 \\
 IE_{14}g(L_1) + IE_{24}g(L_2) + IE_{34}g(L_3) + IE_{44}g(L_4) + IE_{54}g(L_5) + IE_{64}g(L_6) &= ER_4 \\
 IE_{15}g(L_1) + IE_{25}g(L_2) + IE_{35}g(L_3) + IE_{45}g(L_4) + IE_{55}g(L_5) + IE_{65}g(L_6) &= ER_5 \\
 IE_{16}g(L_1) + IE_{26}g(L_2) + IE_{36}g(L_3) + IE_{46}g(L_4) + IE_{56}g(L_5) + IE_{66}g(L_6) &= ER_6
 \end{aligned} \tag{6}$$

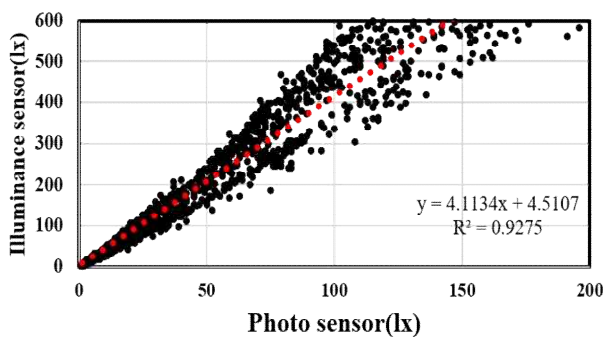
$$\begin{pmatrix} IE_{11} & IE_{21} & IE_{31} & IE_{41} & IE_{51} & IE_{61} \\ IE_{12} & IE_{22} & IE_{32} & IE_{42} & IE_{52} & IE_{62} \\ IE_{13} & IE_{23} & IE_{33} & IE_{43} & IE_{53} & IE_{63} \\ IE_{14} & IE_{24} & IE_{34} & IE_{44} & IE_{54} & IE_{64} \\ IE_{15} & IE_{25} & IE_{35} & IE_{45} & IE_{55} & IE_{65} \\ IE_{16} & IE_{26} & IE_{36} & IE_{46} & IE_{56} & IE_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g(L_1) \\ g(L_2) \\ g(L_3) \\ g(L_4) \\ g(L_5) \\ g(L_6) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ER_1 \\ ER_2 \\ ER_3 \\ ER_4 \\ ER_5 \\ ER_6 \end{pmatrix} \tag{7}$$

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

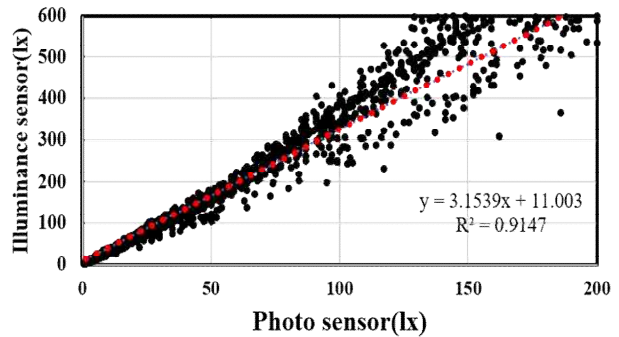
2.3.2 보정계수 예측식 개발

본 연구에서는 광센서 조광제어 시스템의 목표 조도 구현과 조명에너지 사용량 절감 성능을 평가하기 위해 C대학의 Test bed에서 Full scale 규모로 실험하였다. Test bed 인공조명은 디밍 제어가 가능한 40 W LED(1,200 x 300 mm) 6개를 설치하였고 작업면 조도계는 조명기구 직하 작업면 높이(바닥으로부터 850 mm)에 설치하였다.

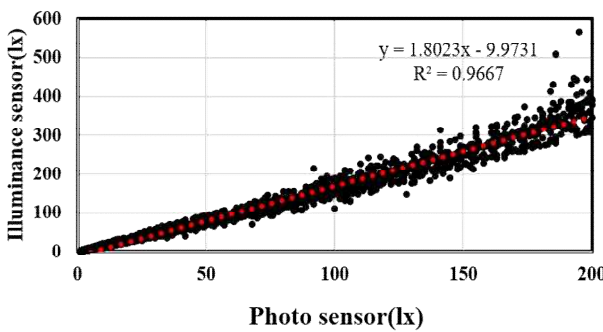
Step 1, 조명기구 디밍은 광센서가 측정하는 광센싱 값을 Input 데이터로 입력하여 제어되는데, 천장면 조도와 작업면 조도의 상관관계를 도출하기 위해서 평면상 같은 위치에 설치한 작업면 조도값과 광센서 센싱값을 모니터링하고 회귀분석하여 각 지점의 상관관계 기울기 계수를 산출하였다. 회귀분석 추세식은 낮 시간동안 인공조명에 의한 간섭이 없고 주광이 실내로 들어오는 조건에서 10일간 1초의 인터벌로 측정하였고 그림 2.28을 보면, 각각의 조명(Lighting 1 - Lighting 6) 직하에 있는 작업면 조도값과 조명기구에 설치된 광센서 값을 나타내었다.



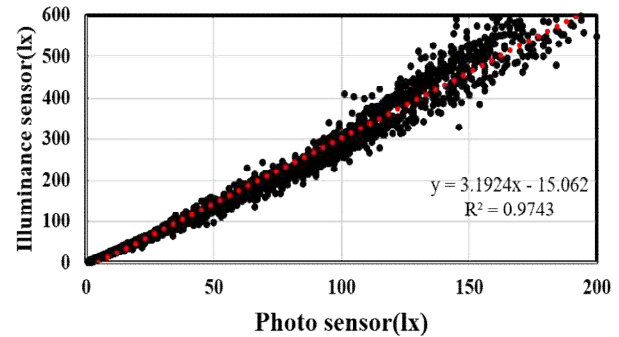
(a) Lighting 1



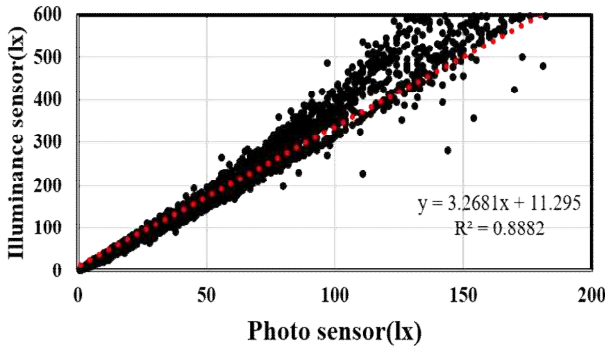
(b) Lighting 2



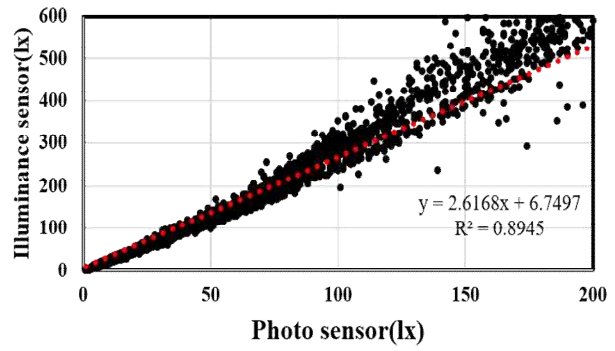
(c) Lighting 3



(d) Lighting 4



(e) Lighting 5



(f) Lighting 6

[그림 2.28] 실내 작업면 조도와 광센서 센싱값 회귀분석 추세식

광센서 조광제어 시스템은 목표 실내조도를 불만족할 경우(조도가 낮을 경우) 목표 조도만큼 조명을 추가 디밍하는 시스템으로, 사무실 실내조도 기준 600 lx를 초과하는 데이터는 제외하였다. 회귀분석 추세값과 정확도는 표 2.5와 같다. 상관계수(R^2)는 통계학에서 결정계수로서 추정된 선형모형이 주어진 자료에 적합한 정도 즉, 정확도를 나타낸다. 정확도는 최소 88.8 %, 최대 97.4 %로 수집된 데이터의 상관관계가 매우 정확하다. 하지만, 회귀분석은 주변의 영향과 간섭을 최소화한 Test bed에서 실험되어, 실제 사무실에 적용되었을 때, 재실자, 가구, 칸막이, 주변기기, 물체의 반사율과 같은 요소에 의해 상관성이 낮아질 가능성이 있다. 일반적인 조광제어 시스템과는 다르게 TALS가 연계된 보정계수 예측 시, 광선반 반사면을 통해 매우 강한 빛이 광센서를 간섭할 수 있기 때문에 빛의 경면반사를 고려하여 광센서를 보호하는 고무 파킹을 설치하여 정확도를 높였다. 또한, TALS는 천장으로 빛을 반사하고 작업면 조도를 계속해서 변화시키지만, 조광제어는 주광의 절대량에 따라 디밍 제어 되기 때문에 목표 조도 구현 정확성이 매우 높다.

<표 2.5> 광센서 조광제어 시스템 작업면 조도와 조명기기 광센서 회귀분석 결과

조명기기	추세식	상관계수, R^2 (%)
Lighting 1	$4.1134x+4.5107$	92.8
Lighting 2	$3.1539x+11.0003$	91.5
Lighting 3	$1.8023x-9.9731$	96.7
Lighting 4	$3.1924x-15.062$	97.4
Lighting 5	$3.2681x+11.295$	88.8
Lighting 6	$2.6168x+6.7497$	89.5

Step 2, 조명기기 디밍 레벨에 따른 작업면 조도를 산출한다. 이때 측정되는 작업면 조도는 같은 평면상의 수직면에 위치한 인공조명의 직접광만 고려한다. 디밍 레벨에 따른 작업면 조도 계산은 작업면 목표 조도보다 낮은 조도값이 발생할 경우, 목표 조도 구현에 필요한 디밍 레벨을 연산하여 조명기기를 자동 제어하기 위해서다. 본 연구의 인공조명은 1단계에서 20단계까지 디밍 조절이 가능하고, 실외로부터 직사일광 유입이 없는 저녁 시간에 순수한 인공광원에 의해 발생하는 직접광에 대한 작업면 조도값을 기록하고 디밍 레벨별 구현되는 조도값을 산출하였다. 예를 들어, Lighting 1의 디밍 레벨 20단계로 켜졌을 때, 인공조명 직하에 있는 작업면 조도를 디밍 레벨 20으로 나눈다. 디밍 레벨에 따른 조도 값과 소비전력은 비례하게 나타났으며 이 작업을 Lighting 1부터 6까지 차례대로 계속하여 디밍 레벨 20단계(100 %)를 기준으로 데이터를 보정하였다(표 2.6).

<표 2.6> 디밍 레벨에 따른 작업면 조도(lx) 결과

조명기기	디밍레벨	작업면 조도(lx)	디밍레벨에 따른 작업면 조도(lx)
Lighting 1	20	505	25.25
Lighting 2	20	484	24.20
Lighting 3	20	519	25.95
Lighting 4	20	491	24.55
Lighting 5	20	511	25.55
Lighting 6	20	513	25.65

Step 3, 한 공간에 여러 개의 LED 조명기기가 설치되어 전원이 켜질 경우, 작업면 조도계가 모니터링하는 조도는 수직면에 위치한 조명기구의 직접광과 수직면에 위치하지 않는 조명기구들의 간접광이 합해진 수치이다. 따라서, 각 작업면 조도에 미치는 인공조명의 간접광에 대한 영향을 정량적으로 연산하여 정확한 디밍 제어를 통해 목표 조도를 구현하였다. 설정 시험은 Lighting 1을 100 % 디밍하고 6곳의 작업면 조도를 기록하여 직접광에 대한 간접광 비율을 상대화한다. 표 2.7는 Lighting 1부터 Lighting 6까지 측정된 직접광과 확산광으로, 표 2.8는 간접광을 직접광으로 상대화한 비율이다.

<표 2.7> 조명기구 100 % 디밍 시, 직접광 및 간접광 센싱값

Content	Work plane illuminance 1	Work plane illuminance 2	Work plane illuminance 3	Work plane illuminance 4	Work plane illuminance 5	Work plane illuminance 6
Lighting 1	505.0	246.7	191.1	115.4	54.1	44.4
Lighting 2	281.9	484.0	138.2	174.6	49.9	50.5
Lighting 3	170.3	116.1	519.0	229.5	202.7	137.8
Lighting 4	128.0	164.7	270.4	491.0	146.9	192.1
Lighting 5	43.6	38.1	181.4	127.3	511.0	264.2
Lighting 6	40.7	42.8	136.7	193.8	301.0	513.0

<표 2.8> 조명기구 100 % 디밍 시, 직접광 및 간접광 센싱값 비율

Content	Work plane illuminance 1	Work plane illuminance 2	Work plane illuminance 3	Work plane illuminance 4	Work plane illuminance 5	Work plane illuminance 6
Lighting 1	1	0.489	0.378	0.229	0.107	0.088
Lighting 2	0.582	1	0.286	0.361	0.103	0.104
Lighting 3	0.328	0.224	1	0.442	0.391	0.266
Lighting 4	0.261	0.335	0.551	1	0.299	0.391
Lighting 5	0.085	0.075	0.355	0.249	1	0.517
Lighting 6	0.079	0.083	0.266	0.378	0.587	1

그림 2.29은 TALS 연계형 광센서 조광제어 시스템 알고리즘 제어 및 모니터링 시스템으로 실내 목표 조도를 입력하고, 사전 실험으로 도출된 보정 계수를 입력하여 시스템을 제어한다. a1 - a6 데이터는 실내 작업면 조도와 광센서 센싱값 회귀 분석한 추세식이며, DE1 - DE6은 디밍레벨에 따른 작업면 조도를 나타내며, IE는 Direct light와 Indirect light 비율을 입력하여 디밍제어를 구현하였다. 본 연구에서는 인공조명의 색온도는 고려하지 않아 디폴트 값을 입력하였다.

Apply Algorithm

Target Illuminance (Et)
Target Color Temp. (Ek)
Light Ratio High (LR(H))
Light Ratio Low (LR(L))

CCT(K)	3138	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
CCR(H)	0.0	0.158	0.342	0.5	0.639	0.763	0.875	0.978
CCR(L)	1	0.842	0.658	0.5	0.361	0.237	0.125	0.022

a1	a2	a3	a4	a5	a6
4.1134	3.1539	1.8023	3.1924	3.2681	2.6168

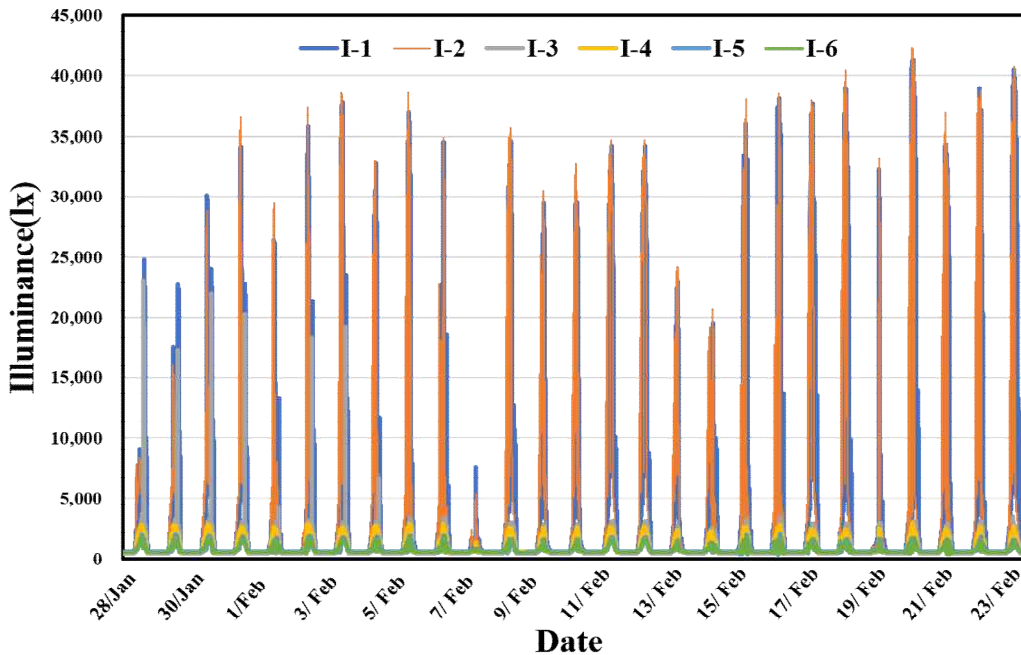
DE1	DE2	DE3	DE4	DE5	DE6
2.525	2.42	2.595	2.455	2.555	2.565

IE	1	2	3	4	5	6
1	1	0.582	0.328	0.261	0.085	0.079
2	0.489	1	0.224	0.335	0.075	0.083
3	0.378	0.286	1	0.551	0.355	0.266
4	0.229	0.361	0.442	1	0.249	0.378
5	0.107	0.103	0.391	0.299	1	0.587
6	0.088	0.104	0.266	0.391	0.517	1

[그림 2.29] 광센서 조광제어 알고리즘 제어 및 모니터링 시스템

2.3.3 정확도 평가

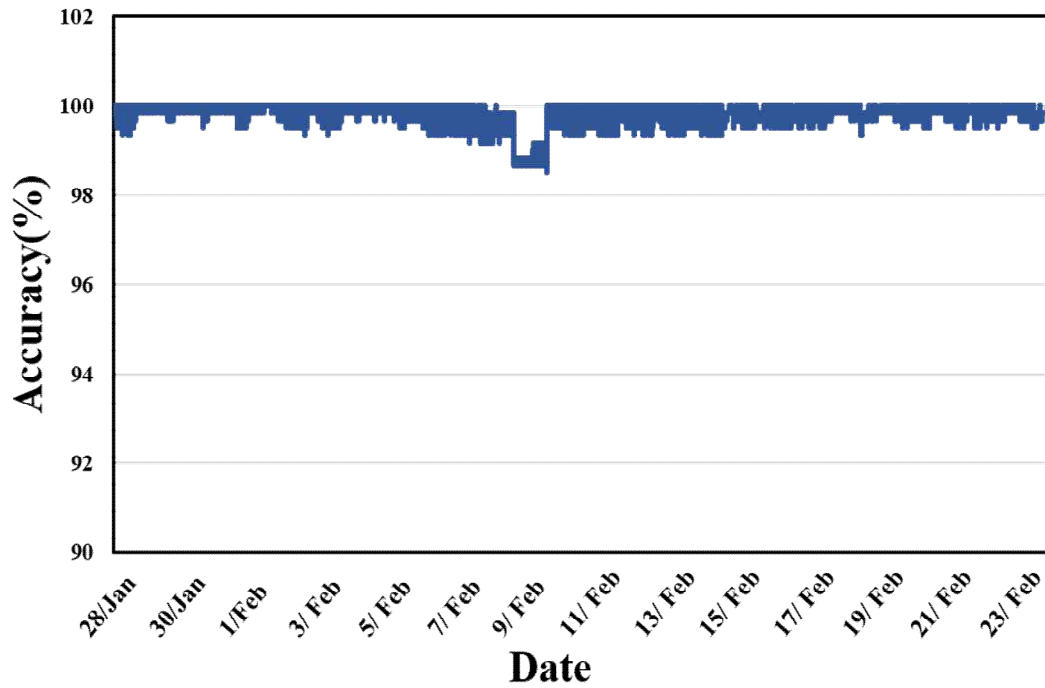
본 절에서는 연구에서 제안한 광센서 조광제어 알고리즘 목표 조도구현 정확성을 평가하였다. 정확도를 분석하기 위해 Test bed 목표 조도를 600 lx로 설정하고, 17일간 1분 인터벌로 24시간 동안 데이터를 수집하였다. 북반구에 있는 한국의 겨울은 태양고도가 낮아 실내 안쪽까지 많은 직사일광이 유입되는데, Test room 작업면에 설치된 조도계에 주광이 직접 센싱되어 절대량이 굉장히 큰 조도가 관측되었다(그림 2.30). 따라서, 주광의 영향이 없는 야간시간의 데이터를 모니터링 및 분석하여 시스템 정확성을 검증하였다.



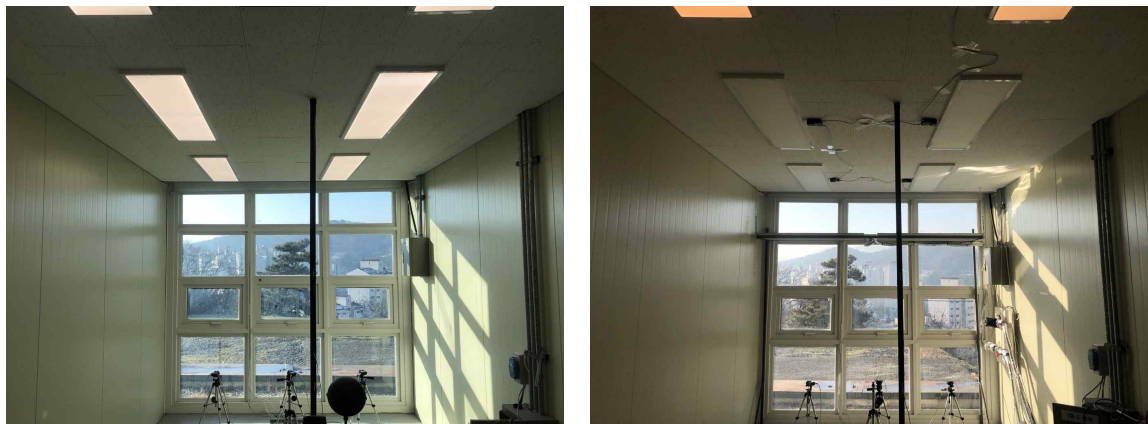
[그림 2.30] 광센서 조광제어 시스템 정확성 평가를 위해 관측된 작업면 조도

정확도 평가를 위해 직사일광 유입이 없는 오후 7시부터 익일 오전 7시까지 작업면 조도를 모니터링 하여 실내 목표 조도 600 lx 구현하는 정확성 결과를 그림 2.31에 나타내었다. 연구에서 제안한 조광제어 알고리즘이 적용되었을 때, 목표 조도를 일정하게 유지하는 것을 확인하였다. 목표 조도 평균 정확도는 99.8 % 상당히 높았고, 최대 정확도 100 %, 최소 정확도는 98.5 %였다. 조광제어 연구는 K_T 나 일사량으로 구현하는 연구가 있지만, TALS가 적용된 실제 규모의 Test bed에서 관측한 데이터를 기반으로 광센서 조광제어 시스템을 구현하고 실험한 연구는

처음이다. 또한, 하루종일 변화하는 빛환경을 실시간으로 대응하여, 높은 정확성과 에너지 사용 효율이 우수하다.



[그림 2.31] 목표 조도 정확성 결과



(a) LED 100 % dimming, Reference room (b) TALS+DRDS dimming, Test room

[그림 2.32] 목표 조도 구현 정확성 실험 모습

그림 2.32은 TALS 연계형 광센서 조광제어 시스템의 목표 조도구현 정확성을 실험하는 모습으로 (a)는 디밍 제어가 되지 않는 LED가 100 % 운용되는 모습이고, (b)는 TALS가 설치된 실험실의 조광제어 실험 장면을 나타내었다.

제3장 TALS 시스템 적용에 따른 빛환경 평가

본 3장에서는 연구에서 개발된 TALS의 실내 빛환경 평가 및 시각적 편안함 개선 효과를 실험을 통해 정량적으로 검증한다. 먼저, 실험 환경과 조건을 서술하고 실내 조도, 실내 균제도, 평균 주광률, 창면 휘도 관측 데이터를 계절별로 비교 분석한다. 그리고 실제 실험 환경과 동일하게 실내 빛환경을 구현한 시뮬레이션을 수행하여 신뢰성을 검증한다.

3.1 빛환경 성능평가 지표

빛의 밝기는 사람 안구 내 망막면에 빛이 자극하여 발생하는 응답 반응이다. 건축물 실내 빛환경은 명시성(물건이 잘 보이는 것)과 쾌적성(알맞은 밝기가 있는 것)을 확보하는 것이 매우 중요하다. 명시성은 물체의 휘도, 크기, 보는 시간, 주위 휘도 대비로 정해진다. 물체의 크기와 보는 시간은 조명설비에 의해서 변경될 수 없고, 물체의 휘도와 주위 휘도 대비는 조명계획 변경으로 조정이 가능하다. 대상물의 휘도가 높아지면 밝기는 증가하지만, 휘도가 너무 높거나 대비가 크면 너무 밝다고 느끼거나 눈부심을 느낄 수 있다. 또한, 휘도와 입체각의 광학적 물리량이 생리적 반응과 심리적 반응을 일으키는 것을 시각적 쾌적성이라 한다. 건축 환경의 시각적 쾌적성은 정량적으로 설명할 수 있고 기준을 통해 주광 조명 시스템, 인공조명 시스템이 재실자에게 미치는 영향과 효과를 실험과 시뮬레이션 분석을 통해 빛의 양과 질을 고려한 쾌적한 빛환경 설계가 가능하다. 따라서, 빛환경 평가는 명시성을 만족하고 시각적 쾌적성을 적절하게 고려한 계획이 필요하다.

다음은 실내공간 빛환경을 평가하는 요소에 대해 설명한다.

(1) 조도

빛은 광원에서 발생하고 실내공간에 전해져 벽면과 천장과 같은 입사면 표면에 전달되고 반사되어, 특정 면에 입사하는 광속(Lumen, lm)의 단위면적당(m^2) 밀도를 조도(Illuminance)라고 한다.

$$E = \frac{A}{F} \tag{9}$$

여기서, F 는 광속, A 가 입사하는 면의 면적(m^2)이고, 조도 E 의 단위는 lm/m^2 또는 lx 이다. 조도는 빛의 방향과 빛을 받는 면의 각도에 따라 다르다.

$$E_{\theta} = E_n \cdot \cos\theta \tag{10}$$

E_{θ} 는 빛의 방향에 각도 θ 만큼 기울어진 면의 조도, E_n 는 빛의 방향에 수직인 면(법선면)의 조도, θ 는 입사각이다. 실내조도 기준은 표 3.1과 표 3.2와 같고, 국가마다 또는 기관마다 표준 기준이 다르게 정해져 있다. 우리나라는 KS A 3011 표준을 사용한다. KS A 3011은 건축물의 용도와 실내공간 사용 목적에 따라 기준을 분류하여 쾌적한 실내 조명환경을 조성할 수 있는 조도 범위를 제시한다(표 3.3)^[86].

<표 3.1> 나라별 실내조도 기준

조도 기준(나라)	Type of Activity	Scope(lx)		
		최소 허용 조도	기준 허용 조도	최대 허용 조도
KS(Korean Industrial Standards) A 3011 (Republic of Korea) ^[86]	General (Performance of visual tasks of medium contrast)	300	400	600
JIS(Japan Industrial Standard) Z 9110 (Japan) ^[87]		300	500	600
IES(Illumination Engineering Society) (USA) ^[88]		500	750	1,000

<표 3.2> 사무실 공간 조도 기준(중국, 유럽)

조도 기준	활동	평균 조도(lx)
GB 50034-2016 (China) ^[89]	Graphic design	500
	High-quality office space	500
	Sales office	500
EN 12464-1 (Europe) ^[90]	Writing, typing, reading, data processing	500
	CAD workstations	500
	Conference and meeting rooms	500

<표 3.3> KS A 3011. 우리나라 실내조도 기준

작업등급 기준조도	최저 조도 기준(lx)	표준 조도 기준(lx)	최고 조도 기준(lx)
정밀	600	1,000	1,500
보통	300	500	600
비정밀	150	200	300

본 연구에서는 사무실 건축물을 대상으로 TALS 적용 및 개선 효과를 분석하는데, 빛환경 성능평가와 조명에너지 소비량을 평가하기 위해 최적조도를 600 lx 로 설정했다. 600 lx 는 한국 표준에서 허용되는 최대조도이고, 미국, 일본의 중첩된 허용 조도 범위이다.

(2) 균제도

실내에서 물체를 인지하고 시각적 불편함이 생기지 않도록 균일한 밝기를 확보하는 것은 중요하다. 균제도는 실내공간 조도의 균일한 정도를 나타내는 것으로, 실내공간과 작업면에 따라 적당한 균제도가 필요하고, 균제도가 낮을 때에 시각적 불편함을 유발하고 시각적 작업능률이 감소할 수 있다. 특히, 사무실과 학교와 같은 실내공간은 동일한 반복작업이 일어나는 공간으로, 충분한 조도가 균일하게 유지되는 것이 매우 중요하다^[91-92].

균제도는 빛의 확산에 비례하고, 빛의 확산은 건물의 형태, 면적 및 배광 형태에 따라 달라진다. 균제도는 실내공간 빛의 분포를 정량적으로 평가하는 지표로, 일반적으로 조명 아래 작업면의 최소조도와 평균 조도의 비율로 구하거나, 최소조도와 최대조도의 비율로 계산하고, 실내 사용 용도에 따른 적정값을 구현하는 것이 바람직하다^[93]. 낮은 균제도는 사람의 인지능력을 낮추고 심리적 시각인식에 영향을 주어 실제 조도값보다 더 낮게 인식하게 한다^[94-95].

$$U1 = \frac{\text{최소조도}(lx)}{\text{평균조도}(lx)} \text{ or } U2 = \frac{\text{최소조도}(lx)}{\text{최대조도}(lx)} \quad (11)$$

본 연구에서는 TALS를 통해 외주부로 유입되는 과도한 주광을 막고, 반사면을 통해 반사된 빛이 실내 내주부 깊숙이 반사되어 실내 균제도를 향상시키는 효과를 검증한다.

(3) 주광률

주광률(Daylight factor)은 실내 작업면에 위치한 한 점의 조도를 실외 전천공조도로 나누어 백분율 한 값이다. 일반적으로, 실내 작업면 주광조도는 천공광에 의한 직접조도(직접광)와 반사 주광조도(확산광)가 합해진 값으로 실내 인공광원을 제외한 지표이다. 주광률은 주광에 영향을 미치는 태양 위치, 구름의 이동, 천공 상태 및 기상 등에 따라 시시각각 변화한다. 따라서, 청천공과 담천공을 먼저 가정하고, 개구부로부터 얻을 수 있는 주광에 대해 평가한다.

$$Daylight\ Factor(\%) = \frac{\text{실내작업면주광조도}}{\text{실외수평면주광조도}} \times 100 \quad (12)$$

주광률 기준은 실내 작업 종류에 따라 범위가 나뉘어져 있고, 보통 집무에 적당한 주광률 범위는 3.0 - 5.0이며, 일본건축학회 채광설계 사무실 기준에 따르면 주광률 기준은 2.0 이상 만족 해야한다^[99-100].

(4) 휘도

휘도(Luminance)는 어떤 표면에서 방사되거나 반사된 빛이 사람의 눈에 들어오는 양을 나타내는 것으로, 과도한 휘도는 눈부심과 같은 시각적 불편함의 원인이 되므로 적절한 휘도를 유지하는 것이 바람직하다. 특정 물체의 휘도 값이 평균 휘도보다 10배 이상일 때 또는 광원의 밝기가 25,000 cd/m^2 를 초과할 때 현휘(Glare) 현상이 발생한다^[96-97]. 일반적으로 휘도 차이에 의해 불쾌 현휘(Discomfort Glare)와 불능 현휘(Disability Glare)로 구분된다. 불쾌 현휘는 시작업 대상과 주위배경의 과도한 휘도 대비로 느끼지는 시각적 불쾌감을 의미하고, 불편함과 고통을 주지만 시작업 능력을 크게 감소시키지 않는다. 불능 현휘는 과도한 빛이 안구에 유입되어 작업 수행에 필요한 시각정보의 지각이 불가능해지는 현상으로 장기간 노출될 경우 시신경 손상을 유발할 수도 있다^[98].

본 연구에서는 TALS를 통해 외주부 창문면의 휘도를 측정하여 개선 효과와 글레어 현상 방지 효과를 검증한다.

3.2 Test bed 빛환경 실험

3.2.1 실험 개요

본 연구에서 개발한 TALS의 빛환경 성능평가를 위해 C대학 Test bed에 실제 규모 사무실 환경을 구현하고 TALS 적용 유무에 따른 빛환경 비교분석 실험을 실시하였다. 그림 1의 (a)는 TALS가 설치되지 않은 일반 사무공간을 구현한 모습이고, 그림 1의 (b)는 TALS가 설치된 사무공간을 조성한 사진이다. 두 공간은 동일한 액티브 설비시스템과 패시브 요소로 구성하였고, 실험을 위한 관측 장비들을 동일하게 설치하였다.



(a) Reference room(Non-TALS)

(b) Test room(TALS)

[그림 3.1] TALS 빛환경 실험(Test bed)

Test bed 빛환경 실험은 2021년 동지(12월 22일), 2022년 춘분(3월 21일), 하지(6월 21일)에 수행되었다. 빛환경 평가 분석 요소는 실내 조도, 실내 균제도, 평균 주광률, 실내 창면 휘도를 동일한 환경과 시간을 조건으로 평가하여, TALS 빛환경 개선 효과를 정량적으로 분석하였다. 실증 및 데이터 분석은 우리나라의 채광주간 시간을 기준으로 설정하여 오전 8시 - 오후 4시까지의 측정결과를 비교 분석하였다. 채광주간 시간은 하루 중 자연채광을 유효한 수준으로 이용하는 것이 가능한 시간대로, 태양 궤적도에서 지평면을 기준으로 고도 10도 이상의 시간대를 나타낸다.

천공청명도(Hour clearness index, K_T)는 지구의 공전, 태양의 위치와 대기 및 기상상태 등의 요소에 의해 항상 변하는데, 기본적으로 청천공, 부분담천공, 담천공의 3가지 천공상태로 분류된다. 본 연구에서는 Orgill and Hollands model 기준^[101]을 참고하여 천공청명도를 분류하였다. K_T 를 계산하기 위해 I_T , I_{oh} 를 산출하였고 계산식은 식(13) - (16)과 같다. I_T 는 지표면 일사량이며 Test bed 일사계로 실측된 값이다. I_{oh} 는 대기권 밖의 수평 일사량으로 식 (14)이며, I_{sc} 는 대기권 외 태양 일사량으로 $1,350 W/m^2$ 이다. l 는 위도, δ 는 태양 적위이다. J 는 줄리안 데이트이며, 1월 1일을 1로 12월 31일을 365로 변환하여 1부터 365중 해당 날짜를 나타내는 값으로 변환한 것이다. ω 값은 시간각(Hour angle) 이다.

$$K_T = \frac{I_T}{I_{oh}} \tag{13}$$

$$I_{oh} = I_{sc} \left[1 + 0.34 \cos \frac{360 \cdot J}{365} \cos Z \right] \tag{14}$$

$$\cos Z = \cos l \cos \delta \cos \omega + \sin l \sin \delta \tag{15}$$

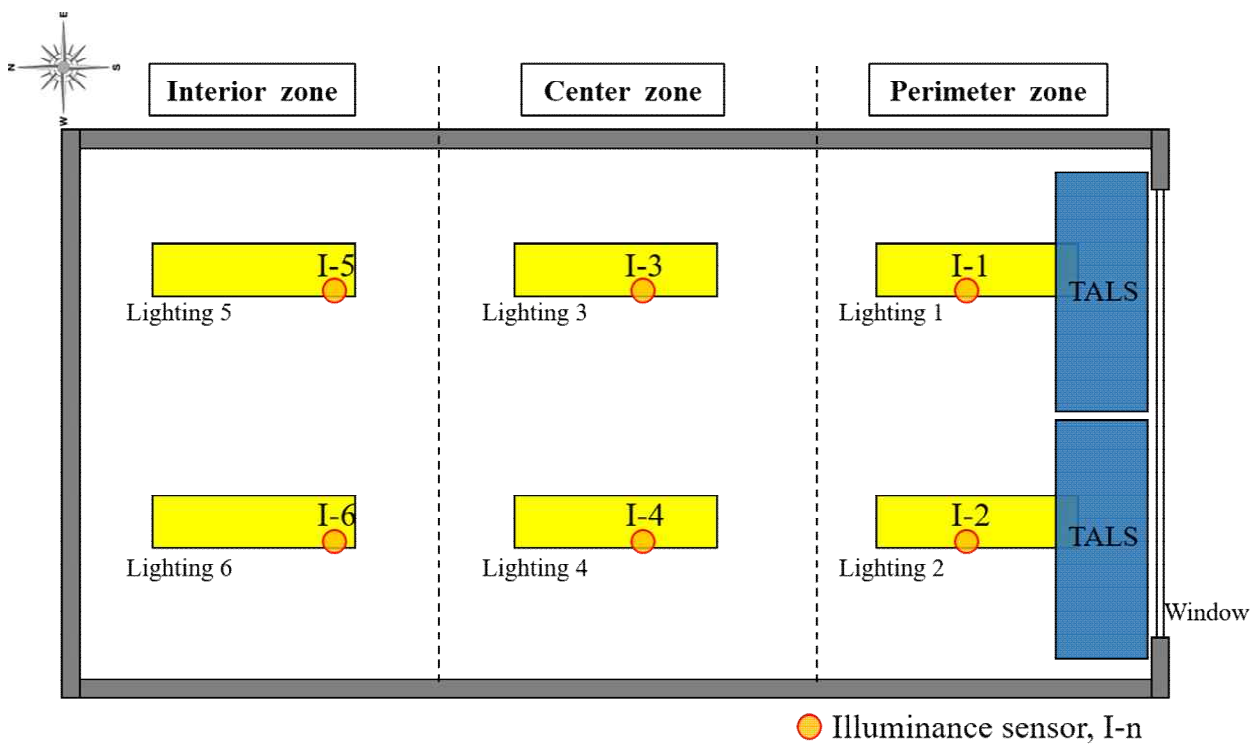
$$\delta = 0.4093 \sin [2\pi / 368 (J - 81)] \tag{16}$$

<표 3.4> 천공청명도 Orgill and Hollands model 기준

구분	기준
청천공	$K_T > 0.75$
부분담천공	$0.35 < K_T \leq 0.75$
담천공	$K_T \leq 0.35$

3.2.2 실내조도

Test bed 실내조도는 작업면 높이에 그리드로 배치된 6개의 포인트(I-1, I-2, I-3, I-4, I-5, I-6)에 조도계를 설치하였고, 측정점의 위치는 창면으로부터의 실내 안쪽 깊이에 따라, 외주부 측정점(I-1, I-2), 실내 중앙 측정점(I-3, I-4), 내주부 측정점(I-5, I-6)으로 구분하여 정의하였다(그림 3.2). 주광에 의한 빛환경 변화를 고려하기 위해 인공조명을 제외한 상태에서, Test room과 Reference room을 동일한 환경 조건과 동기화된 시간에 맞추어 실험을 진행하였다.



[그림 3.2] Test room 내주부, 실내 중앙, 외주부 공간설정

(1) 동시 관측결과

실험이 수행된 동지의 경우, 천공청명도(Kt)는 $0.09 < Kt < 0.44$ 의 범위로 산출되어 천공상태가 담천공과 부분담천공이 대부분을 이루고 있으며, 북반구에 위치한 우리나라는 겨울철 태양 남중고도(29°)의 영향으로 다른 계절에 비해 실내 유입 주광이 내주부까지 깊이 입사한다. 실내조도 모니터링 결과는 표 3.5 - 표 3.7과 같다.

TALS가 설치된 Test room의 주광 분포 특징은 다음과 같다. 광선반은 직사일광을 차단하여 외주부의 조도를 감소시키고 주광 유입 깊이를 반사면을 통해 연장시켜 내주부 실내조도를 증가시킨다. 그에 반해, Reference room의 경우 외주부 측정점에 직접 주광이 유입되어 Test room과 비교하면 11시부터 14시 사이에 약 5배 (20,000 lx) 이상의 조도값이 측정되었다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, TALS는 외주부 및 실내 중앙 측정점으로 과도하게 직접 유입되는 직사 일광의 광량을 제어함으로써 재실자의 시각적 불편감을 줄이고 작업능률의 향상을 기대할 수 있다. 대부분의 사무실 공간은 실내 중앙과 내주부에 재실자가 집중적으로 위치하고 있으므로 외주부와 실내 중앙의 절대적인 유입 일조량을 줄이고 내주부 일조 유입량을 향상시키는 TALS가 광선반으로서의 기능적인 역할을 충분히 수행한다고 할 수 있다.

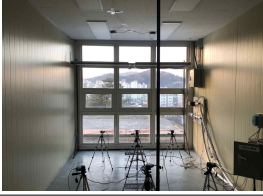


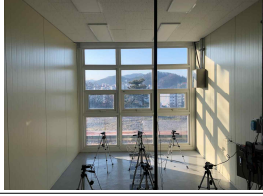




<표 3.5> Test room(TALS) 동지 실내조도 측정 결과(lx)







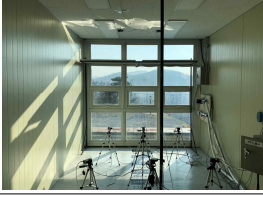
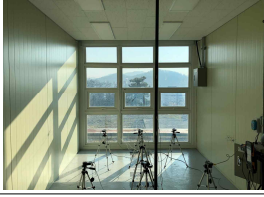


시간	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	평균 조도
8	206	265	82	77	49	48	121
9	1,692	8,200	920	891	501	481	2,114
10	2,899	5,380	1,601	1,806	896	888	2,245
11	4,210	21,090	2,152	2,607	1,265	1,329	5,442
12	5,880	6,060	2,834	5,200	1,703	2,090	3,961
13	28,820	29,330	3,230	2,880	2,042	1,944	11,374
14	5,910	28,300	3,520	2,518	2,015	1,681	7,324
15	21,320	3,750	10,080	2,063	1,591	1,418	6,704
16	4,430	2,343	2,550	1,400	919	970	2,102
구간	외주부: 10,005		실내중앙: 2,578		내주부: 1,213		총평균: 4,599

<표 3.6> Reference room(Non-TALS) 동시 실내조도 측정 결과(lx)

시간	l-1	l-2	l-3	l-4	l-5	l-6	평균 조도
8	198	256	104	114	50	54	129
9	1,596	4,930	1,010	1,096	464	501	1,600
10	2,705	4,830	1,801	2,715	849	946	2,308
11	3,550	21,370	2,188	20,850	1,167	1,332	8,410
12	4,400	4,810	2,755	26,750	1,639	1,832	7,031
13	4,810	25,050	27,510	27,870	2,027	1,946	14,869
14	5,080	23,060	26,120	2,600	1,999	1,710	10,095
15	18,460	3,340	7,840	2,244	1,405	1,414	5,784
16	4,070	2,391	2,900	1,687	915	1,067	2,172
구간	외주부: 7,495		실내중앙: 8,786		내주부: 1,184		총평균: 5,822

<표 3.7> TALS 유무에 따른 동시 작업면 조도 측정결과(lx) - 2021.12.22

시간	TALS				Non-TALS			
	평균	최소	최대	측정 결과	평균	최소	최대	측정 결과
8	121	48	265		129	50	256	
9	2,114	481	8,200		1,600	464	4,930	
10	2,245	888	5,380		2,308	849	4,830	
11	5,442	1,265	21,000		8,410	1,167	21,370	

시 간	TALS				Non-TALS			
	평균	최소	최대	측정 결과	평균	최소	최대	측정 결과
12	3,961	1,703	6,060		7,031	1,639	26,750	
13	11,374	1,944	29,330		14,869	1,946	27,870	
14	7,324	1,681	28,300		10,095	1,710	26,120	
15	6,704	1,418	21,320		5,784	1,405	18,460	
16	2,102	919	4,430		2,172	915	4,070	

(2) 춘분 관측결과

춘분은 낮과 밤의 시간이 동일한 절기이며 태양 남중고도는 23° 로, 천공청명도 (Kt)는 $0.10 < Kt < 0.55$ 의 범위로 관측되어 부분담천공과 담천공의 천공상태였다. 오전 11시에 최대 Kt 값 0.55와 최대 일사량 739.23 W/m^2 가 관측되었다. 표 3.8 - 3.10은 춘분에 실내조도를 관측한 결과로, TALS가 적용되지 않은 Reference room의 외주부에서 정오 시간에 가장 높은 조도($16,690 \text{ lx}$)가 관측됐다. 반면, 동일한 시간대에 Test room 외주부는 강한 주광을 TALS가 차단하여 시각적 불편함의 원인을 상쇄하는 것으로 나타났다. 또한, 1-5 측정점 결과를 보면, 오후 시간대에 Test room의 작업면 조도가 Reference room에 비해 높게 나타났다. 이는, TALS 반사면을 통해 반사된 빛이 실내 안쪽(내주부)까지 빛을 전달하여 밝은 실내공간을 확보하고 빛의 균일성을 높이는 것으로 분석되었다.









<표 3.8> Test room 춘분 실내조도 측정결과(lx)









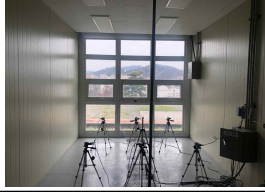
시간	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	평균 조도
8	744	912	308	279	184	188	436
9	1,324	1,775	555	515	321	319	802
10	2,280	3,180	981	915	566	550	1,412
11	3,640	4,770	1,321	1,236	717	712	2,066
12	4,810	5,350	1,504	1,355	821	790	2,438
13	3,720	3,790	1,058	884	566	527	1,758
14	3,100	2,980	812	671	430	399	1,399
15	1,454	1,440	428	348	232	213	686
16	910	922	267	223	144	135	433
구간	외주부: 2,617		실내중앙: 759		내주부: 434		총평균: 1,270

<표 3.9> Reference room 춘분 실내조도 측정결과(lx)

시간	l-1	l-2	l-3	l-4	l-5	l-6	평균 조도
8	729	904	392	406	204	211	474
9	1,332	1,836	688	732	320	366	879
10	2,238	3,690	1,177	1,264	574	625	1,595
11	3,560	5,780	1,595	1,717	742	801	2,366
12	15,860	16,690	1,836	1,897	806	864	6,326
13	6,390	6,570	1,355	1,252	555	574	2,783
14	4,220	3,150	973	879	395	404	1,670
15	1,531	1,530	559	509	233	234	761
16	917	940	344	325	147	147	470
구간	외주부: 4,324		실내중앙: 994		내주부: 456		총평균: 1,925

<표 3.10> TALS 유무에 따른 춘분 작업면 조도 측정결과(lx) - 2022.3.21

시간	TALS				Non-TALS			
	평균	최소	최대	측정 결과	평균	최소	최대	측정 결과
8	436	184	912		474	204	904	
9	802	319	1,775		879	320	1,836	
10	1,412	550	3,180		1,595	574	3,690	
11	2,066	712	4,770		2,366	742	5,780	

시 간	TALS				Non-TALS			
	평균	최소	최대	측정 결과	평균	최소	최대	측정 결과
12	2,438	790	5,350		6,326	806	16,690	
13	1,758	527	3,790		2,783	555	6,570	
14	1,399	399	3,100		1,670	395	4,220	
15	686	213	1,454		761	233	1,531	
16	433	135	922		470	147	940	

(3) 하지 관측결과

하지의 태양 남중고도는 76.5° 로 일년 중 가장 높은 절기이며, 주간시간대의 천공청명도(Kt)는 $0.25 < Kt < 0.84$ 의 범위로 관측되어 청천공, 부분담천공, 담천공의 천공상태가 모두 기록되었다. 오후 12시에 최대 Kt 0.84와 최대 일사량 1,104 W/m^2 이 관측되었다. 표 3.11 - 3.13은 하지 실내조도 관측결과로, TALS가 설치된 Test room의 평균 조도 절대량은 TALS가 적용되지 않은 Reference room에 비해 더 낮게 관측되었다. 또한, 오후 시간대에 1-3와 1-4를 보면, 건물 내부에 설치된 광선반이 직사 일광을 차단하는 차양 효과가 뛰어난 것을 알 수 있다.










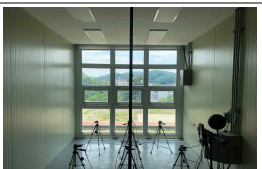








<표 3.11> Test room 하지 실내조도 측정결과(lx)

시간	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	평균 조도
8	1,939	1,952	631	501	352	320	949
9	1,572	1,719	577	505	334	322	838
10	1,733	2,078	626	553	358	349	950
11	1,966	2,293	658	573	376	357	1,037
12	2,433	2,670	903	784	523	500	1,302
13	2,454	2,356	859	710	491	458	1,221
14	3,020	2,639	1,024	793	572	515	1,427
15	2,494	2,016	865	661	482	432	1,158
16	2,394	1,697	751	547	412	363	1,028
구간	외주부: 2,190		실내중앙: 696		내주부: 418		총평균: 1,101

<표 3.12> Reference room 하지 실내조도 측정결과(lx)

시간	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	평균 조도
8	1,909	1,943	838	740	355	326	1,019
9	1,529	1,760	734	740	339	346	908
10	1,738	2,196	777	797	341	356	1,034
11	1,997	2,459	833	833	394	400	1,153
12	2,456	2,724	1,163	1,140	528	531	1,424
13	2,515	2,450	1,073	968	482	476	1,327
14	3,240	2,807	1,303	1,068	570	536	1,587
15	2,542	2,045	1,105	917	482	449	1,255
16	2,404	1,684	971	746	416	378	1,100
구간	외주부: 2,244		실내중앙: 930		내주부: 428		총평균: 1,201

<표 3.13> TALS 유무에 따른 하지 작업면 조도 측정결과(lx) - 2022.6.21

시 간	TALS				Non-TALS			
	평균	최소	최대	측정 결과	평균	최소	최대	측정 결과
8	949	320	1,952		1,019	326	1,943	
9	838	322	1,719		908	339	1,760	
10	950	349	2,078		1,034	341	2,196	
11	1,037	357	2,293		1,153	394	2,459	
12	1,302	500	2,670		1,424	528	2,724	
13	1,221	458	2,454		1,327	476	2,515	
14	1,427	515	3,020		1,587	536	3,240	
15	1,158	432	2,494		1,255	449	2,542	
16	1,028	363	2,397		1,100	378	2,404	

3.2.3 실내 균제도

실내 균제도는 작업면 높이를 기준으로 한 실 전체 조도분포의 균일한 정도를 나타내는 지표로, 사무실과 같은 공간에서는 일정한 시간대에서 유사한 업무 형태의 시작업무가 반복되는 공간으로, 작업면 조도분포를 균일하게 유지하여 재실자의 시각적 불쾌감을 유발하지 않고 재실자의 업무 능력 향상에 도움이 빛환경을 조성해야 한다. 앞선 3.2.2절에서 취득한 각 측정점의 실내조도 데이터를 기반으로 균제도를 평가하게 되는데, 시간대별로 측정된 최소조도를 평균 조도로 나눈 값으로 표현되며, 본 절에서는 TALS 적용 유·무에 따른 시환경 개선 효과를 비교 분석하였다(표 3.14).

$$Uniformityratio = \frac{\text{최소조도}(lx)}{\text{평균조도}(lx)}$$

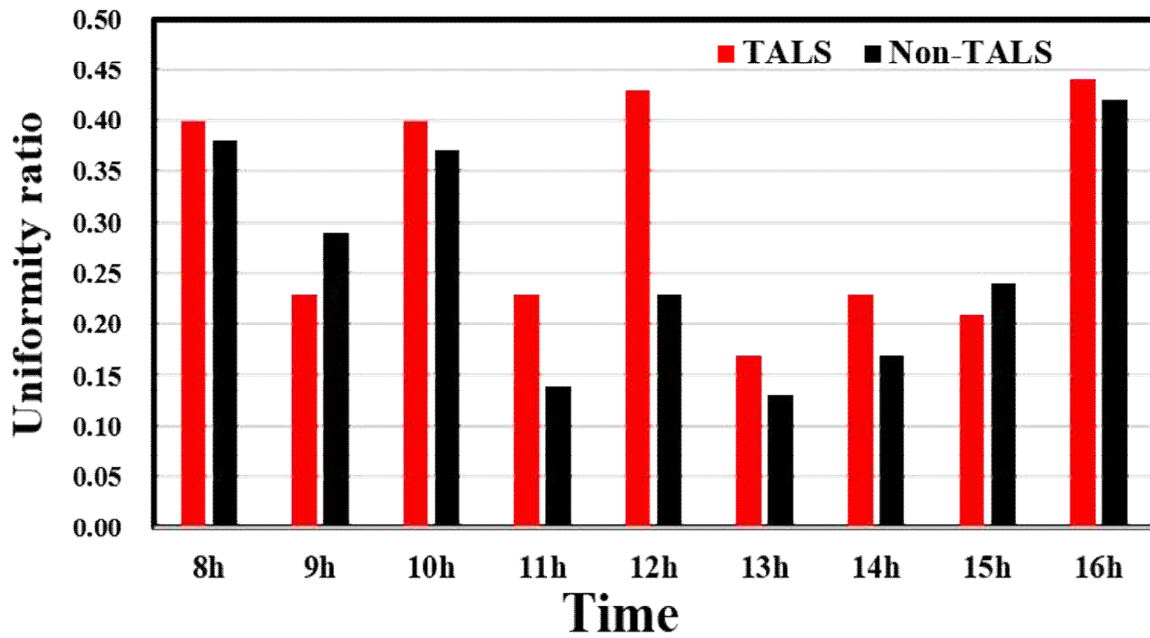
동지의 경우, 9시와 15시를 제외한 모든 시간대에서 TALS 적용으로 인해 실내 균제도가 상승하였고, 특히 정오에는 실내 균제도의 개선 수치가 가장 높았다. 전천공 주광량이 많은 시간대에 TALS의 광선반 반사면은 외주부에 집중되는 주광을 실내 중앙 및 내주부 공간으로 반사·확산하여 주광 유입 깊이를 증가시키고 이것은 실내 균제도 향상에 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 동지의 균제도 분포는 그림 3.3에 정리하였다.

춘분은 9시부터 16시까지 Non-TALS에 비해 TALS가 설치된 Test room의 빛 균일성이 우수한 것으로 나타났다. 정오와 13시에 실내 빛의 분포가 가장 균일하였고(약 2.5배), 15시와 16시는 변화하는 태양계적 때문에 실내 빛환경 차이가 적은 것으로 나타났다. 춘분의 균제도 분포는 그림 3.4에 나타내었다.

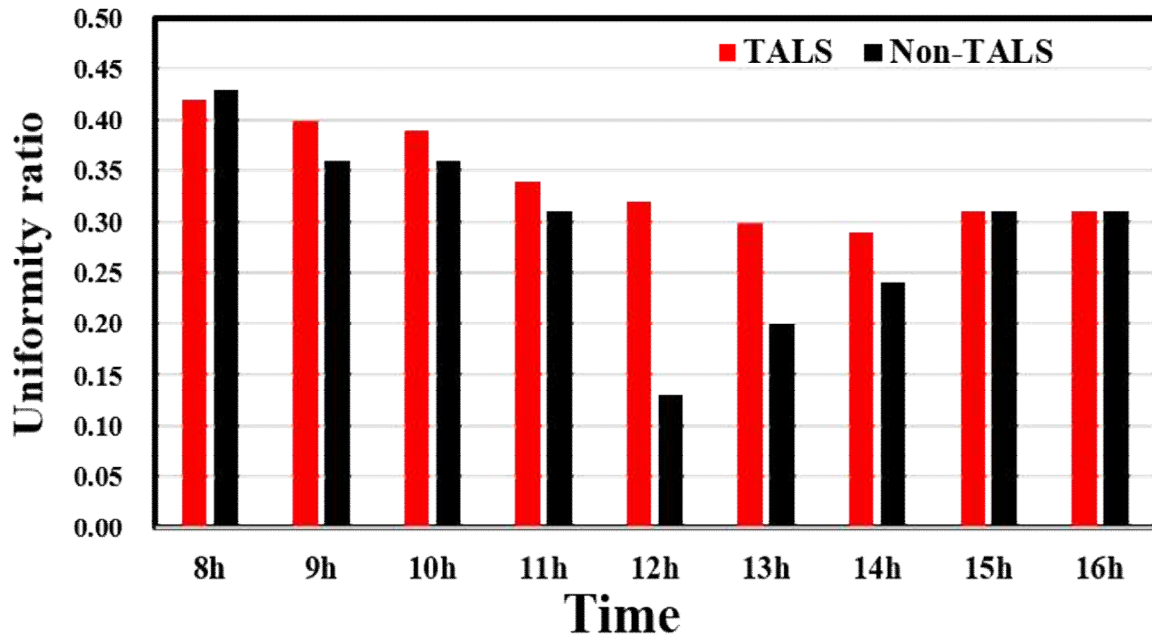
하지는 태양 고도가 가장 높은 절기로 실내로 유입되는 빛이 굉장히 작아 다른 절기에 비해 균제도 개선 효과가 크진 않지만, 관측된 모든 시간대에서 실내 빛의 분포를 균일하게 형성하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 하지의 균제도 분포는 그림 3.5에 표시하였다.

<표 3.14> TALS 유무에 따른 균제도 측정 결과

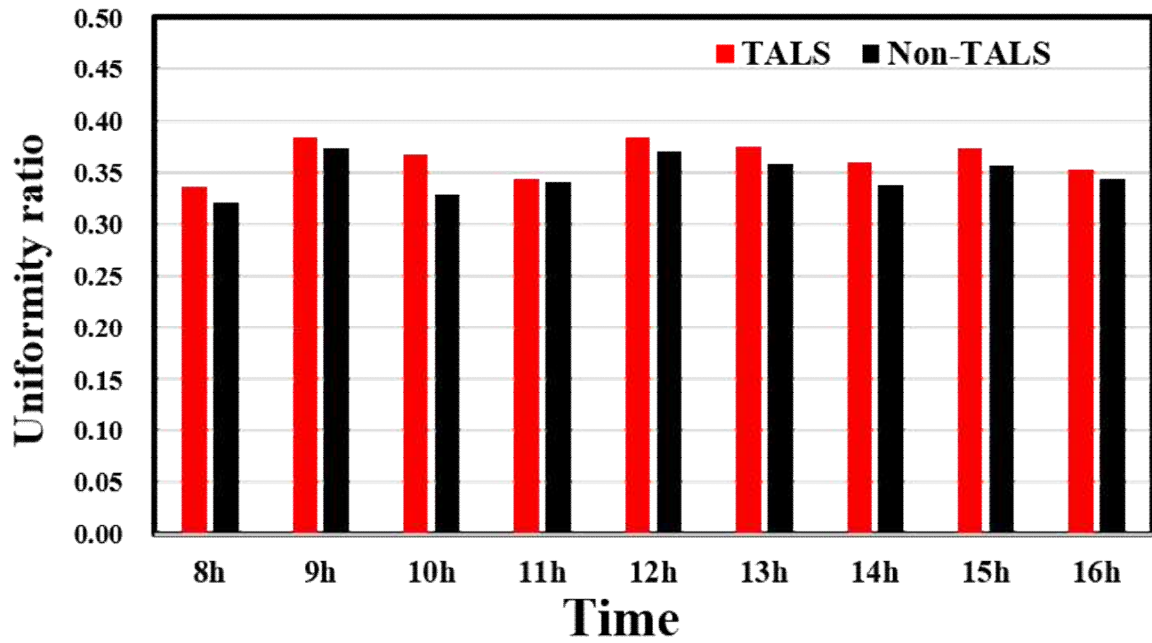
절기	동지(21.12.22)		춘분(22.3.21)		하지(3.21)	
	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
8	0.40	0.38	0.42	0.43	0.34	0.32
9	0.23	0.29	0.40	0.36	0.38	0.37
10	0.40	0.37	0.39	0.36	0.37	0.33
11	0.23	0.14	0.34	0.31	0.34	0.34
12	0.43	0.23	0.32	0.13	0.38	0.37
13	0.17	0.13	0.30	0.20	0.38	0.36
14	0.23	0.17	0.29	0.24	0.36	0.34
15	0.21	0.24	0.31	0.31	0.37	0.36
16	0.44	0.42	0.31	0.31	0.35	0.34



[그림 3.3] 동지 실내 균제도



[그림 3.4] 춘분 실내 균제도



[그림 3.5] 하지 실내 균제도

3.2.4 평균 주광률

실내로 유입되는 주광에 따른 밝기의 물리량은 조도(lx)로 측정된다. 실내 주광 조도는 옥외 전천공조도에 따라서 절대값이 달라지는 특성이 있다. 즉, 옥외 기상 조건에 따라 실내조도 절대값이 달라지기 때문에 주광 설계를 할 경우 조건에 따라 변화하는 조도값을 기준값으로 설정할 수 없게 된다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 주광 설계를 위한 다른 기준을 마련하게 되었는데, 그것이 주광률 (Daylight Factor, 이하 DF)이다. 주광률은 옥외의 전천공 조건을 담천공으로 한정하여 직사일광으로 인해 과도하게 해석될 수 있는 조건을 상쇄하고, 전천공 상태를 균일한 담천공으로 가정하게 되므로 실내 유입 일조량을 안정적으로 해석할 수 있는 기반이 된다. 주광률을 위한 표준 담천공은 CIE담천공, IESNA의 sky ratio, Perez의 Atmospheric clearness parameter 등의 종류가 있으며^[102-103], 그 중 건축환경 분야에서는 천정 휘도와 지평면 휘도의 비율이 3:1인 CIE 표준 담천공을 기준으로 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 Test bed의 2개의 실 (Test room, Reference room)에 실험 장비를 구축하고 주변의 간섭을 최소화하여 실험되었다. 주광률 산정은 실내 작업면 조도(11 - 16)와 실외 전천공 조도를 측정해 실 평균 주광률과 내주부 주광률을 각각 산출하여 TALS 적용 유무에 따른 결과를 평가하였다. 또한, 실내 각 지점의 조도를 전천공조도로 연산하여 실내 주광률 분포를 확인하고 시간별, 절기별로 나누어 그 결과를 정리하였다.

(1) 동지 관측결과

동짓날의 천공상태는 최대 Kt가 0.44로 담천공과 부분담천공이었다. 주광률 측정 결과, 오전 9시를 제외한 모든 시간대에서 TALS가 설치되지 않은 실내의 주광률이 더 높게 나타났다. 특히, 외주부의 주광률은 다른 지점에 비해 높은 주광률이 나타나는데, TALS가 설치되지 않은 Reference room에는 과도한 주광률(주광률 200이상)이 발생하는 포인트가 12개로 TALS(Test room)가 설치된 공간에 비해 50% 더 많은 것으로 확인되었다. 또한, 외주부와 함께 실내 중앙 측정점인 Point 3과 4에서도 높은 주광률로 분석이 되어 실내의 과도한 주광대비는 재실자의 시각적 불쾌감 즉, Glare를 유발할 것으로 추정된다. 태양고도가 낮은 동지의 경우 유입 주광

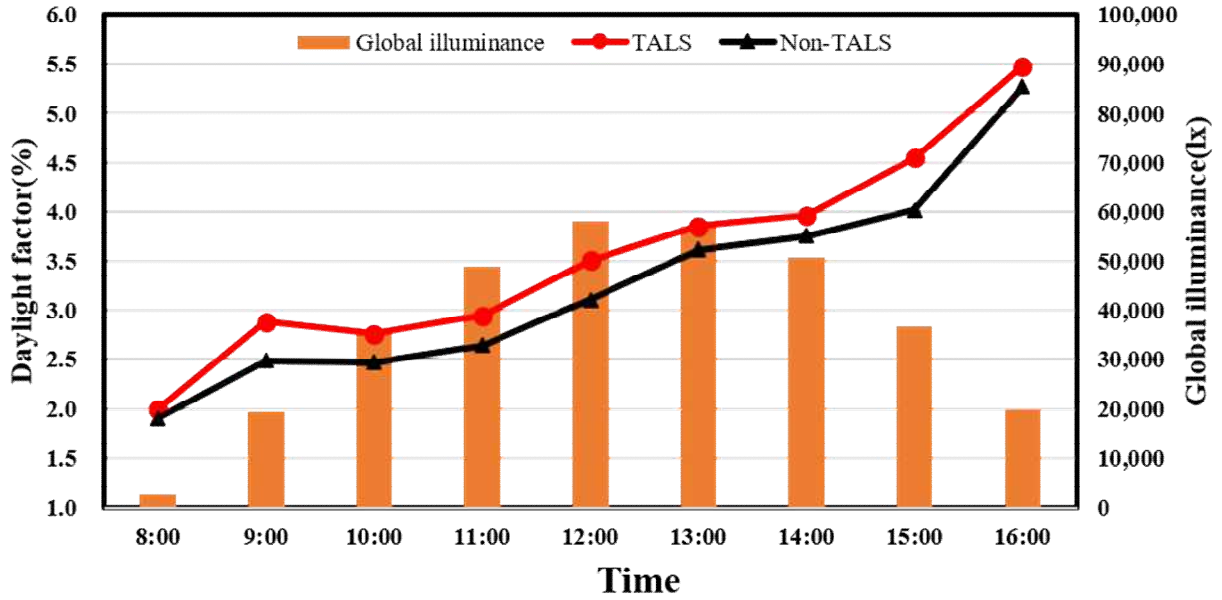
이 실내 안쪽까지 입사하는데, TALS는 외주부에서 실내로 들어오는 과도한 빛의 유입을 차단하는 실 전체의 빛환경 개선 효과가 있는 것으로 나타났다.

<표 3.15> Test room(TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(동지-21.12.22)

시간	전천공 조도	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	내주부 주광률	평균 주광률
8	2,803	7.38	9.47	2.93	2.75	1.76	1.72	2.00	4.33
9	19,255	8.79	42.59	4.78	4.63	2.60	2.50	2.88	10.98
10	36,361	7.97	14.80	4.40	4.97	2.46	2.44	2.76	6.17
11	48,957	8.60	43.08	4.40	5.33	2.58	2.71	2.95	11.12
12	57,933	10.15	10.46	4.89	8.98	2.94	3.61	3.51	6.84
13	57,103	50.47	51.36	5.66	5.04	3.58	3.40	3.85	19.92
14	50,792	11.64	55.72	6.93	4.96	3.97	3.31	3.96	14.42
15	36,822	57.90	10.18	27.37	5.60	4.32	3.85	4.55	18.21
16	20,003	22.15	11.71	12.75	7.00	4.59	4.85	5.48	10.51

<표 3.16> Reference room(Non-TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(동지-21.12.22)

시간	전천공 조도	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	내주부 주광률	평균 주광률
8	2,803	7.05	9.13	3.70	4.07	1.77	1.92	1.91	4.61
9	19,255	8.29	25.60	5.25	5.69	2.41	2.60	2.49	8.31
10	36,361	7.44	13.28	4.95	7.47	2.33	2.60	2.47	6.35
11	48,957	7.25	43.65	4.47	42.59	2.38	2.72	2.65	17.18
12	57,933	7.59	8.30	4.76	46.17	2.83	3.16	3.12	12.14
13	57,103	8.42	43.87	48.18	48.81	3.55	3.41	3.62	26.04
14	50,792	10.00	45.40	51.43	5.12	3.94	3.37	3.75	19.87
15	36,822	50.13	9.07	21.29	6.09	3.82	3.84	4.01	15.71
16	20,003	20.32	11.95	14.50	8.43	4.57	5.33	5.27	10.86



[그림 3.6] 동지 실내 내주부 주광률 및 전천공조도

광선반은 실내의 불균일한 조도와 주광률 분포를 개선하는 요소 기술로, 실내 안쪽까지 주광이 유입되는 효과를 검증하기 위해 그림 3.6와 같이 내주부 중간지점의 주광률 변화추이를 그래프로 정리하였다. 분석결과, 동지에는 TALS가 모든 시간대에서 주광률이 더 높은 것으로 분석되었으며, 주광률 분포의 관점에서 TALS의 적용 효과가 우수한 것이 증명되었다.

(2) 춘분 관측결과

춘분 관측 결과, 태양고도가 높은 12시와 13시에 Reference room에서 높은 주광률이 측정되었다. 외주부는 12시의 경우 Test room에 비해 Reference room이 약 3배(TALS: 6.52 %, Non-TALS: 21.50 %) 이상 크게 나타났다. 춘분 결과는 동지의 실내 빛환경 특성과 동일하게 TALS는 외주부에 유입되는 주광을 천장면으로 반사시키고 빛을 차단하는 가림막 효과가 있는 것으로 나타났다.

주간 시간 각 포인트에서 측정된 주광률을 이용하여 평균 주광률을 산정하였다. TALS의 경우 2.58 %로 Non-TALS(3.61 %)에 비해 낮게 나타났지만, 주광률 기준 2% 보다 높게 나타났다. 또한, 실내 내주부는 주광률 기준에 만족하지 못하는 상황이지만, Test room은 Reference room보다 오후 시간대에 주광률이 더 높게 나타났다. 이것은 실내 안쪽까지 인입하는 실내 조도 절대량이 커져 광선반 본연의 역할을 하면서 빛환경을 개선하는 것을 알 수 있다.

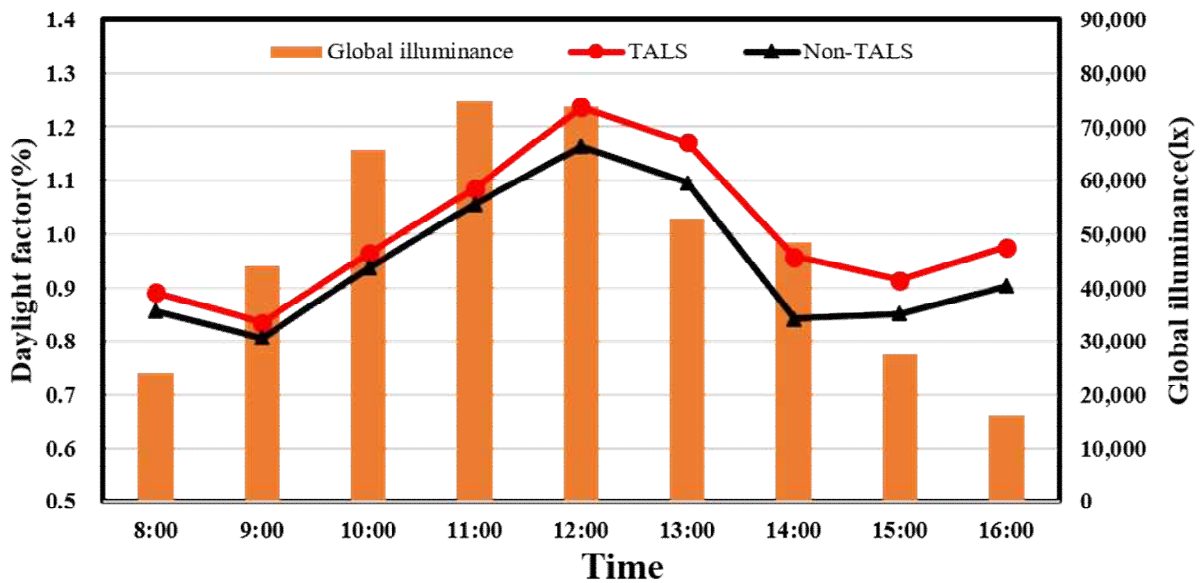
<표 3.17> Test room(TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(춘분-22.3.21)

시간	전천공 조도	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	내주부 주광률	평균 주광률
8	24,110	3.09	3.78	1.28	1.16	0.76	0.78	0.89	1.81
9	43,954	3.01	4.04	1.26	1.17	0.73	0.73	0.83	1.82
10	65,620	3.47	4.85	1.49	1.39	0.86	0.84	0.93	2.15
11	74,904	4.86	6.37	1.76	1.65	0.96	0.95	1.09	2.76
12	73,762	6.52	7.25	2.04	1.84	1.11	1.07	1.24	3.31
13	52,852	7.04	7.17	2.00	1.67	1.07	1.00	1.17	3.33
14	48,608	6.38	6.13	1.67	1.38	0.88	0.82	0.96	2.88
15	27,612	5.27	5.22	1.55	1.26	0.84	0.77	0.91	2.48
16	16,233	5.61	5.68	1.64	1.37	0.89	0.83	0.98	2.67

<표 3.18> Reference room(Non-TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(춘분-22.3.21)

시간	전천공 조도	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	내주부 주광률	평균 주광률
8	24,110	3.02	3.75	1.63	1.68	0.84	0.88	0.86	1.97
9	43,954	3.03	4.18	1.57	1.67	0.73	0.83	0.81	2.00
10	65,620	3.41	5.62	1.79	1.93	0.87	0.95	0.94	2.43
11	74,904	4.75	7.72	2.13	2.29	0.99	1.07	1.06	3.16
12	73,762	21.50	22.63	2.49	2.57	1.09	1.17	1.16	8.58
13	52,852	12.09	12.43	2.56	2.37	1.05	1.09	1.10	5.27
14	48,608	8.68	6.48	2.00	1.81	0.81	0.83	0.84	3.44
15	27,612	5.54	5.44	2.02	1.84	0.84	0.85	0.85	2.76
16	16,233	5.65	5.79	2.12	2.00	0.90	0.90	0.90	2.89

춘분 절기에 광선반의 주광률 변화추이 그래프를 그림 3.7에 나타내었다. 측정점은 내주부 중간지점의 책상면 높이에서 측정되었다. 분석결과, TALS가 모든 시간대에서 주광률이 더 높은 것으로 분석되었으며, 내주부 주광률 분포의 관점에서 TALS의 적용 효과가 우수한 것이 증명되었다.



[그림 3.7] 춘분 실내 내주부 주광률 및 전천공조도

(3) 하지 관측결과

하지 관측 결과, 다른 절기에 비해 주광률의 편차가 크지 않는, 즉 주간 시간대에 주광률의 변화추이가 작고 실내로 유입되는 주광이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이것은 하지의 높은 태양 고도의 영향으로 실내로 직접적으로 입사되는 직사일광이 매우 작아 실내 외주부, 중앙, 내주부의 주광률의 차이가 작게 나타났다. TALS 적용 유무에 따른 주광률 비교 결과는 다음과 같다. TALS가 설치된 Test room의 평균 주광률을 1.54 %이며 Non-TALS의 Reference room의 평균 주광률은 1.67 %로 나타나, 실내로 유입되는 주광량이 가장 작은 하지 절기에도 광선반은 실내 주광률을 감소시키는 것으로 나타났고 주광률 기준 2 %를 하회하는 결과가 관측되었다. 하지만, 내주부 주광률(Point 5, Point6)의 경우, 광선반이 설치된 공간이 더 높게 관측되어 실내 안쪽으로 주광을 깊게 유입시켜 빛환경을 개선하는 효과를 알 수 있었다.

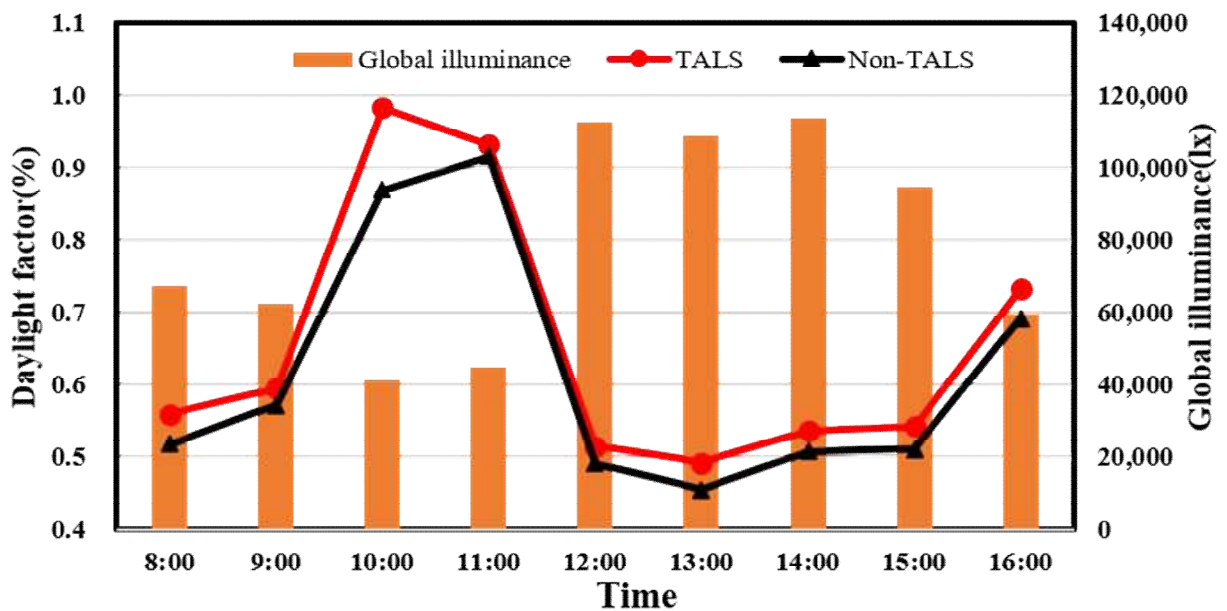
<표 3.19> Test room(TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(하지-22.6.21)

시간	전천공 조도	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	내주부 주광률	평균 주광률
8	67,465	2.87	2.89	0.94	0.74	0.52	0.47	0.56	1.41
9	62,543	2.51	2.75	0.92	0.81	0.53	0.51	0.60	1.34
10	41,283	4.20	5.03	1.52	1.34	0.87	0.85	0.98	2.30
11	45,044	4.36	5.09	1.46	1.27	0.83	0.79	0.93	2.30
12	112,597	2.16	2.37	0.80	0.70	0.46	0.44	0.52	1.16
13	108,922	2.25	2.16	0.79	0.65	0.45	0.42	0.49	1.12
14	113,962	2.65	2.32	0.90	0.70	0.50	0.45	0.54	1.25
15	94,676	2.63	2.13	0.97	0.70	0.51	0.46	0.54	1.22
16	59,634	4.02	2.85	1.26	0.92	0.69	0.61	0.73	1.72

<표 3.20> Reference room(Non-TALS) 실내 평균 주광률 측정결과(하지-22.6.21)

시간	전천공 조도	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	내주부 주광률	평균 주광률
8	67,465	2.83	2.88	1.24	1.10	0.53	0.48	0.52	1.51
9	62,543	2.44	2.81	1.17	1.18	0.54	0.55	0.57	1.45
10	41,283	4.21	5.32	1.88	1.93	0.83	0.86	0.87	2.51
11	45,044	4.43	5.46	1.85	1.85	0.87	0.89	0.92	2.56
12	112,597	2.18	2.42	1.03	1.01	0.47	0.47	0.49	1.26
13	108,922	2.31	2.25	0.99	0.89	0.44	0.44	0.46	1.22
14	113,962	2.84	2.46	1.14	0.94	0.50	0.47	0.51	1.39
15	94,676	2.68	2.16	1.17	0.97	0.50	0.47	0.51	1.33
16	59,634	4.03	2.82	1.63	1.25	0.70	0.63	0.69	1.84

광선반 적용으로 인한 내주부 주광률 변화추이 그래프를 그림 3.8에 나타내었다. 측정 지점은 내주부 중간지점(Point 5와 Point 6 사이)의 작업면 높이에서 측정되었다. 분석결과, 모든 시간에 TALS가 설치된 Test room의 주광률이 더 높은 것으로 분석되었으며, 하지의 높은 태양 고도 특징 때문에 오후 12시부터 전천공 일사량이 굉장히 커지지만 실내로 직접 들어오는 일광이 감소하여 주광량이 낮은 것을 알 수 있다. TALS는 모든 계절에서 실내 주광률을 증가시켜 더 밝고 안정적인 실내 빛/시환경을 조성하는 것으로 증명되었다.



[그림 3.8] 하지 실내 내주부 주광률 및 전천공조도

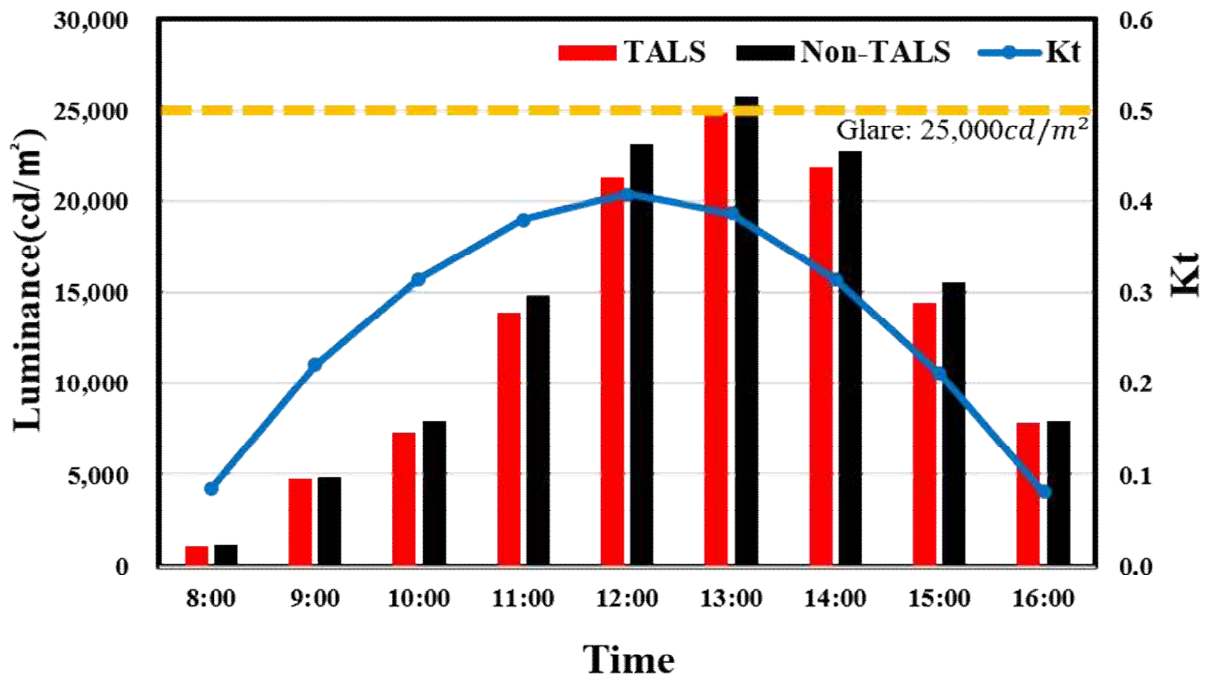
3.2.5 실내 창면 휘도

실내 창면 휘도는 재실자가 빛이 유입되는 창을 바라볼 때 눈부심을 유발하는 밝기를 나타내며, 실내 빛환경 및 시각적 쾌적성을 평가하는 중요한 물리 지표요소이다. 창면 휘도 측정은 사무실에서 거주하는 재실자의 눈높이에서 남쪽의 창문면을 바라보는 상황을 상정하여 바닥면으로부터 1,100 mm의 높이에서 측정되었다. 휘도의 측정은 TALS가 설치된 Test room의 창면과 TALS가 미설치된 Reference room의 창면을 바라보는 관측점을 대상으로 동일한 시간에 측정되었으며, Hi-land Korea사의 동영상 대면휘도계(ELF system)를 이용하여 측정하였다. 창면 휘도의 눈부심 정도는 주광으로부터의 눈부심 수인한도로 평가되는 25,000 cd/m^2 를 기준으로 설정하였다^[104-105].

(1) 동시 관측결과

동시 휘도 측정 결과는 다음과 같다. 동지의 천공청명도(Kt)는 $0.09 < Kt < 0.44$ 의 범위로 관측되어 담천공과 부분담천공 천공상태였고, 창면 휘도는 휘도계를 통해 측정된 창면휘도값과 창면휘도분포의 이미지를 시간대별로 분류하여 표 3.21과 그림 3.9에 정리하였다. 동시 기간동안 측정된 창면 휘도의 경우, Reference room의 측정 보정계수를 설정하지 않아 측정값에 보정가중치를 다시 산정하여 동지의 실내 창면 휘도 분포 및 천공청명도의 결과값을 재산출하였다. 남향의 실험실 창면휘도는 오전 8시부터 16시까지 전 시간대에서 TALS가 설치된 창면의 휘도가 낮게 측정되었다.

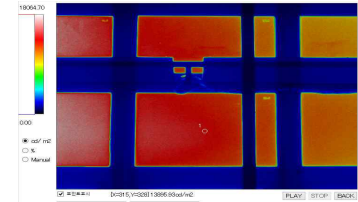
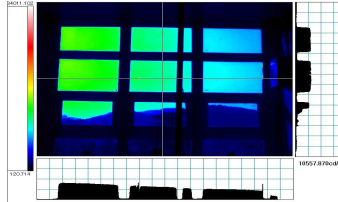
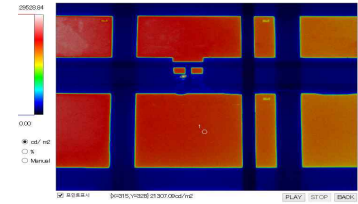
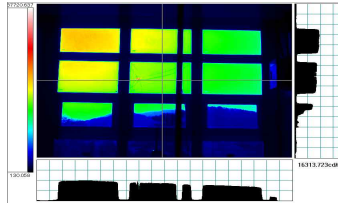
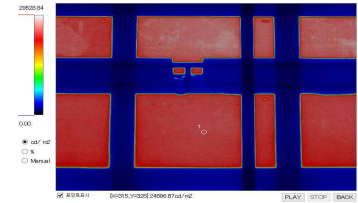
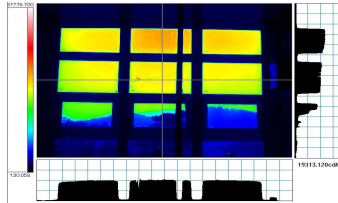
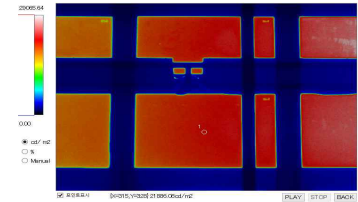
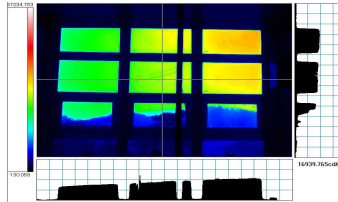
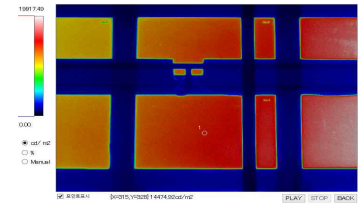
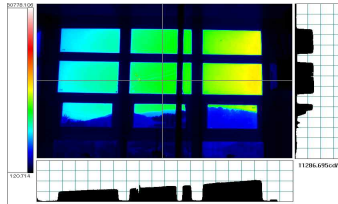
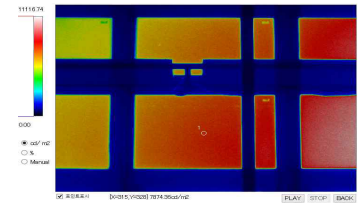
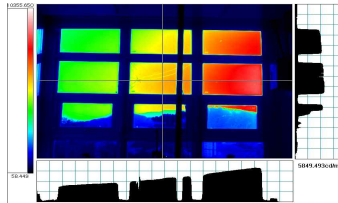
사람에게 시각적 불능의 원인이 되는 불쾌글레어는 13시 Reference room에서 발생하였다. 그에 반해 TALS가 설치된 Test room은 측정된 동지의 모든 시간대에서 불쾌 글레어 기준을 하회하는 휘도가 측정되어, TALS는 창면 불쾌글레어 제어 효과가 있어 시각적으로 안정된 실내 빛환경을 유지하는 것으로 나타났다.



[그림 3.9] 동지 실내 창면 휘도 및 Kt

<표 3.21> TALS 유무에 따른 동지 창면 휘도 측정 결과(cd/m^2) - 2021.12.22

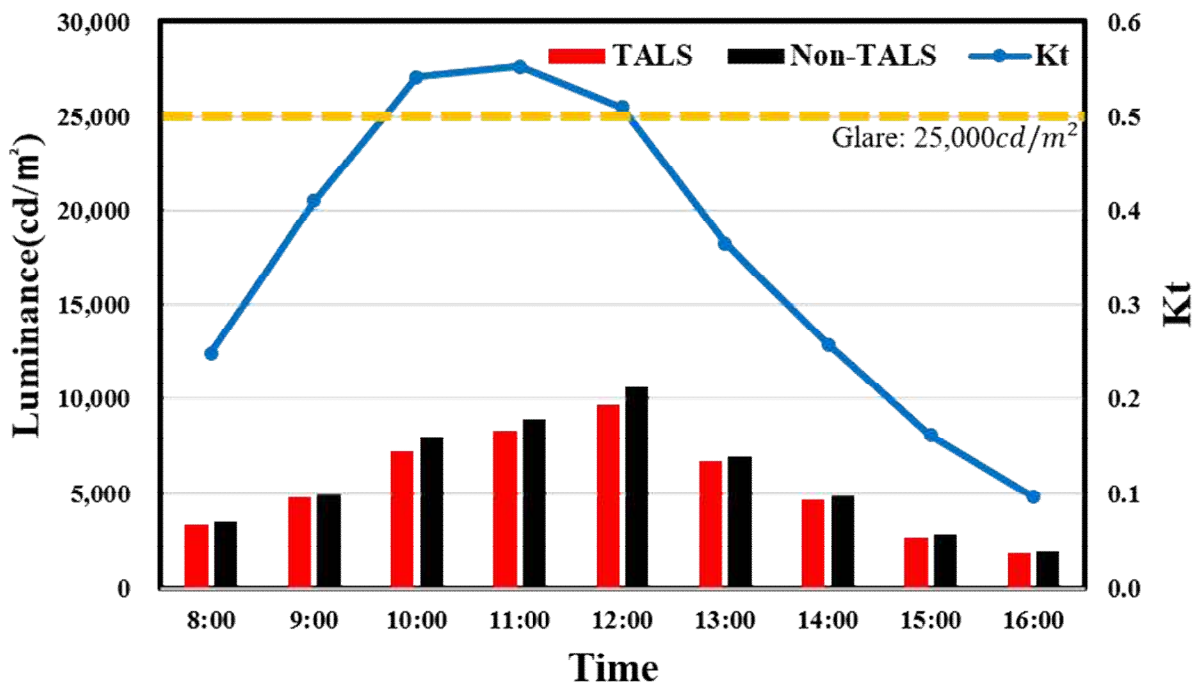
시간	TALS		Non-TALS	
	창면 휘도	측정 결과	창면 휘도	측정 결과
8	1,104		1,149	
9	4,768		4,869	
10	7,295		7,987	

시간	TALS		Non-TALS	
	창면 휘도	측정 결과	창면 휘도	측정 결과
11	13,895		14,809	
12	21,307		23,160	
13	24,896		25,742	
14	21,886		22,743	
15	14,474		15,568	
16	7,874		7,968	

(2) 춘분 관측결과

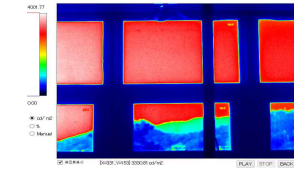
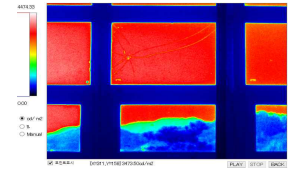
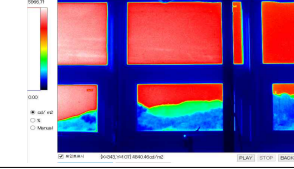
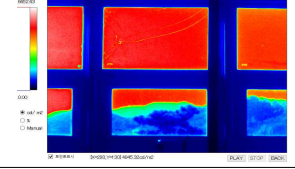
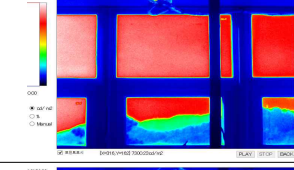
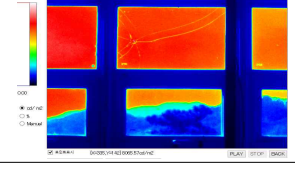
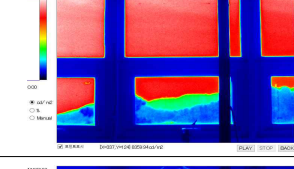

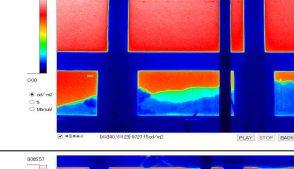

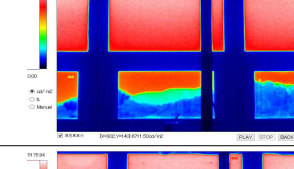

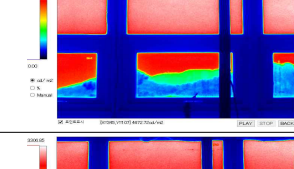

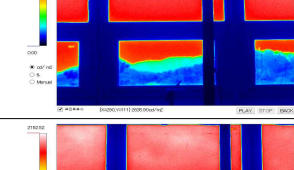
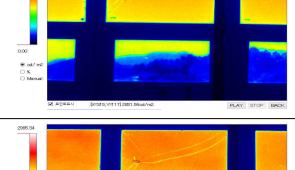
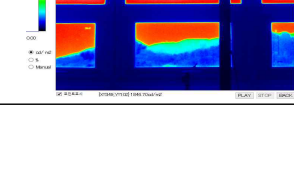
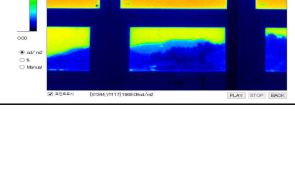
휘도가 측정된 춘분의 천공청명도는 오전 11시에 0.55로 부분담천공과 담천공이었다. 표 3.22와 그림 3.10는 휘도계를 통해 측정된 창면 휘도값과 창면 휘도 분포의 이미지를 시간대별로 분류하여 정리된 표이다. 남향으로 설치된 실험실의 창면 휘도 결과는 모든 시간대에서 TALS가 설치된 Test room이 낮은 것으로 나타났다.

두 실험실의 조건에서 오전 10시의 휘도 하강률이 9.49 %로 가장 큰 차이를 보였고, 직사 일광이 직접적으로 입사되는 정오 시간대를 거쳐 일몰에 가까운 오후 시간대로 갈수록 휘도의 차이가 급격히 줄어드는 것으로 나타났다. Test room의 경우, TALS 설치의 효과로 창면 휘도가 모든 시간대에서 평균 약 5.23 % 감소하는 것으로 분석되었다. 가장 높은 창면 휘도의 시간대는 TALS가 설치되지 않은 실험실의 정오이며 창면휘도는 $10,654 \text{ cd/m}^2$ 로 측정되었고, 가장 낮은 창면 휘도는 TALS가 설치된 조건의 16시로 $1,847 \text{ cd/m}^2$ 이다. 춘분의 모든 시간대에서 실내 재실자의 시각적 불쾌감을 유발하는 휘도 기준인 $25,000 \text{ cd/m}^2$ 를 초과하지 않아 시각적으로 안정적인 실내 빛환경을 조성하는 것으로 증명되었다.



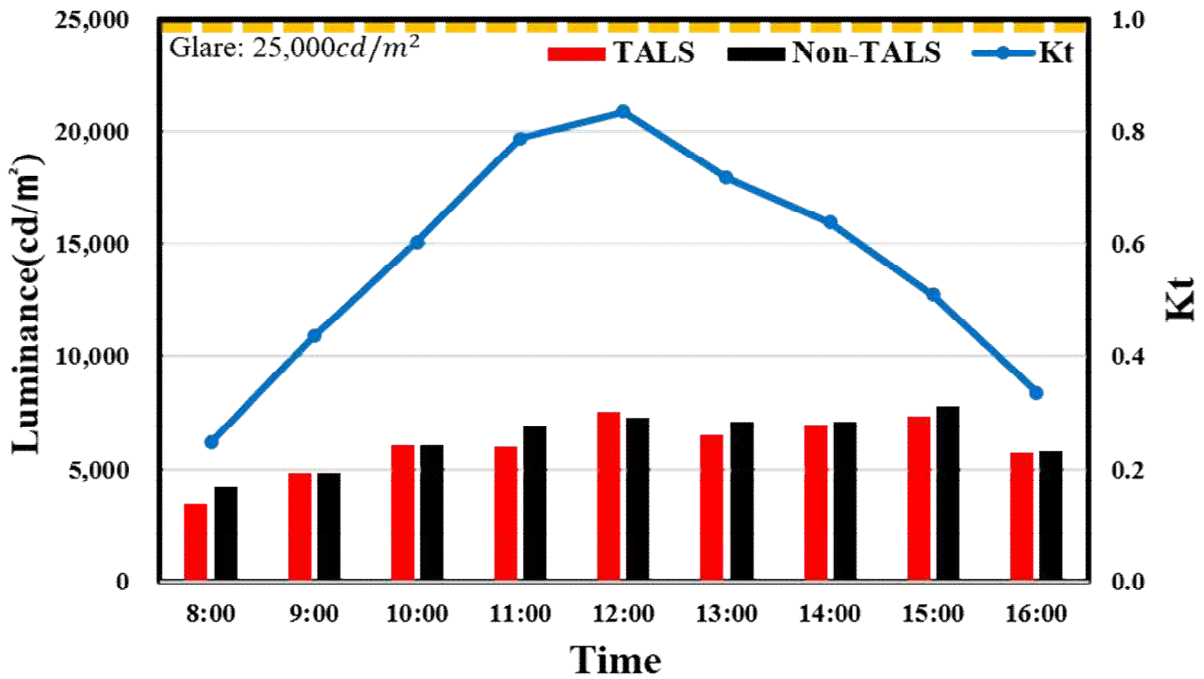
[그림 3.10] 춘분 실내 창면 휘도 및 Kt

<표 3.22> TALS 유무에 따른 춘분 창면 휘도 측정결과(cd/m^2) - 2022.3.21.

시간	TALS		Non-TALS	
	창문면 휘도	측정결과	창문면 휘도	측정결과
8시	3,331		3,474	
9시	4,840		4,945	
10시	7,300		8,066	
11시	8,360		8,949	
12시	9,727		10,654	
13시	6,712		6,948	
14시	4,673		4,864	
15시	2,636		2,852	
16시	1,847		1,869	

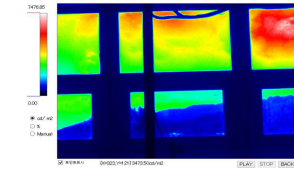
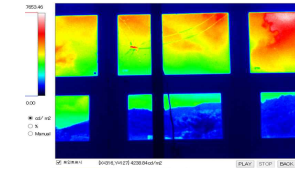
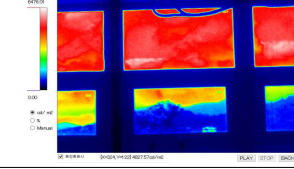
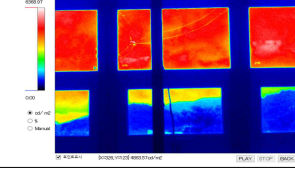
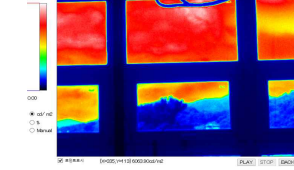
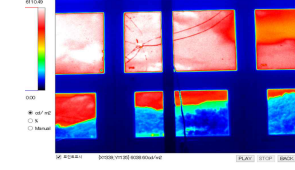
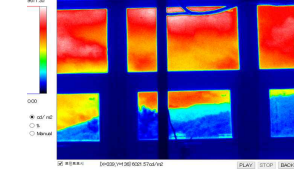
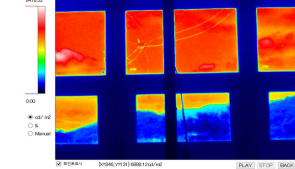
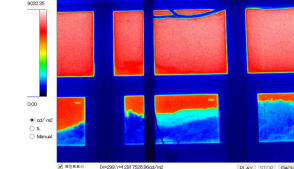

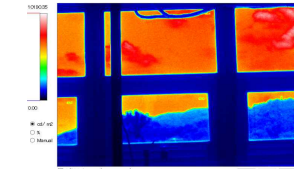
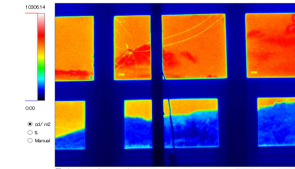
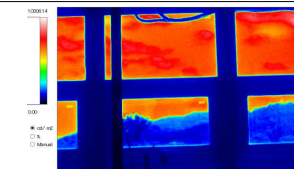
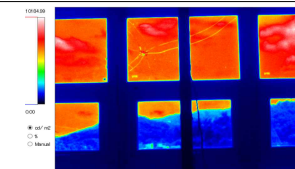
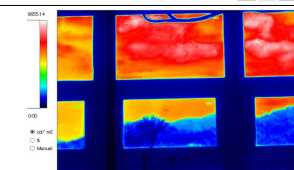
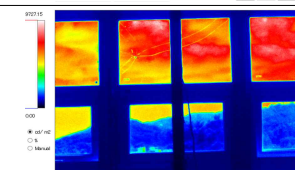
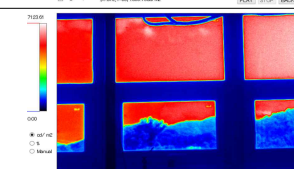
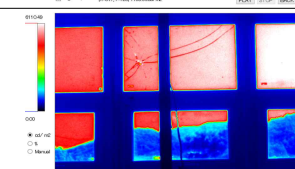
(3) 하지 관측결과

하지의 천공청명도는 $0.25 < Kt < 0.84$ 가 주간시간대에 관측되어 청천공, 부분담천공, 담천공의 천공상태가 나타났고, 오후 12시에 최대 $Kt(0.84)$ 와 최대 일사량 ($1,104 \text{ W/m}^2$)이 관측되었다. 표 3.23와 그림 3.11는 휘도계를 통해 측정된 창면 휘도값과 창면 휘도 분포의 이미지를 시간대별로 분류하여 정리된 표이다. 남쪽에 설치된 창면의 휘도 결과는 10시(0.41 %), 12시(3.17 %)에서 TALS가 설치된 실험실에서 휘도가 높게 관측되었고, 그 외에 시간에서는 TALS 적용으로 휘도가 감소하는 결과가 관측되었다. 창면 휘도는 오전 8시에 가장 큰 차이(18.05 %)가 관측되었고, TALS 설치효과로 창면 휘도가 평균 약 4.86 % 감소하는 것으로 분석되었다. 가장 높은 창면 휘도의 시간대는 Non-TALS 실험실의 15시에 발생하였고 창면 휘도는 $7,758 \text{ cd/m}^2$ 로 측정되었고, 가장 낮은 창면 휘도는 TALS가 설치된 실험실의 8시로 $3,473 \text{ cd/m}^2$ 이다. 하지는 시각적 불쾌감을 유발하는 글레어 기준($25,000 \text{ cd/m}^2$)을 상회하지 않아, 안정적인 실내 빛환경을 조성하는 것으로 증명되었다.



[그림 3.11] 하지 실내 창면 휘도 및 Kt

<표 3.23> TALS 유무에 따른 하지 창면 휘도 측정결과(cd/m^2) - 2022.6.21.

시간	TALS		Non-TALS	
	창문면 휘도	측정결과	창문면 휘도	측정결과
8시	3,473		4,238	
9시	4,827		4,863	
10시	6,063		6,038	
11시	6,021		6,888	
12시	7,526		7,295	
13시	6,484		7,063	
14시	6,947		1,064	
15시	7,359		7,758	
16시	5,769		5,822	

3.3 빛환경 시뮬레이션

Radiance 프로그램은 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory(LBNL)의 조명 연구팀이 개발한 시뮬레이션으로 자연채광과 인공조명에 의한 빛환경의 정량적, 정성적 평가를 할 수 있는 툴이다(그림 3.12). Radiance는 건물 실내 빛환경을 평가하기 위해 Radiosity 방법과 Ray-tracing 방법을 사용한다. Radiosity는 시뮬레이션 공간을 메시로 나누고 모든 방향에 일정하게 빛이 전달되며, 반복해석으로 모든 빛이 흡수될 때까지 해석이 진행된다^[106-107]. Ray-tracing은 빛의 이동과 방향을 역으로 추적하여 실제 광선이 발생한 광원의 활동을 예측하고, 조도 및 휘도 분포를 계산하고 가시화하는 분석방법이다. 또한, Radiance 프로그램은 빛의 굴절, 반사뿐만 아니라 Photon-Map과 같은 추가 기능을 통해 Caustic(빛이 표면이 고르지 못한 곳에 반사 및 굴절되어 빛의 무늬를 만드는 현상)과 같은 다양한 빛환경 시뮬레이션이 가능하다.

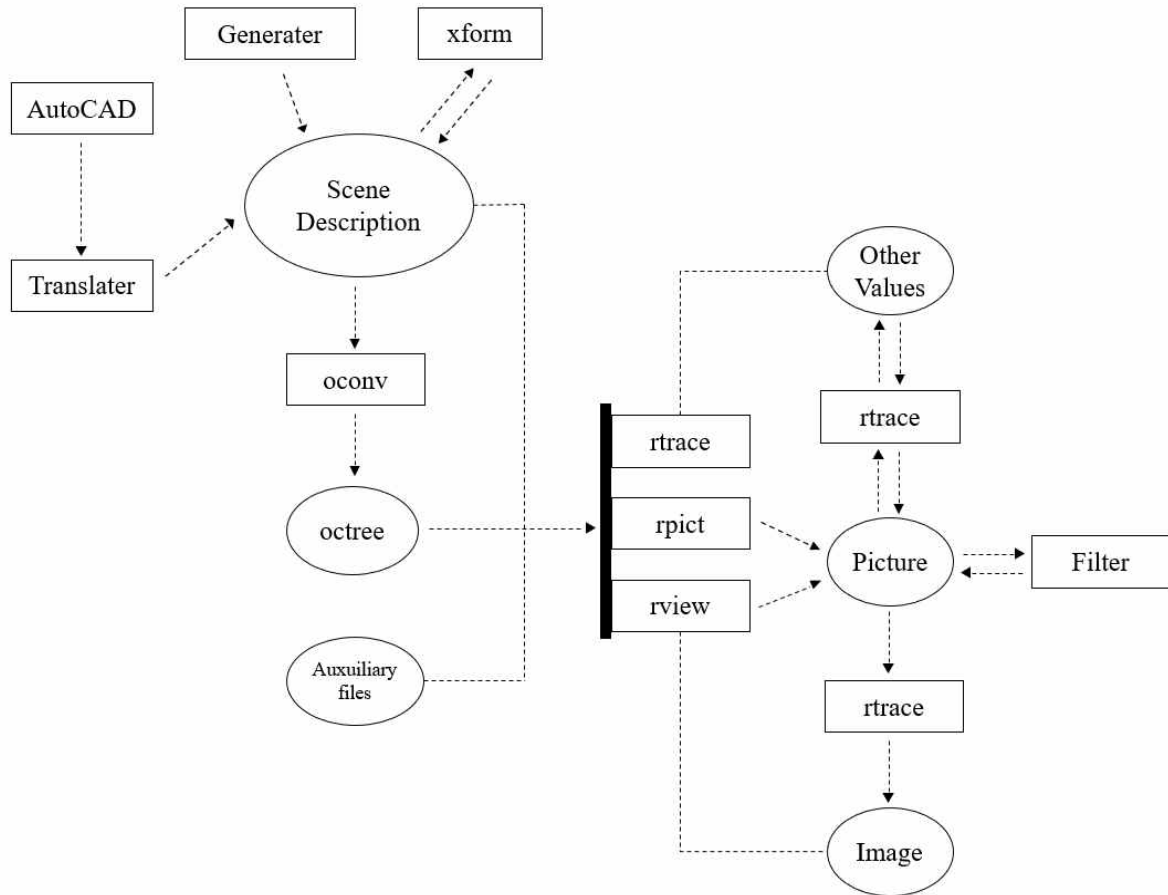


[그림 3.12] Radiance 시뮬레이션 예시^[108]

Radiance 프로그램은 다수의 독립된 프로그램 모듈로 구성되어 있다. 3차원 공간의 기하학적 모델링 도구, 광원 및 재료의 광학적 모델링 도구, 계산 결과를 가시화하여 이미지 파일을 작성 및 변환하는 도구, 눈부심 현상을 분석하여 가시화하는 도구 등 빛환경의 모델링 및 분석, 평가에 필요한 기능을 제공한다^[109-112].

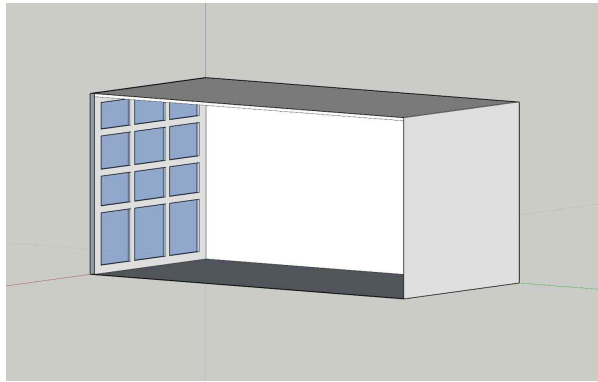
Radiance 프로그램의 구성 및 데이터 처리 과정을 그림 3.13에 나타내었다. 시뮬레이션 수행과정은 다음과 같다. 먼저, Radiance 프로그램에서 제공하는 Generator(기본 텍스트 파일 편집기)를 이용하거나 3차원 프로그램의 기하학적 모델링 자료를 입력하여 *.rad(Scene file) 파일로 변환시킨다. 시뮬레이션 모델 형태를 xform 명령어로 구현시키고 형태와 재료 및 조명 등의 물성치를 적용한 *.rad 파일을 생성한다. *.rad 파일과 천공상태, 위치 및 시간 정보의 *.sky 파일을 생성하고, 관측점 관측방향 관측각도를 좌표로 작성한 *.view 파일을 생성한다. 위 4가지 기본 파일 정보로 Scene 파일을 생성하고 시뮬레이션 모델의 기하학적 형태에 oconv 명령을 통해 시뮬레이션에 필요한 Geometry, 시점 및 재질 등을 하나의 파일로 통합한 후, rpict, rtrace, rview 명령어를 통해 Radiance 가시화 이미지를 생성하고 조도 및 휘도값을 계산하여 확인할 수 있다^[113-114].

본 연구에서는 실증 실험을 통한 TALS 빛환경 성능평가를 수행하여 기상조건 및 주변상황에 따라 비교적 정확한 평가할 수 있는 장점이 있지만, 특정 외부조건에 따른 결과만 정리하였기 때문에 빛환경 시뮬레이션 프로그램을 보조 수단으로 활용하여 계절별, 시간별, 천공조건별 다양한 조건의 결과를 정리해 TALS 빛환경 개선 효과를 검증하고자 한다.

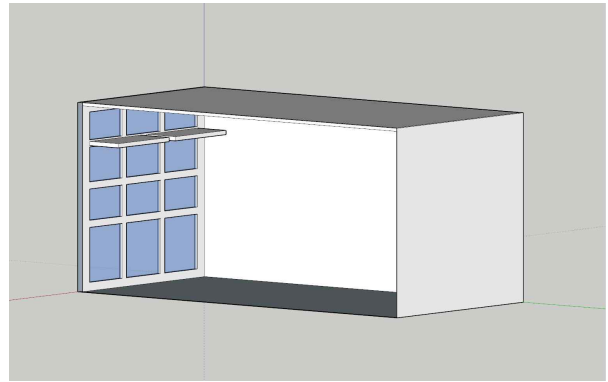


[그림 3.13] Radiance 프로그램 구성 흐름도 및 데이터 처리 과정

TALS 적용 유무에 따른 실내 빛환경 개선 효과를 비교하기 위해 그림 3.14, 3.15와 같이 TALS 적용 및 미적용의 대상공간 모델링을 수행하고 물리지표(조도, 휘도, 균제도, 주광률, 조도비) 결과값을 도출 및 비교했다. 모델링 대상은 TALS가 설치된 C대학의 Test bed 공간을 재현했고 시뮬레이션 해석 결과와 실제 모니터링 데이터의 오차율을 비교 검증하였다. 시뮬레이션 대상 공간은 6.02 m(W) × 2.85 m(D) × 2.66 m(H) 규모의 남향 건물이며 정남향쪽으로 2.27 m(W) × 2.14 m(H) 크기의 격자무늬 창문틀이 설치되었고 유리창은 THK26 로이복층유리(5LE+16AR+5LE)로 투과율 78.2 %, 반사율 5.6 %의 물성값을 갖는 창호시스템이 설치되었다.

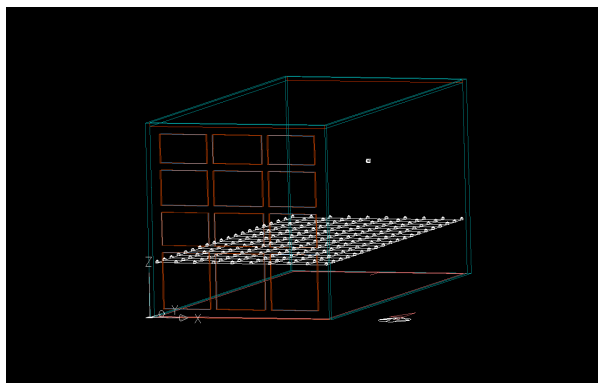


(a) Non-TALS, 3D 모델링

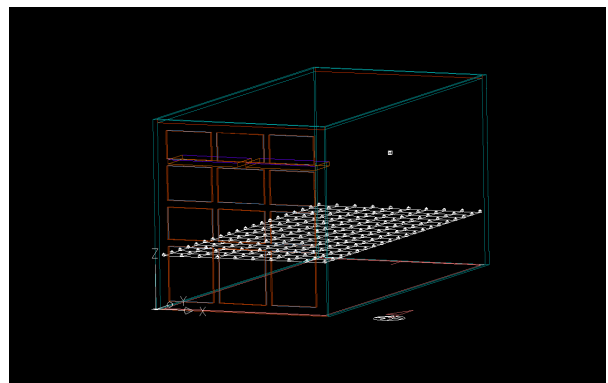


(b) TALS, 3D 모델링

[그림 3.14] Test bed 3D 모델링



(a) Non-TALS, 3D 빛환경해석 모델링



(b) TALS, 3D 빛환경해석 모델링

[그림 3.15] 실내 빛환경 해석을 위한 시뮬레이션 모델

실내 빛환경 시뮬레이션은 LBNL에서 개발한 Radiance와 Autodesk사의 Ecotect^[115-116]을 활용하였고, 춘분(3월 21일), 하지(6월 21일), 추분(9월 23일), 동지(12월 22일)의 청천공 조건과 담천공 조건에서 우리나라 채광주간 기준 시간인 오전 8시부터 오후 4시까지의 데이터를 각각 수집하였다. 실내 공간 재료의 반사율은 천장 70 %, 벽체 52.7 %, 바닥 20 %, 창 틀 66.7 %, 광선반 반사면 95 %, 광선반 틀 66.5 %이다. 실내 빛환경 시뮬레이션을 위한 입력 조건은 아래의 표 3.24과 같고, 표 3.25는 Radiance 시뮬레이션을 통해 도출한 절기별 전천공조도이다.

<표 3.24> 실내 빛환경 시뮬레이션 입력 조건

구분	내용
시뮬레이션 실내공간 크기	6.02 m(W) × 2.85 m(D) × 2.66 m(H)
개구부 크기	2.27 m(W) × 2.14 m(H)
실내공간 반사율	천장: 70% , 벽체: 52.7% , 바닥: 20% 창 틀: 66.7% , 광선반 반사면: 95% , 광선반 틀: 66.5%
위치	Latitude: 35.14 ° Longitude: -126.93 ° Turbidity: 3 Standard Meridian: -135 °
시뮬레이션 평가범위	Lens angle: 28 ° Illuminance grid height: 850 mm
시뮬레이션 시간	오전 8시 ~ 오후 4시
시뮬레이션 날짜	춘분(3월 21일), 하지(6월 21일), 추분(9월 23일), 동지(12월 22일)
천공조건	청천공(Clear). 담천공(Overcast)

<표 3.25> 시뮬레이션을 위한 담천공 및 청천공 기준 전천공조도(lx)

천공	담천공				청천공			
	춘분	하지	추분	동지	춘분	하지	추분	동지
8시	5,378	9,619	6,296	1,338	15,750	43,064	24,861	4,181
9시	8,876	12,767	9,663	4,460	39,214	59,838	43,441	14,593
10시	11,805	15,391	12,418	7,039	54,777	73,029	57,941	28,863
11시	13,948	17,271	14,298	8,876	65,595	82,756	67,618	38,927
12시	15,129	18,233	15,260	9,794	71,700	89,834	72,363	44,032
13시	15,260	18,321	15,172	9,794	72,478	90,539	71,843	44,027
14시	14,649	17,446	14,035	8,876	68,104	83,752	66,308	39,015
15시	12,592	15,653	11,980	7,039	58,799	74,526	55,726	29,009
16시	9,925	13,161	9,138	4,503	44,671	61,668	40,473	14,653

3.3.1 실내조도

시뮬레이션에 의한 실내 각 측정점은 바닥면으로부터 850 mm 높이의 작업면에 일정한 간격으로 그리드를 설정하여 조도를 산출하였다. 조도센서는 시뮬레이션 데이터와 Test bed 실측 결과를 비교하기 위해 동일한 위치로 설정하였다. 시뮬레이션은 춘분, 하지, 추분, 동지의 천청공과 담천공 조건에서 우리나라 채광시간인 오전 8시부터 오후 4시 사이의 시간대별 실내 조도를 분석하였다.

담천공 조건에서 TALS 적용 시, 시간별 실내조도 평균값은 춘분 214 lx , 하지 274 lx , 추분 215 lx , 동지 123 lx 이며, 담천공 조건에서 TALS 미적용 시, 시간별 실내조도 평균값은 춘분 278 lx , 하지 348 lx , 추분 275 lx , 동지 155 lx 이다. 담천공에서 TALS 설치 시, Non-TALS 공간에 비해 실내조도가 감소하는 것으로 평가되었다. 이는 실내공간 중 주광이 가장 많이 유입되는 외주부에 광선반이 설치되어 실내로 입사되는 주광량이 감소하는 것이 원인이다. 담천공 조건에서의 시뮬레이션 결과는 표 3.27 - 3.34와 같다.

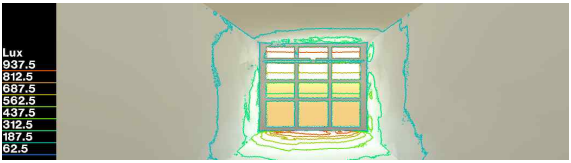

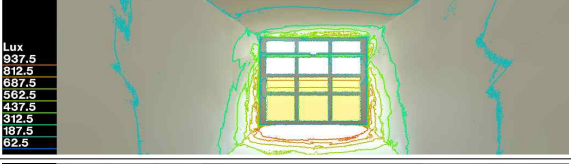






청천공 조건에서 TALS 적용 시, 시간별 실내조도 평균값은 춘분 616 lx, 하지 450 lx, 추분 621 lx, 동지 3,457 lx이며, 청천공 조건에서 TALS 미적용 시, 시간별 실내조도 평균값은 춘분 768 lx, 하지 515 lx, 추분 771 lx, 동지 4,424 lx이다. 담천공 조건과 동일하게 청천공 조건에서도 TALS가 설치된 공간의 실내조도가 더 작은 것으로 나타났다. 이는 TALS가 외주부에 집중되는 직사일광을 차단하는 광선반본연의 기능을 하여 실내조도가 낮은 것으로 분석하였다. 청천공 시뮬레이션 결과는 표 3.35 - 3.42에 정리하였다.

<표 3.26> 천공조건에 따른 작업면 평균 조도 시뮬레이션 결과(lx)










천공 조건	절기	TALS	Non-TALS
담천공	춘분	214	278
	하지	274	348
	추분	215	275
	동지	123	155
청천공	춘분	616	768
	하지	450	515
	추분	621	771
	동지	3,457	4,424

담천공 조건에서 최대조도는 하지 13시(1,274 lx)에 나타났고, 최소조도는 동지 8시(4 lx)에 나타났고, 청천공 조건에서 최대조도는 하지 13시(26,299 lx)에 나타났고, 최소조도는 동지 8시(67 lx)에 나타났고, 청천공의 많은 주광과 동지의 낮은 태양고도로 인해 외주부에서 최대조도가 기록되었고, 실내 안쪽에서 최소조도가 기록되었다.


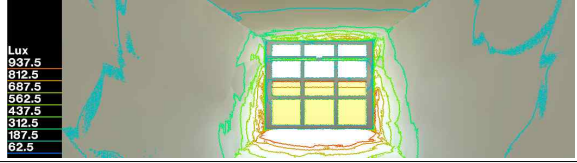
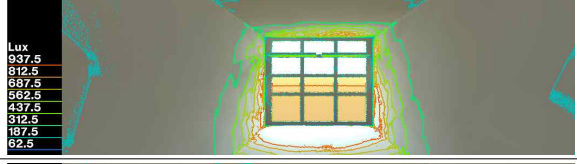

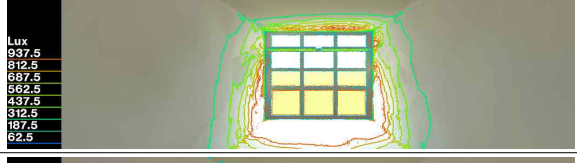

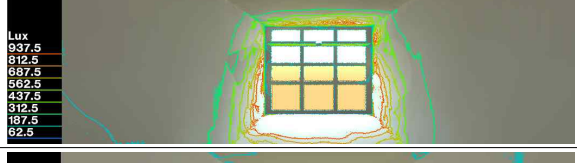
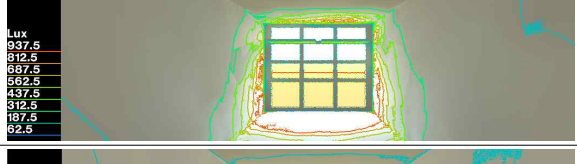

<표 3.27> TALS 적용 시 춘분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	97	22	308	
9시	160	38	522	
10시	214	47	665	
11시	252	56	802	
12시	271	55	866	
13시	270	63	867	
14시	267	63	891	
15시	220	52	698	
16시	180	44	574	

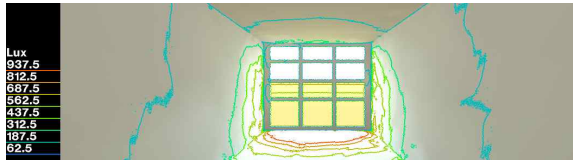





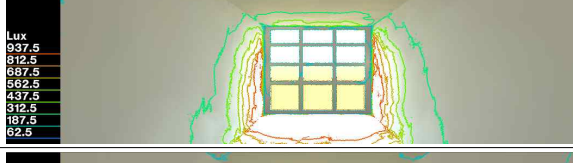
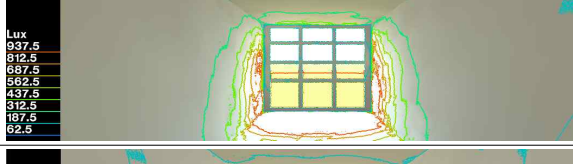
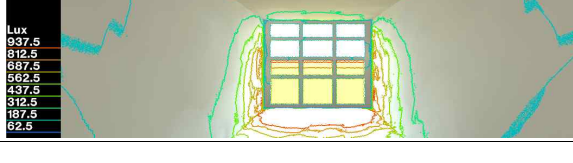
<표 3.28> TALS 미적용 시 춘분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	154	35	438	
9시	205	48	578	
10시	272	63	814	
11시	328	75	972	
12시	346	80	1,014	
13시	351	74	1,065	
14시	333	76	973	
15시	289	68	869	
16시	225	47	662	

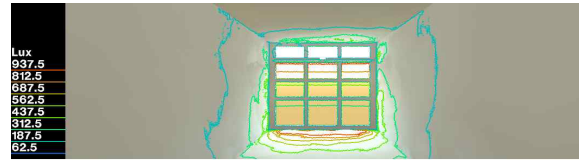




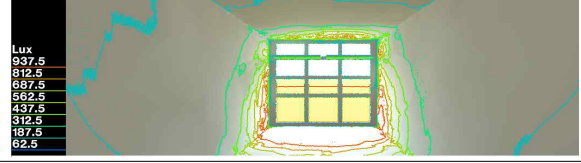


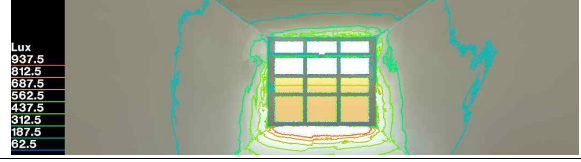
<표 3.29> TALS 적용 시 하지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	176	33	615	
9시	233	58	704	
10시	279	61	912	
11시	313	75	946	
12시	323	62	1,079	
13시	332	70	1,095	
14시	305	73	1,041	
15시	273	73	931	
16시	233	49	818	

<표 3.30> TALS 미적용 시 하지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	222	46	688	
9시	284	51	876	
10시	343	84	1,007	
11시	387	86	1,229	
12시	418	97	1,144	
13시	413	85	1,274	
14시	402	92	1,199	
15시	362	89	1,071	
16시	304	55	890	



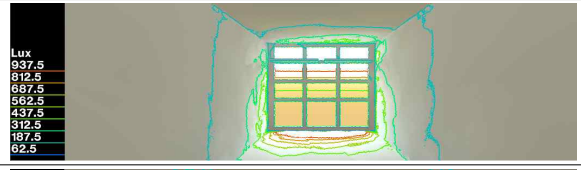





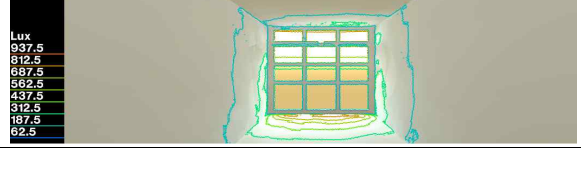
<표 3.31> TALS 적용 시 추분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			
	평균	최소	최대	시뮬레이션 결과
8시	110	26	349	
9시	170	42	548	
10시	224	55	727	
11시	255	67	867	
12시	273	57	956	
13시	271	56	873	
14시	255	64	775	
15시	219	49	666	
16시	162	38	550	










<표 3.32> TALS 미적용 시 추분(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	144	31	435	
9시	222	40	659	
10시	286	68	827	
11시	326	74	951	
12시	352	82	1,070	
13시	342	82	961	
14시	323	72	961	
15시	268	64	832	
16시	210	45	616	


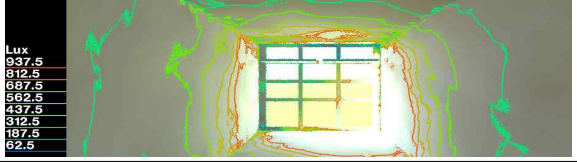
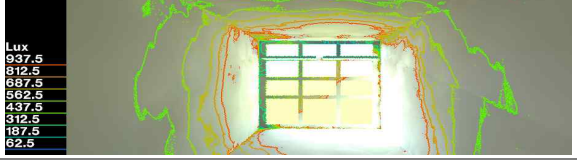
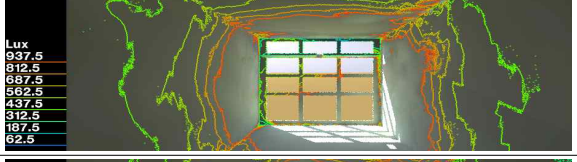

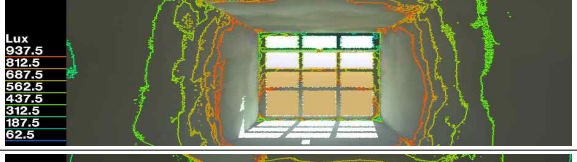
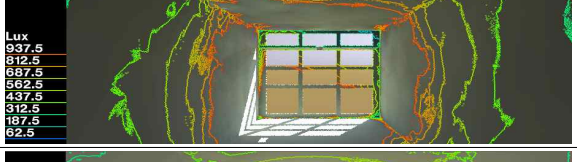

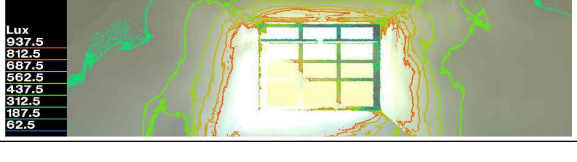
<표 3.33> TALS 적용 시 동지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	24	4	78	
9시	80	18	255	
10시	122	28	390	
11시	161	38	509	
12시	176	45	556	
13시	176	45	556	
14시	161	38	509	
15시	122	28	390	
16시	82	21	272	


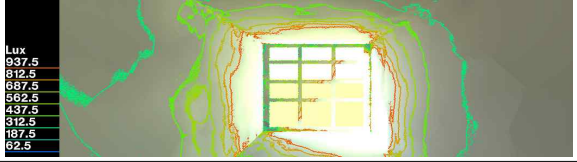
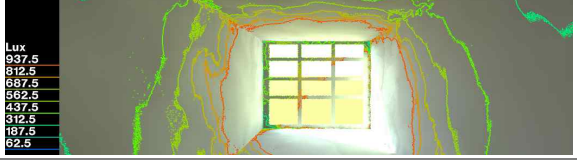





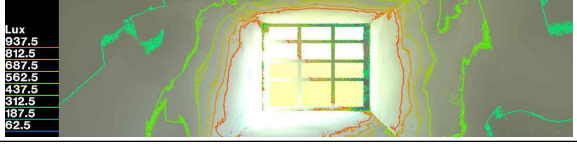
<표 3.34> TALS 미적용 시 동지(담천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	30	6	90	
9시	103	24	296	
10시	155	9	448	
11시	205	44	612	
12시	221	47	672	
13시	221	47	672	
14시	205	44	612	
15시	155	29	448	
16시	101	21	303	





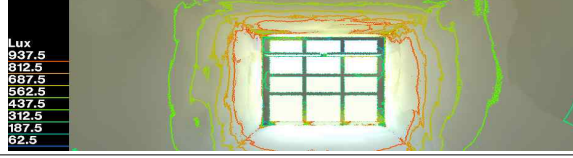
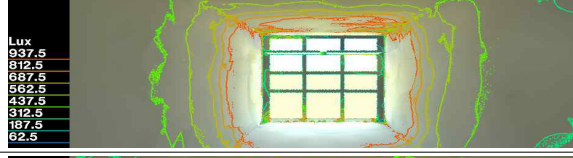
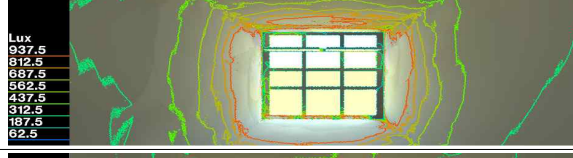
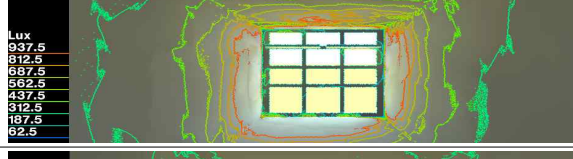

<표 3.35> TALS 적용 시 춘분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	236	71	619	
9시	430	138	1,195	
10시	573	206	1,522	
11시	707	235	1,855	
12시	806	272	1,974	
13시	834	225	2,012	
14시	806	218	1,965	
15시	651	188	1,672	
16시	499	144	1,367	

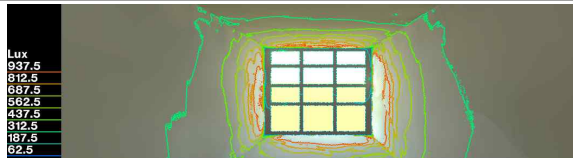
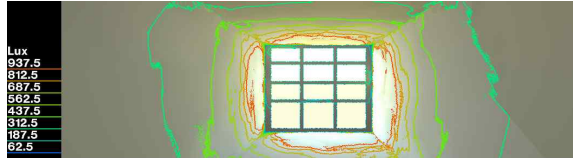
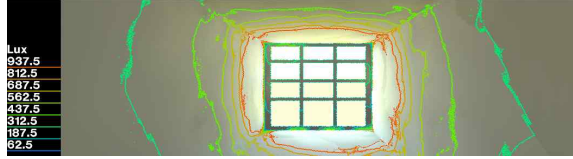
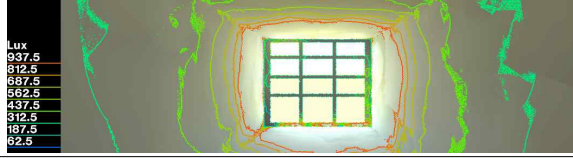


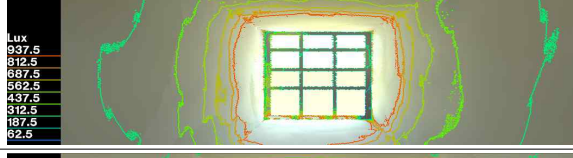
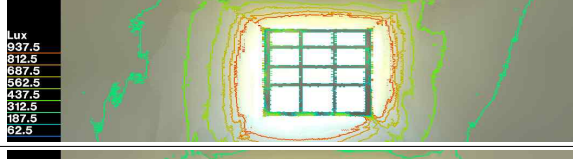
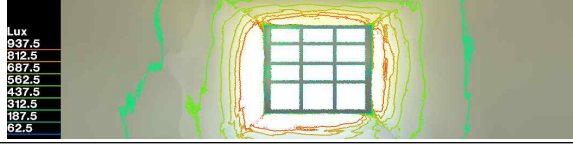
<표 3.36> TALS 미적용 시 춘분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	292	88	733	
9시	543	142	1,483	
10시	738	200	1,843	
11시	906	237	2,149	
12시	1,025	301	2,474	
13시	1,034	292	2,492	
14시	974	251	2,575	
15시	799	210	2,019	
16시	602	149	1,574	

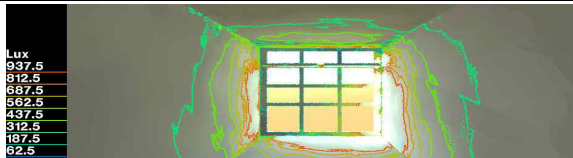
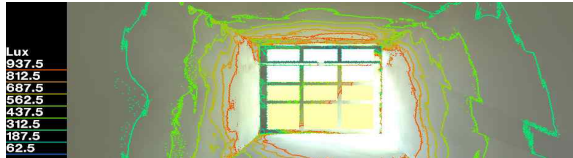





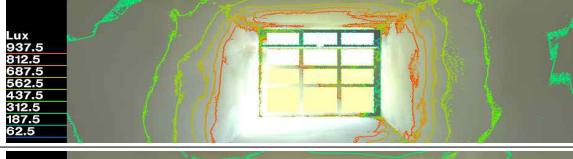
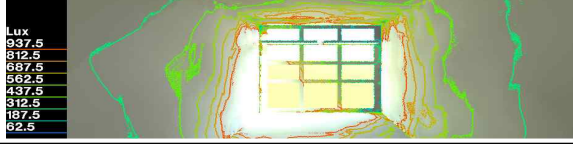
<표 3.37> TALS 적용 시 하지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			
	평균	최소	최대	시뮬레이션 결과
8시	326	106	758	
9시	349	116	886	
10시	410	142	965	
11시	473	157	1,132	
12시	572	192	1,467	
13시	593	182	1,422	
14시	511	169	1,294	
15시	444	139	1,073	
16시	373	118	880	

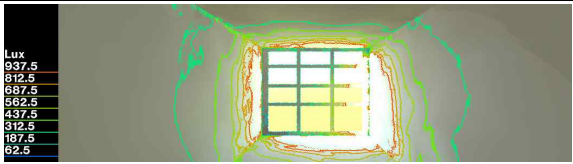
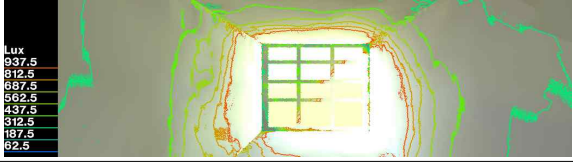





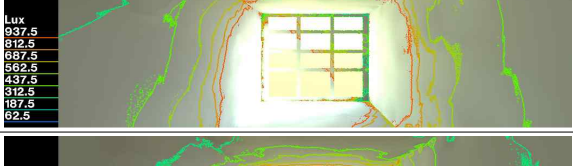

<표 3.38> TALS 미적용 시 하지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	326	106	758	
9시	403	119	959	
10시	492	148	1,172	
11시	558	177	1,357	
12시	685	191	1,684	
13시	678	199	1,544	
14시	573	152	1,353	
15시	506	134	1,234	
16시	416	133	949	

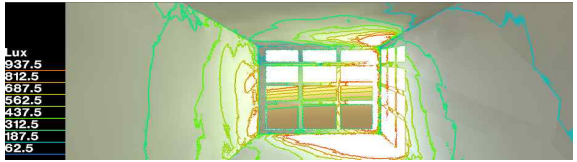
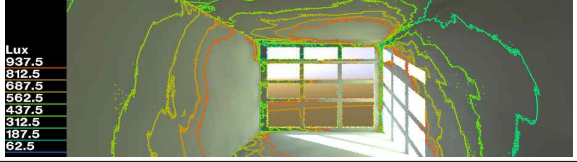
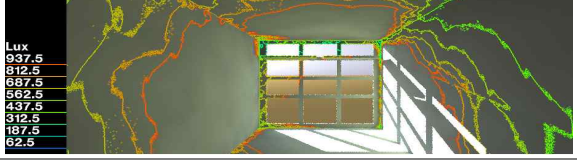


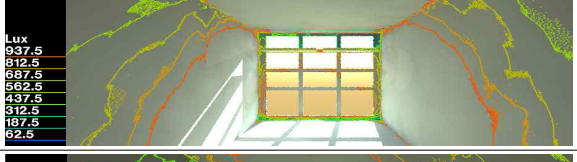
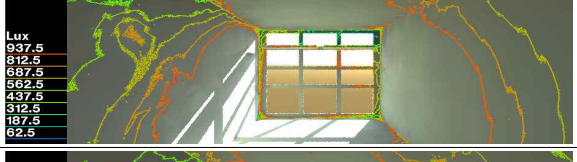
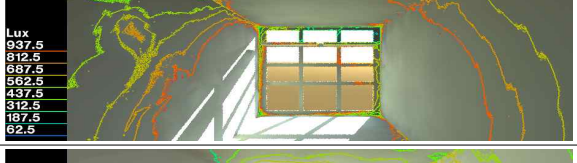
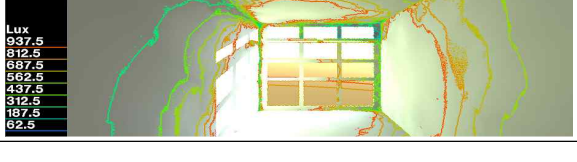
<표 3.39> TALS 적용 시 추분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			
	평균	최소	최대	시뮬레이션 결과
8시	284	96	748	
9시	473	159	1,293	
10시	623	213	1,524	
11시	738	236	1,888	
12시	811	247	2,118	
13시	836	240	2,109	
14시	754	210	1,950	
15시	616	173	1,524	
16시	454	147	1,194	

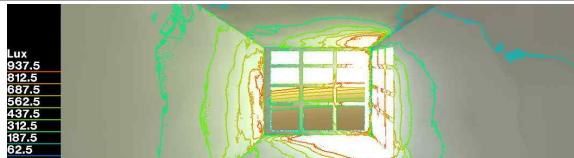




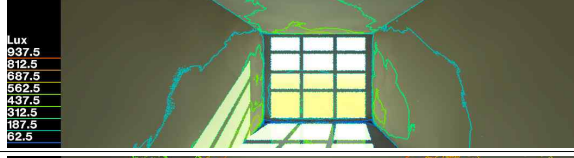
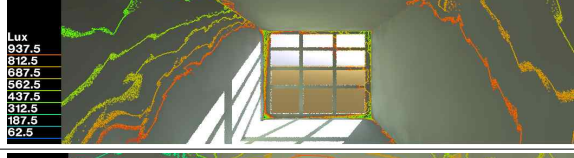

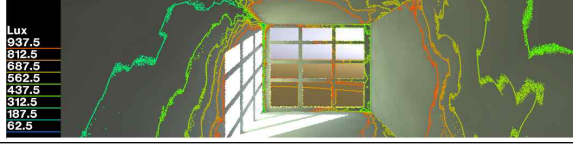
<표 3.40> TALS 미적용 시 추분(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	348	100	878	
9시	588	151	1,595	
10시	793	142	2,579	
11시	943	273	2,287	
12시	1,010	310	2,579	
13시	1,001	251	2,423	
14시	950	272	2,437	
15시	757	208	2,033	
16시	547	142	1,277	

<표 3.41> TALS 적용 시 동지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	677	170	1,750	
9시	682	193	1,608	
10시	2,119	277	16,722	
11시	6,277	355	22,879	
12시	6,115	445	26,111	
13시	6,158	417	26,189	
14시	6,265	369	22,755	
15시	2,170	321	16,658	
16시	650	185	1,715	

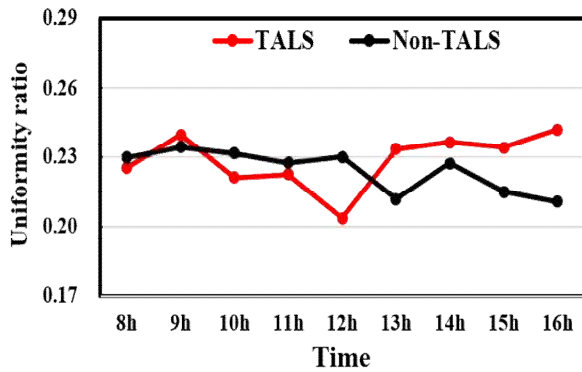
<표 3.42> TALS 미적용 시 동지(청천공) 기준 작업면 조도 시뮬레이션 결과 상세(lx)

시간	TALS 미적용			시뮬레이션 결과
	평균	최소	최대	
8시	322	67	925	
9시	806	211	1,929	
10시	2,346	298	17,178	
11시	8,215	412	23,194	
12시	8,363	529	26,259	
13시	8,374	529	26,299	
14시	8,223	457	23,244	
15시	2,390	326	17,163	
16시	779	183	1,919	

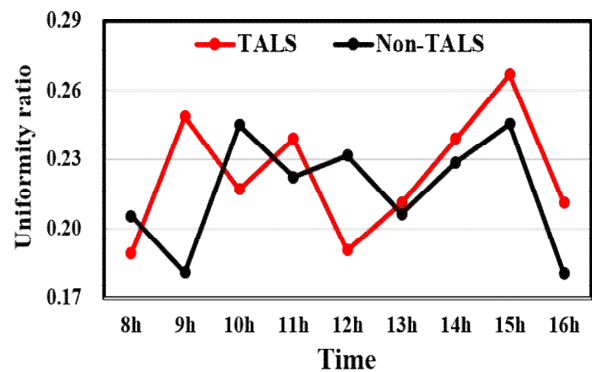
3.3.2 실내 균제도

균제도는 실내 작업면 높이의 밝기가 어느 정도로 고르게 분포하는지 판단하는 정량적 물리 지표로, 한 실내공간 안에서 빛의 밝음의 차이를 나타낸다. 균제도는 재실자의 시각적 피로도를 낮추고 업무효율을 향상할 뿐만 아니라 조명기구 설계 시, 에너지 사용 절감과 조명기기 설치비용을 줄일 수도 있다.

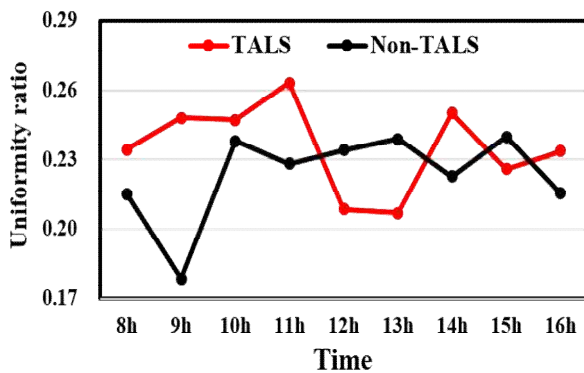
균제도는 실내공간의 최소조도를 평균 조도로 나눈 결과로, 앞에서 산출한 시뮬레이션 그리드의 조도값을 계산했다. TALS 적용 유무에 따른 실내 균제도 결과는 그림 3.16 - 3.17와 표 3.43 - 3.44에 정리하였다. 담천공 조건에서 TALS는 모든 계절의 오후 시간대에 실내 안쪽까지 입사하는 빛의 양을 증가시켜 균제도를 개선시키고, 특히 태양고도가 낮은 동지의 경우 TALS를 통해 약 2.8 %의 균제도 개선 효과가 나타났다. TALS의 빛환경 개선 효과를 연간으로 확장해 보면, 균제도는 연평균 1.3 %가 개선되고 절기별로는 하지에 균제도가 가장 높은 것으로 분석되었다. TALS 반사면을 통해 실내로 입사하는 빛은 실내 마감면의 반사과정을 통해 실내 안쪽까지 빛을 전달하여 균제도를 증가시키는 것으로 확인되었다. 반면, 하지의 경우 높은 고도의 태양궤적을 갖기 때문에 TALS 반사면에 입사하는 빛의 각도가 작아 실내 안쪽까지 들어오는 빛의 양이 적어서 적용 전·후의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.



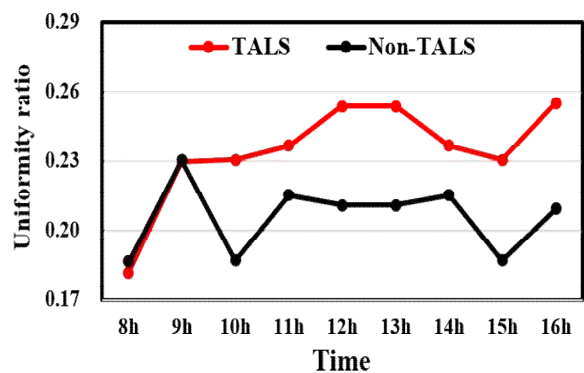
(a) 춘분(3.21)



(b) 하지(6.21)



(c) 추분(9.23)



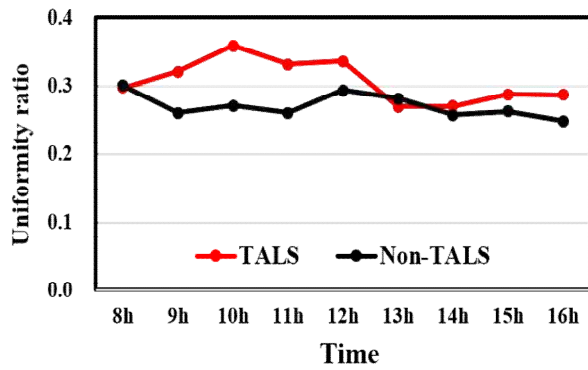
(d) 동지(12.22)

[그림 3.16] TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 균제도(담천공)

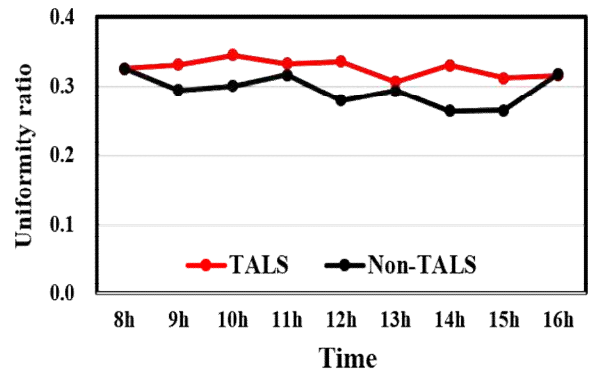
<표 3.43> 담천공 조건에서 평균 균제도

구분	춘분	하지	추분	동지	전체평균
TALS	0.23	0.22	0.24	0.23	0.23
Non-TALS	0.22	0.22	0.22	0.21	0.22

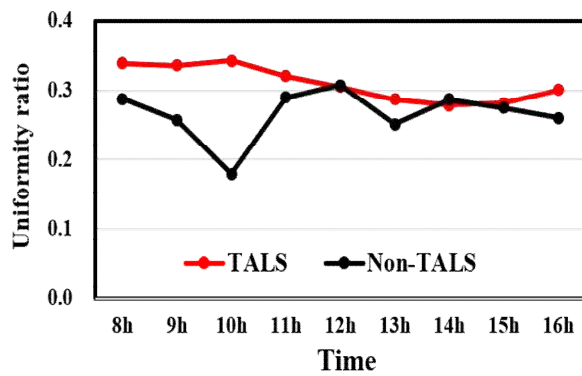
청천공 시, 모든 계절 모든 시간대에서 실내 안쪽까지 입사하는 빛의 양이 증가하여 균제도를 개선하는 효과가 나타났다. 특히, 가을(추분)에 균제도 개선 효과가 가장 우수하다(4.4 % 증가). 청천공 시, TALS 적용으로 균제도는 평균 3.2 % 개선되었다.



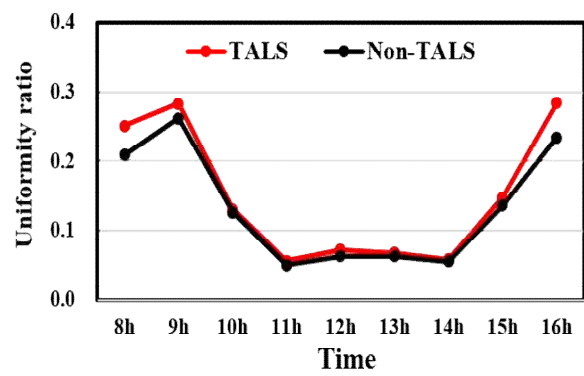
(a) 춘분(3.21)



(b) 하지(6.21)



(c) 추분(9.23)



(d) 동지(12.22)

[그림 3.17] TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 균제도(청천공)

<표 3.44> 청천공 조건에서 평균 균제도

구분	춘분	하지	추분	동지	전체평균
TALS	0.31	0.33	0.31	0.15	0.27
Non-TALS	0.27	0.30	0.27	0.13	0.24

3.3.3 평균 주광률

Radiance에서 제시하는 담천공상태 외부 수평면 조도(표 3.25)와 실내 평균 조도값으로 TALS 설치 유무에 따른 시뮬레이션 모델 실내 평균 주광률을 표 3.45에 정리하였다. TALS 적용 실내 평균 주광률은 1.79이고 TALS가 적용되지 않은 실내 평균 주광률(2.29)이 모든 계절에서 높게 나타났다. TALS 미적용 실내 평균 주광률이 크게 나타난 이유는 실내 조도분포의 경향은 유사하지만, 외주부의 실내조도 절대값이 더 크게 나타났기 때문이다.

<표 3.45> TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 평균 주광률

절기	춘분		하지		추분		동지	
	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
8시	1.80	2.85	1.83	2.31	1.75	2.29	1.76	2.21
9시	1.80	2.31	1.82	2.22	1.75	2.30	1.79	2.30
10시	1.81	2.30	1.81	2.23	1.81	2.30	1.74	2.20
11시	1.81	2.35	1.81	2.24	1.78	2.28	1.81	2.30
12시	1.79	2.29	1.77	2.29	1.79	2.31	1.80	2.26
13시	1.77	2.30	1.81	2.26	1.79	2.25	1.80	2.26
14시	1.82	2.28	1.75	2.30	1.82	2.30	1.81	2.30
15시	1.75	2.29	1.74	2.31	1.83	2.23	1.74	2.20
16시	1.81	2.27	1.77	2.31	1.77	2.29	1.82	2.25

3.3.4 평균 조도비

Radiance에서 제시하는 청천공상태 외부 수평면 조도(표 3.25)와 실내 평균 조도값으로 TALS 설치 유무에 따른 시뮬레이션 모델 실내 평균 조도비를 표 3.46에 정리하였다. TALS 미적용 실내 평균 조도비는 4.08이고, TALS가 적용된 실내 평균 조도비는 3.51로 나타났다. 이는 창문면을 통해 입사하는 주광이 TALS에 반사되어 주광률이 낮게 나타나는 것으로 보인다. 하지만, 사무실 건축물의 조도 기준인 600 lx를 초과하는 조도가 오전 10시부터 발생하는데, 실내로 입사하는 주광을 줄여 더 쾌적한 실내 빛환경을 조성할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 청천공 조건의 동지는 낮은 태양고도로 인해 실내 작업면 높이에 들어오는 빛의 양이 많아, 정오 시간대에 조도비가 다른 절기에 비해 크게 나타난다. 따라서, 광선반이 설치된 경우 외주부의 실내조도 절대값이 크게 감소하여 담천공, 청천공 조건 모두 주광률과 조도비가 낮게 나타나는 것으로 확인되었다.

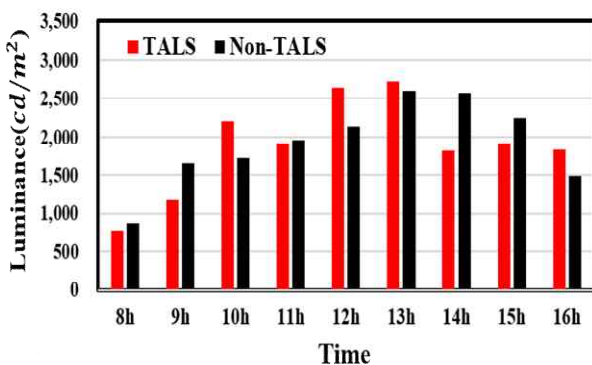
<표 3.46> TALS 시스템 적용 유무에 따른 실내 평균 조도비

절기	춘분		하지		추분		동지	
	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
8시	1.50	1.85	0.76	0.76	1.14	1.40	16.18	7.70
9시	1.10	1.38	0.58	0.67	1.09	1.35	4.68	5.52
10시	1.05	1.35	0.56	0.67	1.08	1.37	7.34	8.13
11시	1.08	1.38	0.57	0.67	1.09	1.39	16.12	21.10
12시	1.12	1.43	0.64	0.76	1.12	1.40	13.89	18.99
13시	1.15	1.43	0.65	0.75	1.16	1.39	13.99	19.02
14시	1.18	1.43	0.61	0.68	1.14	1.43	16.06	21.08
15시	1.11	1.36	0.60	0.68	1.11	1.36	7.48	8.24
16시	1.12	1.35	0.60	0.67	1.12	1.35	4.44	5.32

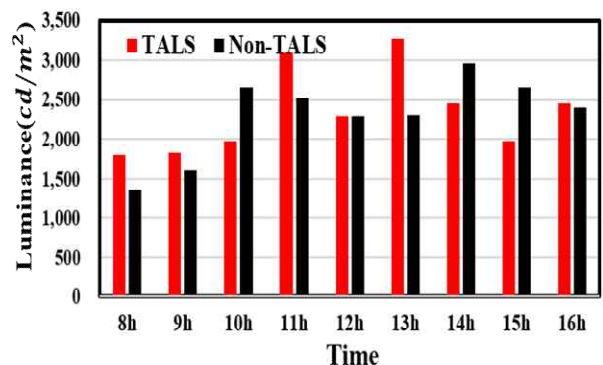
3.3.5 실내 창면 휘도

실내 창면 휘도 시뮬레이션은 재실자의 눈높이에서 격자 형태의 개구부가 있는 창문면을 촬영했고, TALS가 설치된 위치의 바로 아래 창문을 휘도평가 대상으로 선정하였다. 외주부는 직사일광이 직접적으로 입사되는 청천공 상태가 담천공 상태에 비해 높은 수치가 나타났고, 청천공에 비해 담천공 주광 조건에서 TALS 적용 시 실내 창면 휘도가 더 낮게 나타났다. 그림 3.18 - 3.19와 표 3.47 - 3.50에 창면 휘도 시뮬레이션 결과를 정리하였다. 담천공 조건에서 TALS 적용 시 춘분(1.42%)과 추분(4.71%)에 실내 창면 휘도가 낮아지고, 하지(1.78%)와 동지(6.73%)에 실내 창면 휘도가 높아졌다. 담천공 조건에서 춘분과 하지에 실내 창면 휘도 기준 $2,000 \text{ cd/m}^2$ 를 상회하는 결과가 기록되었지만, 재실자가 업무공간을 비우는 시간(점심시간)에 집중되었고 근무시간(오전, 오후)에는 TALS 설치 시 실내 창면 휘도가 낮게 분석되었다(평균 $1,772 \text{ cd/m}^2$, 최대 $2,642 \text{ cd/m}^2$).

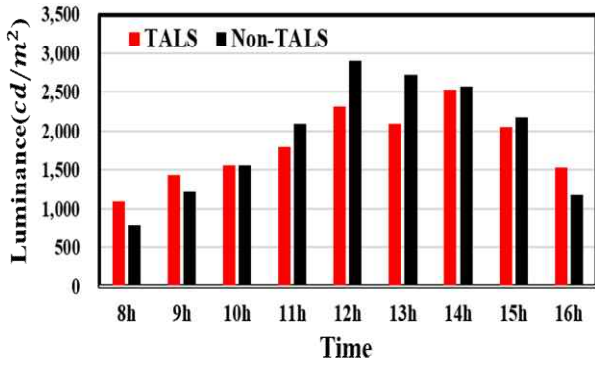
청천공 조건에서 TALS 적용 시, 춘분(0.40%), 하지(1.02%)에 실내 창면 휘도가 낮아졌고, 추분(0.35%), 동지(0.24%)에 실내 창면 휘도가 증가했다. 담천공에 비해 청천공에서 실내 창면 휘도 수치가 미약하게 낮아지지만, 직사일광이 강한 하지에 가장 효과가 큰 것으로 나타났다. TALS 적용 시, 외주부 직사 일광 차단 효과가 있는 것으로 나타났고, 창면 Glare는 모든 조건에서 발생하지 않는다.



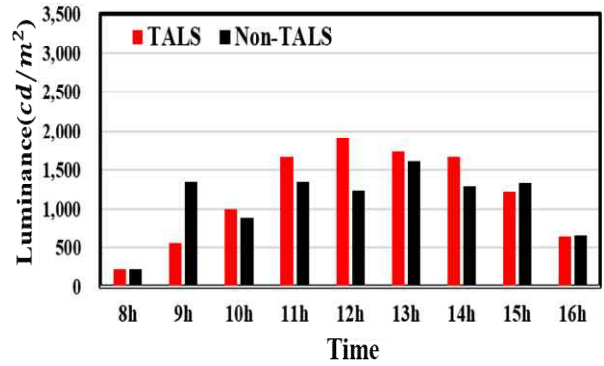
(a) 춘분(3.21)



(b) 하지(6.21)

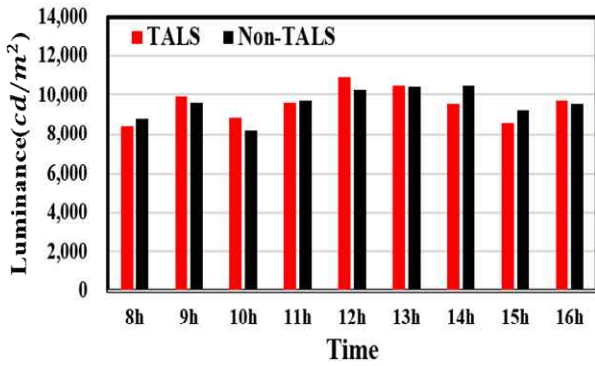


(c) 추분(9.23)

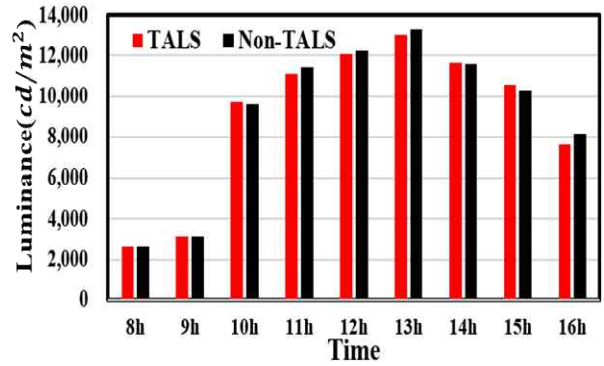


(d) 동지(12.22)

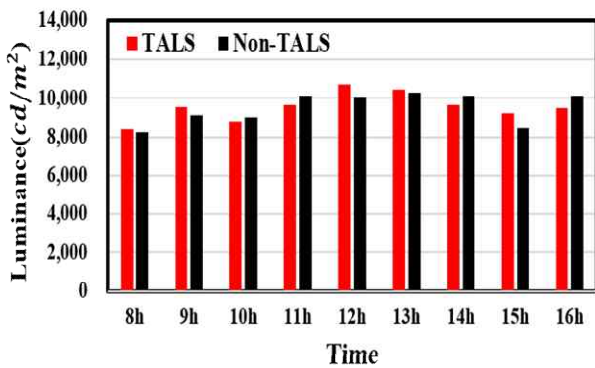
[그림 3.18] TALS 적용 유무에 따른 실내 창면 휘도(담천공)



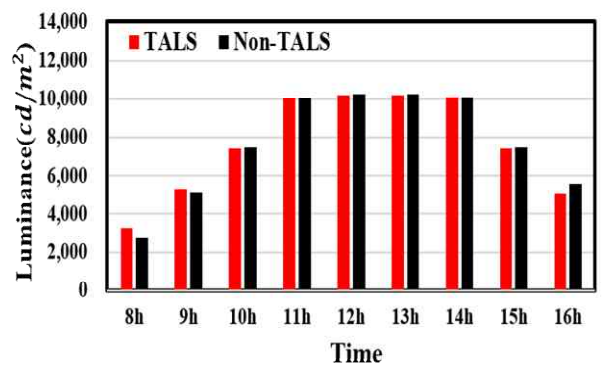
(a) 춘분(3.21)



(b) 하지(6.21)















(c) 추분(9.23)















(d) 동지(12.22)

[그림 3.19] TALS 적용 유무에 따른 실내 창면 휘도(청천공)













<표 3.47> TALS 적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(담천공)

시기	TALS 적용		
	9시	12시	15시
춘분	 $1,168 \text{ cd/m}^2$	 $2,642 \text{ cd/m}^2$	 $1,907 \text{ cd/m}^2$
하지	 $1,822 \text{ cd/m}^2$	 $2,286 \text{ cd/m}^2$	 $1,967 \text{ cd/m}^2$
추분	 $1,430 \text{ cd/m}^2$	 $2,311 \text{ cd/m}^2$	 $2,051 \text{ cd/m}^2$
동지	 560 cd/m^2	 $1,909 \text{ cd/m}^2$	 $1,222 \text{ cd/m}^2$











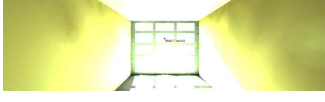

<표 3.48> TALS 미적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(담천공)

시기	TALS 미적용		
	9시	12시	15시
춘분	 $1,649 \text{ cd/m}^2$	 $2,137 \text{ cd/m}^2$	 $2,238 \text{ cd/m}^2$
하지	 $1,605 \text{ cd/m}^2$	 $2,290 \text{ cd/m}^2$	 $2,658 \text{ cd/m}^2$
추분	 $1,217 \text{ cd/m}^2$	 $2,901 \text{ cd/m}^2$	 $2,177 \text{ cd/m}^2$
동지	 $1,358 \text{ cd/m}^2$	 $1,228 \text{ cd/m}^2$	 $1,342 \text{ cd/m}^2$

<표 3.49> TALS 적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(청천공)

시기	TALS 적용		
	9시	12시	15시
춘분	 9,904 cd/m^2	 10,916 cd/m^2	 8,584 cd/m^2
하지	 3,093 cd/m^2	 12,090 cd/m^2	 10,549 cd/m^2
추분	 9,532 cd/m^2	 10,693 cd/m^2	 9,189 cd/m^2
동지	 5,328 cd/m^2	 10,228 cd/m^2	 7,422 cd/m^2

<표 3.50> TALS 미적용에 따른 실내 창면휘도 시뮬레이션 결과 상세(청천공)

시기	TALS 미적용		
	9시	12시	15시
춘분	 9,611 cd/m^2	 10,306 cd/m^2	 9,211 cd/m^2
하지	 3,089 cd/m^2	 12,238 cd/m^2	 10,298 cd/m^2
추분	 9,092 cd/m^2	 10,088 cd/m^2	 8,462 cd/m^2
동지	 5,085 cd/m^2	 10,233 cd/m^2	 7,473 cd/m^2

3.4 소결

본 장에서는 제안된 복사냉난방 복합형 광선반 시스템(TALS)의 실내 빛환경 개선 효과를 검증하기 위하여 C대학 Test bed 실증 실험과 시뮬레이션을 수행하였다. 실증 실험은 TALS 적용 유무에 따른 결과를 비교하기 위해 동일한 실내환경을 구현한 2개의 Test room을 구축하고 동지, 춘분, 하지에 실험되었다. 빛환경 평가요소는 실내조도, 실내 균제도, 평균 주광률, 창면 휘도이며 계절별로 비교 분석하였다. 시뮬레이션은 실증 실험과 동일한 실내환경을 구현하여 평가되었고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실내조도 실험 결과, TALS는 실내 외주부에 유입되는 직사 일광을 차단하는 가림막 역할을 하고 반사면을 통해 주광을 실내 안쪽으로 반사하여 내주부 조도 절대량을 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 실내공간 균제도(조도분포)를 개선하여 밝은 실내공간을 확보하고, 쾌적한 빛환경을 조성하는 것을 확인하였다. 평균 주광률 및 휘도 실험 결과, TALS는 실내 중앙과 내주부로 들어오는 빛의 절대량을 증가시켜 모든 시간대에 주광률이 높게 나타났다. 창면 휘도는 TALS 적용으로 평균 5.23 %가 감소하고, 동지에 창면 볼래글레어 제어 효과가 있는 것으로 나타났다.

2) 시뮬레이션 결과, 모든 계절과 천공조건에서 TALS가 적용된 Test room의 실내 조도가 낮게 나타났지만, 실험 결과와 유사하게 외주부 조도를 감소하고 내주부 조도를 증가하여 실내 균제도를 개선하는 것을 확인하였다. TALS는 실내로 유입되는 광량을 감소하여 평균 주광률이 낮지만, 직사 일광 차단으로 창면 휘도 제어 효과가 있는 것으로 나타났다.

3) 광선반은 개구부를 통해 유입되는 직접광을 차단하여 실내 한 부분을 그늘지게 하여 전통적인 창에 비해 실내 유입 주광량을 감소시키지만, 실내 조도분포를 더욱 균일하게 하여 재실자에게 쾌적한 시환경을 제공하는 것으로 검증되었다. 또한, 비교적 직광이 많은 청천공조건에서 TALS 채광성능이 더 높게 나타나 직사광선이 많은 기상 조건과 기후 환경에서 적용 효과가 더 우수할 것으로 기대된다.

4) 본 장에서는 TALS 적용 유무에 따른 빛환경을 평가하여 자연채광 성능을 개선하고 더불어 쾌적한 시환경을 조성할 수 있는 친환경건축물 설계 요소로 의미가 있는 것을 증명하였다. 본 장의 결과를 통해 친환경건축물 구현에 필요한 패시브 요소와 액티브 요소를 결합한 설비요소로서의 의미가 있으며, 추후 더 효과적인 복사냉난방 복합형 광선반 시스템 개발을 위한 기초자료로 활용이 가능하다.

5) 제안된 TALS는 광선반 본연의 기능을 수행하여 빛환경 평가 요소를 개선하고 시각적으로 안정적인 실내환경을 조성하는 것으로 증명되었다. 하지만, 연구결과가 소규모 사무실 건축물로 한정되어 실제 평가결과를 적용하는데 한계가 있어, 재실자 및 사무실 이용조건 그리고 대규모 사무공간 적용과 같은 다양한 평가에 대한 지속적인 연구가 수행될 필요가 있다.

제4장 TALS 적용에 따른 열환경 평가

본 4장에서는 TALS 복사냉난방 효과 및 온열 쾌적감을 실험과 모니터링을 통해 평가한다. 겨울철 복사난방과 여름철 복사냉방 효과를 검증하기 위해 실험 대표일을 설정하고 Reference room과 Test room을 동일한 환경과 조건에서 실험하였다. 먼저, 실내 수직 및 실내 수평 온도 분포를 모니터링하여 복사냉난방의 효과로 변화하는 실내 열환경을 분석한다. 또한, 수직 온도차 및 수직온도차에 의한 불쾌적 비율(PD) 관측으로 온열 불쾌감을 분석하고, 예상온열감 모니터링으로 재실자가 느끼는 온열 환경을 비교 분석한다. 그리고 전산유체역학 기반의 실내 온열환경 평가 시뮬레이션 기법을 통해 TALS 시스템의 난방 및 냉방 성능을 평가한다.

4.1 열환경 성능평가 지표

열환경은 쾌적한 실내환경을 구성하는 요소로 난방, 냉방, 환기로 실내에 열을 공급하거나 제거하여 사용자에게 적절한 열감을 느끼게 하는 개념이다. 사람은 하루의 약 80 % 이상의 시간을 주택 및 사무실과 같은 실내공간에서 생활하기 때문에 적절한 실내환경을 조성하는 것은 업무 효율성 증가와 신체 건강 유지를 위해 매우 중요하다^[117-118]. 열환경 평가는 사람이 느끼는 온도, 습도, 기류, 복사와 같은 물리적 환경을 분석하는 방법과 실내에 거주하는 재실자의 쾌적감을 분석하는 방법이 있다. 나아가 쾌적한 온열 환경 조성으로 개선되는 에너지 소비 및 온실가스 배출 저감과 같은 연구가 다양하게 진행되고 있다. 열환경 평가지표는 표 4.1와 같이 분류된다^[119]. 연구의 대상인 사무실 공간은 업무시간에 재실자가 상시 거주하여 사람이 느끼는 쾌적감이 매우 중요하다. 쾌적감에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 온열 환경과 공기 환경이다^[120]. 열환경 쾌적감은 물리적 요소와 인적 요소가 있고, 물리적 요소는 공기 온도, 평균복사온도, 기류 속도, 습도가 있고, 인적 요소는 착의량, 대사량, 나이, 성별, 환경 순응이 있다^[121].

<표 4.1> 열환경 평가지표 분류

종류		평가지표
물리적 지표		건구온도, 상대습도, 기류속도, 복사, 습구온도, 흑구온도
생리적 지표		4시간 후 발한예측 지수, 피부습윤도, 열 스트레스 지수
열평형 지표		작용온도, 습작용온도, 표준작용온도, 평균복사온도, 표준신유효온도
주관적 지표	등온 감각	유효온도, 신유효온도, 수정유효온도, 등온지표
	쾌적 감각	불쾌지수, 예상온열감, 예상불만족률

본 연구에서 개발된 TALS 열환경 개선 효과를 평가하기 위해 물리 지표를 이용하여 온열 환경을 비교 분석한다. 또한, 재실자에게 미치는 실내 쾌적감을 평가하는 요소로, 열적 성총화에 의한 불쾌적성을 평가하는 수직온도차 지표와 수직온도차에 의한 불쾌적 비율(PD), 예상온열감(PMV)을 평가한다.

(1) 실내온도

건축물 실내공간의 온도는 실외에서 실내로 들어오는 일사 부하(열전도, 열대류 등)와 실내에서 발생하는 부하(사람, 기계 작동 등)가 합해져 변화한다. 재실자 쾌적감 분석을 위해 부하에 영향을 미치는 요소를 분석하여 적절한 실내온도를 유지하는 공조 제어는 매우 중요하다. 우리나라는 건축물의 에너지 절약 설계기준 설명서 ‘냉난방설비의 용량계산을 위한 실내 온습도 기준’을 정하고 시행 중이다. 사무실 용도의 실내온도 기준은 표 4.2와 같고, 난방 온도 20 °C, 냉방 온도 26 °C이다^[122]. 외국의 경우 표 4.3과 같이 최적 실내온도 기준을 따른다.

<표 4.2> 실내 온습도 기준(한국)

실내공간	냉방		난방	
	건구온도(°C)	상대습도(%)	건구온도(°C)	상대습도(%)
사무실	26	50	20	40
상업시설	25	50~55	20	40
공공시설	25	50~55	20	-
식당	25	50~60	20	-
주방	28	60	18	-

<표 4.3> 최적 실내온도 기준(외국)

Standards	Summer (°C)	Winter (°C)
ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 (USA) ^[123]	23.0 - 26.0	20.0 - 23.5
ISO 10211: 2007 (Europe) ^[124]	23.0 - 26.0	20.0 - 24.0

<표 4.4> 열환경 평가 지표 및 쾌적 category 구분^[125]

Category	General Comfort		Local discomfort	
	PPD(%)	PMV	PD(%)	수직온도차(°C)
A	< 6	-0.2 - +0.2	< 3	< 2
B	< 10	-0.5 - +0.5	< 5	< 3
C	< 15	-0.7 - +0.7	< 10	< 4

(2) 예상온열감

예상온열감(PMV, Predicted Mean Vote)은 P. Ole. Fanger(1970)에 제안된 객관적 쾌적도 지표이고 재실자와 주위 환경 간의 열평형으로부터 재실자에 대한 정상 상태 모델을 이론적으로 개발한 열환경 지표이며 ISO 7730으로 제정되어 활용되고 있다^[129]. PMV는 온열 환경 요소(기온, 습도, 기류, 속도, 평균 복사온도, 재실자 활동량, 의복 착의량)를 산정하여 재실자의 온열감을 이론적으로 평가하는 지표이다. PMV 온열 범위는 7단계인 -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3으로 나타내고 음수의 범위는 추운 공간을 나타내고, 양수의 범위는 더운 공간을 의미한다. 사람이 느끼는 쾌적한 실내환경의 기준은 -0.5부터 +0.5에 해당하며, 쾌적 범위 Category A, Category B로 규정한다^[123, 125]. 또한, EN-16798-1 (2019)는 PMV 카테고리 네 번째 범주를 추가하여 실내 환경질을 평가한다^[130]. PMV는 다양한 분야와 환경에 적용되며^[131-133], 측정결과와 정합성과 정확성을 높이는 세분화된 방법에 대해 꾸준히 연구되고 있다^[134-6].

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \cdot [(M - W) - 3.05 \times 10^{-3}] \cdot \{5733 - 6.99(M - W) - Pa\} - 0.42 \{(M - W) - 58.15\} - 1.7 \times 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - Pa) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - ta) + 3.96 \times 10^{-8} \cdot fel \cdot \{(tel + 273)^4 - (tr + 273)^4\} - fel \cdot hel \cdot (tel - ta) \quad (17)$$

$$tel = 35.7 - 0.028(M - W) - Iel \cdot 3.96 \times 10^{-8} \cdot fel \cdot \{(tel + 273)^4 - (tr + 273)^4\} - fel \cdot hel \cdot (tel - ta) \quad (18)$$

$$he = 2.38(tel - ta)^{0.25} \text{ for } 2.38(tel - ta)^{0.25} \geq 12.1\sqrt{V_{ar}} \\ = 12.1\sqrt{V_{ar}} \text{ for } 2.38(tel - ta)^{0.25} \leq 12.1\sqrt{V_{ar}} \quad (19)$$

$$fel = 1.00 + 1.29 \cdot Ie \text{ for } Iel \leq 0.078 m^2 \cdot ^\circ C / W \\ = 1.05 + 0.645 \cdot Ie \text{ for } Iel > 0.078 m^2 \cdot ^\circ C / W \quad (20)$$

- M : 체표면적당 신진대사량 [$1met=58.2 W/m^2$]
- W : 외부일 [W/m^2]
- fel : 의복 면적비
- tcl : 의복의 표면온도 [$^\circ C$]
- Pa : 수증기 분압 [Pa]

(3) 국부적 불쾌적 평가

겨울철 외부의 찬 공기가 개구부를 통해 들어오거나 외피의 열전도로 벽면의 온도가 낮아지면서, 실내 외주부의 공기는 차가워지고 비중이 커져 바닥면에 밀집된다. 국부적으로 발생한 차가운 공기는 재실자에게 열적 불쾌감을 유발하고 체감온도를 낮추는 냉각 현상을 유발한다.

콜드 드래프트의 주요 원인은 큰 기류 속도, 불균일한 온도분포, 낮은 습도, 외주부 벽면의 낮은 온도, 극간풍 등이 있다. 드래프트 대안으로는 팬 코일 유닛과 라디에이터를 이용해 외주부 공기 온도를 상승시키거나 수직 온도 차이를 줄일 수 있는 공조시스템 운용 및 건물 외피 단열 확보와 같은 방법이 있다^[126-128]. 최근에 지어지는 공동주택은 콜드 드래프트를 막기 위해 창가측 바닥난방 배관 간격을 좁게 시공하여 쾌적한 열환경 확보에 다양한 방법이 사용된다. 본 연구에서는 광선반에 복사냉난방이 가능한 기능을 적용하여 외주부에 따뜻한 열원 및 차가운 열원을 공급하여 재실자 쾌적감 확보와 냉·난방에너지 부하 저감 효과를 검증한다.

수직 온도차는 열적 성층화에 의한 불쾌적을 평가하는 지표로, 사무실 재실자 평가 기준은 앉은 자세의 머리 높이와 발목 높이 온도 차로 산출한다(EN 7726, ASHRAE standard 55, 앉은 자세의 머리 높이: 1,100 mm, 발목 높이: 100 mm). 쾌적 범위는 Category A < 2 °C, Category B < 3 °C, Category C < 4 °C로 나뉘고 수직 온도차가 클수록 불쾌적이 나타난다. 수직 온도차에 의한 불쾌적 비율(PD)는 식(1)과 같이 연산하고, ISO 7730에 의거하여 수직 온도차 < 3 %인 경우, 쾌적 수준을 Category A로 구분하고 있다(표 4.4).

$$PD = 100 / [1 + \exp(5.76 - 0.856 \Delta T_{a,v})] [\%] \quad (21)$$

$\Delta T_{a,v}$: 수직 온도차(착석 시: 1,100 mm 온도 - 100 mm 온도)

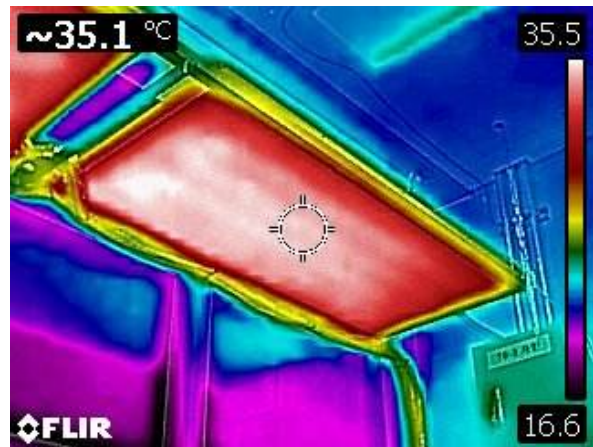
4.2 Test bed 열환경 실험

4.2.1 실험 개요

본 연구에서 개발한 TALS의 열환경 성능평가를 위해 C대학 Test bed에 Reference room과 Test room을 실제 규모 사무실 환경으로 구현하고 열환경 실험을 실시하였다. 그림 4.1은 겨울철과 여름철에 TALS 복사냉난방 기능을 활성화하여 광선반 하부면의 표면 온도가 높아지고 낮아진 모습이다. TALS는 열을 직접 전달하는 직접 냉난방 방식으로 자연 대류복사 방식의 방열특성이 있다. 열환경 실험은 TALS가 설치된 Test room과 TALS가 설치되지 않은 Reference room에 동일한 액티브 설비 시스템과 패시브 요소로 구성했고, 실험을 위한 관측 장비들을 동일하게 설치하였다. Test room에는 TALS 냉·난방복사열 순환을 위한 펌프와 배관이 추가로 적용되었다.



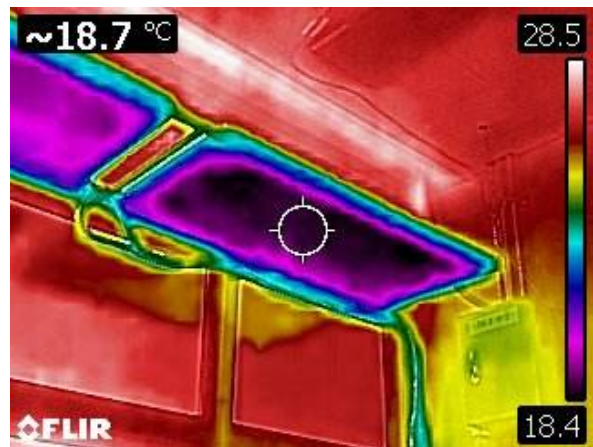
(a) TALS - 겨울



(b) TALS 열화상 - 겨울



(c) TALS - 여름



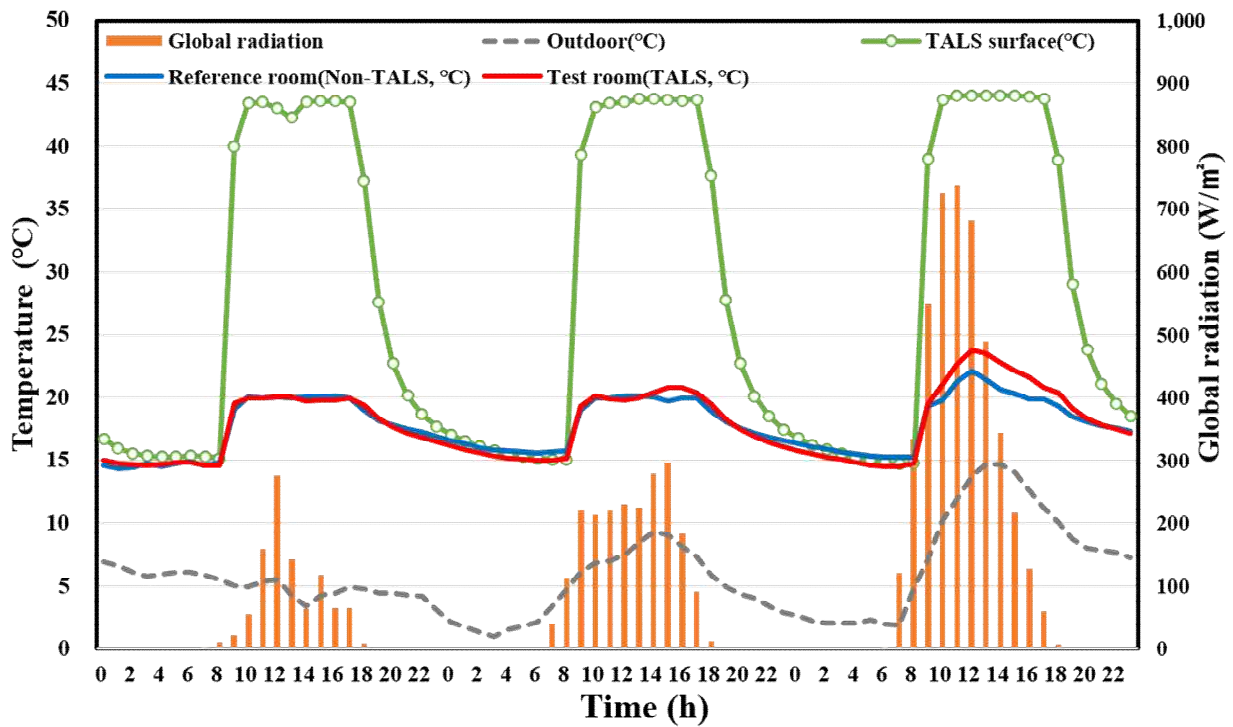
(d) TALS 열화상 - 여름

[그림 4.1] TALS 열환경 실험(Test bed)

열환경 실험은 겨울철과 여름철에 수행되었고, 열환경 평가 분석 요소는 실내 수직 온도 분포 특성, 수평 온도 분포 특성, 수직 온도차와 PD, 예상온열감이다. 열환경 평가는 TALS 설치 유무에 따른 실내 환경을 비교 분석하는 것으로 Reference room과 Test room을 동일한 실내 환경과 실험 조건으로 복사냉난방 효과를 정량적으로 평가하였다.

겨울철은 실외온도가 실내온도보다 낮아 건물 구조체를 통해 열손실이 많이 발생한다^[137]. 겨울철 실험은 3월 19일부터 3월 21일까지 3일간 진행되었다. 동절기 기간 동안 TALS와 FCU에 공급되는 온수의 온도는 45 °C이다. FCU는 실내 정중앙에 설치된 온도센서의 검출 온도에 따라 난방을 제어하여 겨울철 실내 목표 온도 20 °C를 일정하게 유지하였다. 실험은 오전 9시부터 오후 6시까지 사무실 재실 스케줄에 맞춰 실험되었다. 광선반에 공급되는 온수는 기존 FCU에 연결된 온수 공급관을 분개하여 공급되고, 광선반에 연결되는 배관의 거리 때문에 열손실이 발생하여 45 °C보다 약간 낮은 것으로 나타났다.

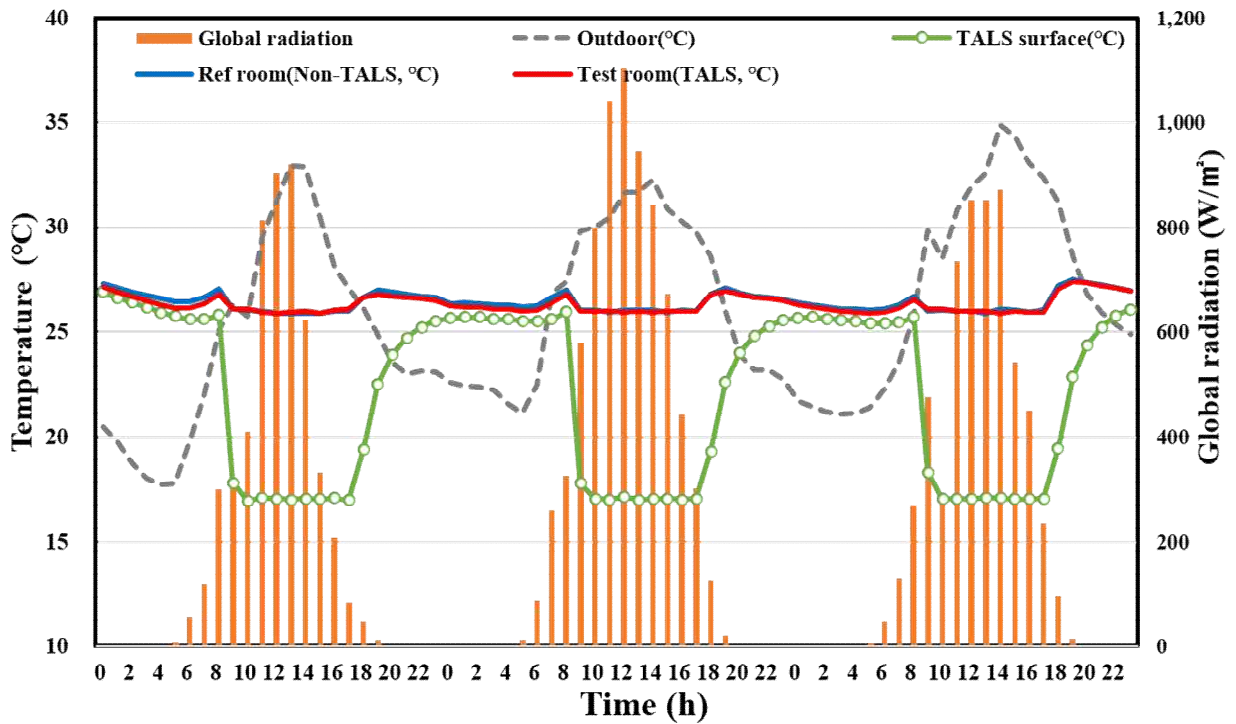
겨울철 열환경 실험은 3월 19일부터 21일까지 수행되었고 19일과 20일은 담천공과 부분담천공의 천공상태와 낮은 실외온도(0.99 °C)의 영향으로 TALS 복사난방과 FCU 공조 난방이 작동하여 열환경과 에너지 소비분석을 위한 대표일로서의 의미가 있다(그림 4.2). 하지만, 21일은 청천공의 천공상태와 높은 외기온도(15 °C)가 발생하여 실내로 유입되는 일사량과 복사열이 증가해 난방 목표 온도 20 °C를 초과하는 실내온도가 나타나 FCU 공조 난방이 미작동하였다. 따라서, Reference room의 FCU 공조 난방과 Test room의 TALS 시스템 복사난방 FCU 공조 난방이 동시에 가동되는 20일을 겨울을 대표하는 실험일로 설정하였다.



[그림 4.2] 겨울철(난방) 실험 환경

그림 4.2는 3일간 연속 측정된 실내·외 온열환경과 빛환경을 나타내었다. 연두색 선은 TALS 복사난방을 위해 공급되는 열원의 온도이고 사무실 재실시간인 9시부터 18시까지 약 44 °C가 관측되었다. 냉난방 자동제어 시스템에서 설정된 난방 열원 공급온도는 45 °C이지만, 배관 열손실이 일어난 것으로 보인다. 빨간색 선은 TALS가 설치된 Test room의 실내온도를 나타내고 파란색 선은 Non-TALS의 Reference room의 실내온도이다. 회색의 점선은 외기온도 변화를 나타내며 최저 온도는 0.99 °C로 관측 중간날에 기록되었다. 주황색의 막대그래프는 전천공 일사량을 정리하였다. 21일은 일사량이 매우 크게 발생하여 실내·외 온도가 실험 조건을 상회하는 결과가 관측되었다.

그림 4.3은 여름철 실험이 수행된 3일간의 실내·외 온열환경과 빛환경을 나타내었다. 여름철 목표 실내온도는 26 °C로 설정하였고, 열원은 15 °C로 사무실 재실 시간(오전9시 - 오후6시)에 공급되었다(배관 열손실로 인해 온도 상승). 여름철 온열환경 평가는 전천공 일사량이 가장 큰 중간날을 실험일로 지정하여 결과를 정리하였다.

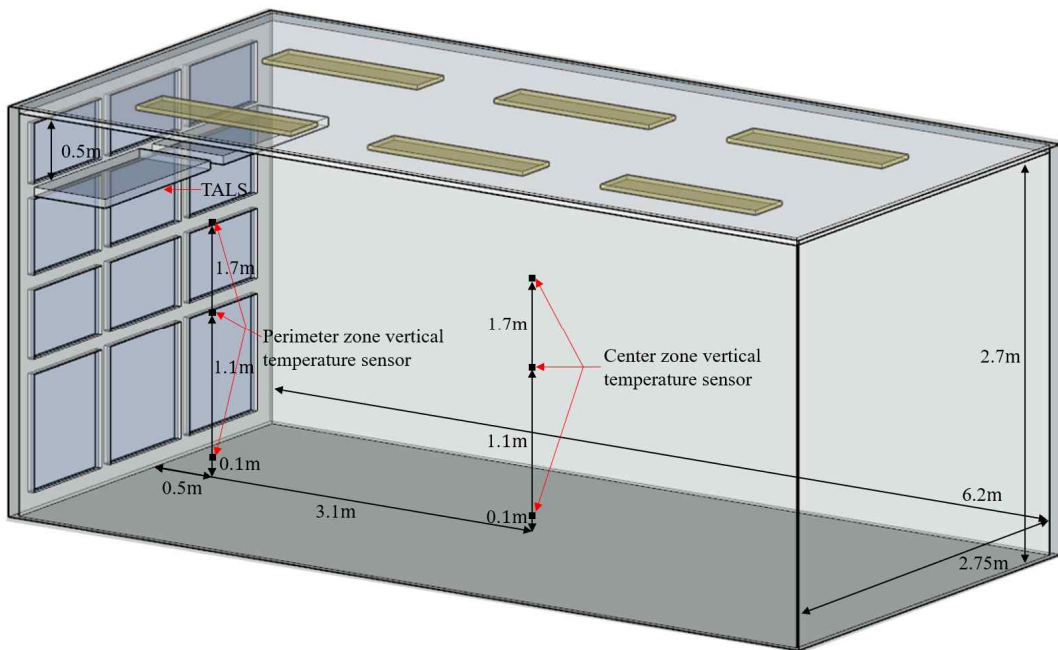


[그림 4.3] 여름철(냉방) 실험 환경

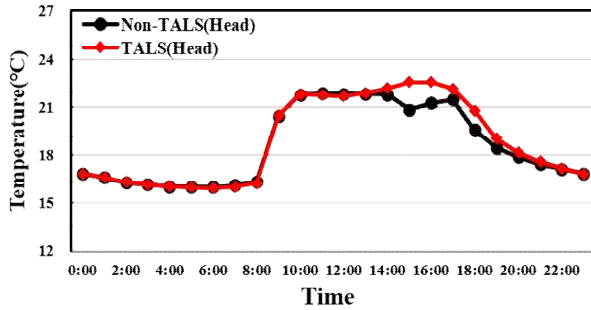
4.2.2 실내 수직 온도 분포 특성

(1) 겨울철 수직 온도 측정결과

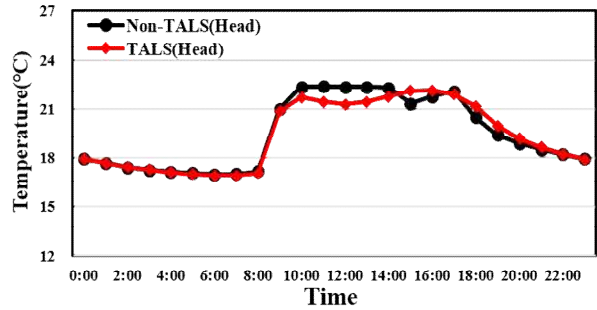
실내 수직 온도 분포 모니터링 개요는 그림 4.4에 정리하였고, TALS는 남쪽 창문 면 높이 2,100 mm에 설치하였다. 가동시간에 따른 외주부와 실내 중앙의 수직 높이별(Head 1,700 mm, Torso 1,100 mm, Ankle 100 mm) 온도 분포 측정결과를 그림 4.5에 정리하였다. 수직 온도 분포곡선은 겨울철 실내 온도환경(그림 4.2)과 매우 유사한 분포를 보인다. 겨울철 외주부의 온도는 일사 유입 영향보다 창면을 통한 열손실이 더 크게 발생해 TALS가 작동하지 않는 시간을 비교하면 실내 중앙에 비해 실내 수직 온도가 전반적으로 낮게 나타나는 경향이 있다. 하지만, TALS 가동시간에는 온수공급과 복사난방으로 15시에 최대 1.76 °C가 증가하는 것으로 나타났(그림 4.5 - 4.6). 실내 중앙의 경우, 15시에 최대 0.8 °C가 증가하여 TALS 시스템 적용으로 인한 난방 효과를 충분히 거둘 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이것은 일사 영향과 TALS 난방열 복사로 실내의 데워진 공기가 상승기류를 만들어 나타나는 현상으로 머리 높이 관측지점에서 온도 차이가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 반면 실내 중앙은 일사열의 영향이 적고, 실내 대류 현상으로 온도 편차가 외주부에 비해 적은 것을 알 수 있다.



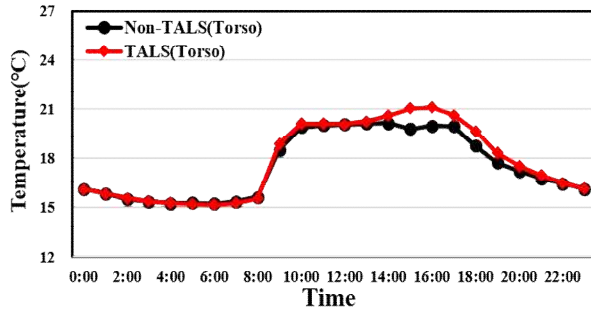
[그림 4.4] 수직 온도차 및 불쾌적 비율 모니터링



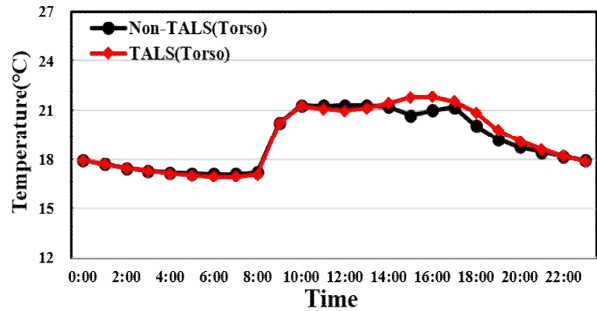
(a) Perimeter zone - Head



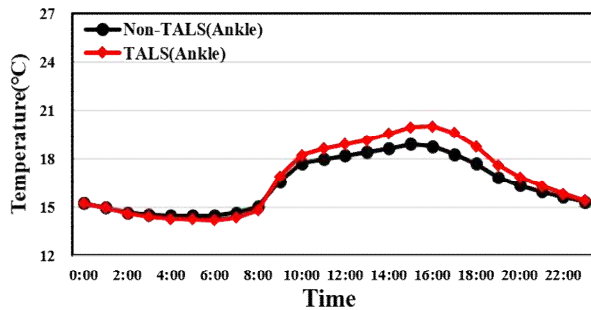
(b) Center zone - Head



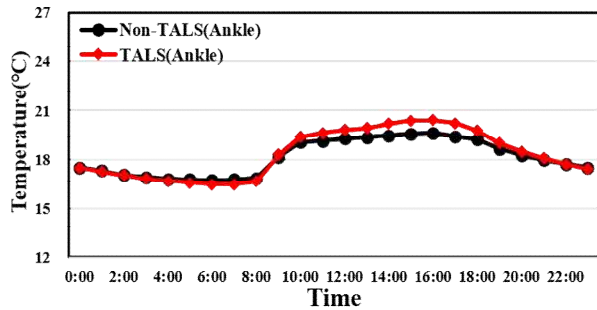
(c) Perimeter zone - Torso



(d) Center zone - Torso



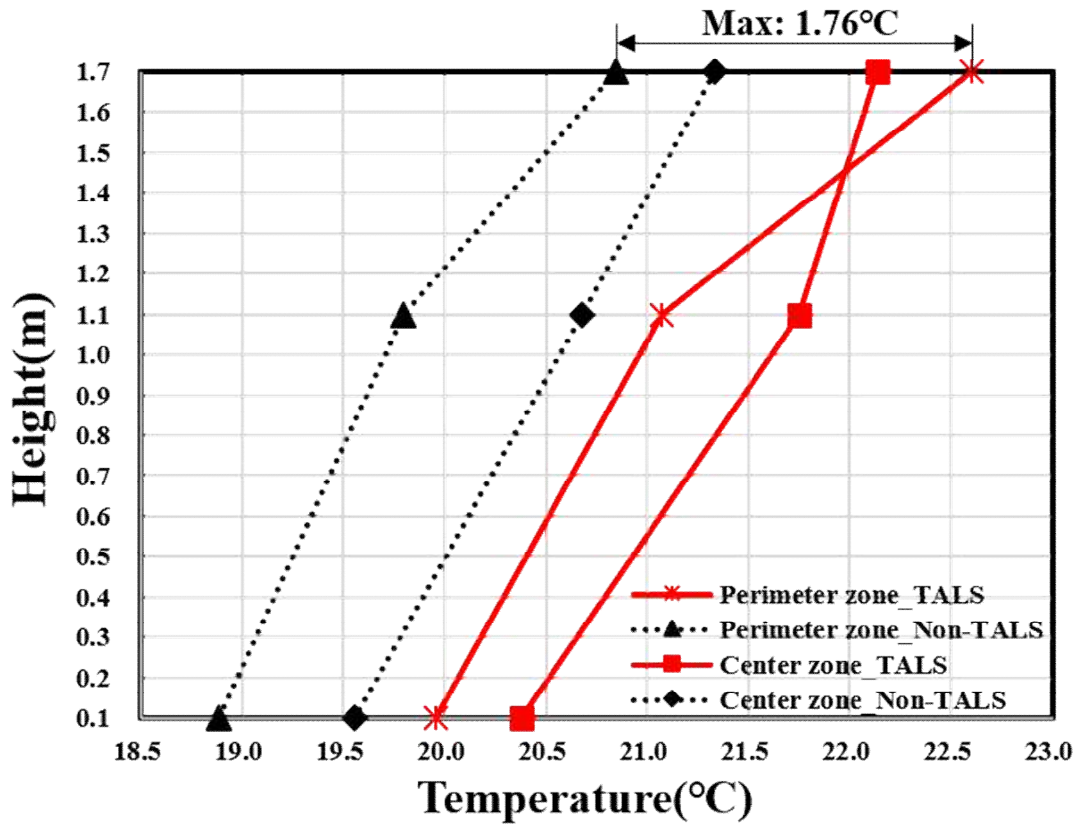
(e) Perimeter zone - Ankle



(f) Center zone - Ankle

[그림 4.5] 겨울철 수직 높이별 온도 분포곡선

실내 열손실과 온도 저하 경향이 뚜렷한 외주부 머리 높이 온도의 경우, TALS가 작동하지 않는 시간대(0시 - 8시, 18시 - 24시)는 최소 15.94 °C로 나타났고, TALS 작동 시간대(9시 - 18시)는 최대 22.6 °C로 측정되어, 약 6.66 °C 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 반면, 실내 중앙 머리 높이 온도의 경우, TALS 미가동 시간대는 최소 16.92 °C, 가동 시간대에는 최대 22.17 °C가 측정되어, 약 5.24 °C 온도가 상승하였다. 이는 열손실이 많은 외주부에 TALS 설치할 때, 실내 열환경을 제어하고 향상하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

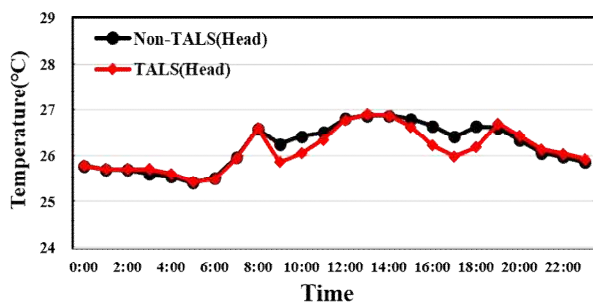


[그림 4.6] 수직 온도 분포(15시)

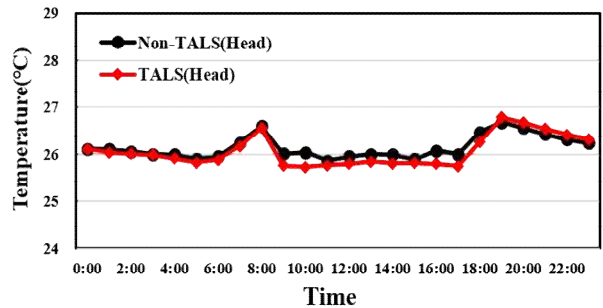
TALS 복사난방열은 실내 기류를 이동시키고 열을 확산시켜 실내 전체적으로 온도를 상승시키는 효과가 있다. 그림 4.6를 보면, Head 높이에서 가장 큰 온도 상승이 나타났고, Torso 높이와 Ankle 높이 또한 TALS 적용으로 외주부와 실내 중앙 모두에서 온도가 상승하는 것으로 나타났다. Head 높이의 경우 TALS 난방복사열이 공기 밀도차에 의해 천장으로 주로 상승하기 때문에 가장 큰 온도차가 나타난 것으로 보인다. 반면, Ankle 높이 온도는 복사난방열 확산 영향이 크지 않기 때문에 온도 상승이 적은 것으로 나타난다. 본 연구에서 제안한 TALS를 적용할 때, 복사난방 효과를 최적화할 수 있는 적절한 설치 높이에 대한 추가 실험 및 고찰이 필요하다.

(2) 여름철 수직 온도 측정결과

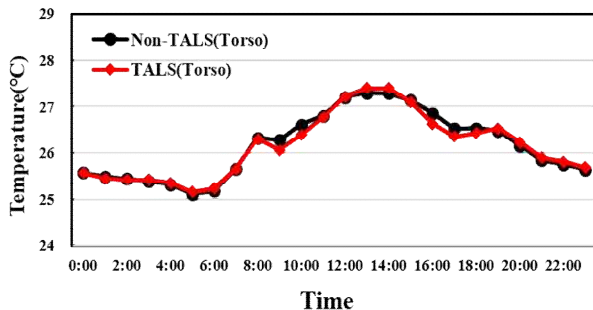
여름철 외주부 수직 온도 분포는 TALS 복사냉방으로 인해 머리, 가슴, 발목 높이에서 전반적으로 Non-TALS에 비해 낮은 온도가 관측되었다. 정오를 기준으로 발목 높이에서 온도가 역전되는 현상은 온도를 관측하는 센서에 직접적으로 일사열이 간섭한 것으로 나타났다. 실내 중앙의 경우 TALS가 설치된 실험실의 수직 온도가 더 낮게 관측되었고, 발목 높이에서 14시에 약 0.92 °C 온도 차이가 발생하였다. 여름철은 겨울철과 상반된 결과로, 복사냉방은 무거운 공기 밀도의 영향으로 실내 바닥면으로 차가운 기류를 형성하고 발목 높이 온도를 감소시켜, 여름철 실내온도를 감소시키고 쾌적성을 증가시키는 것으로 분석되었다.



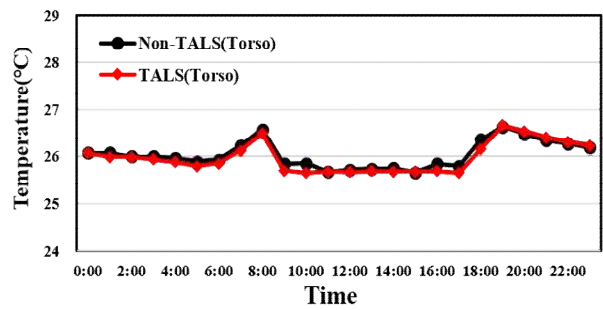
(a) Perimeter zone - Head



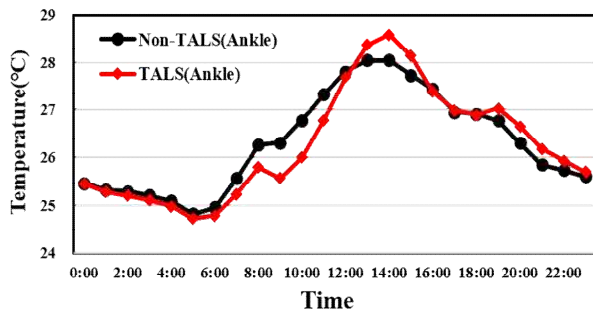
(b) Center zone - Head



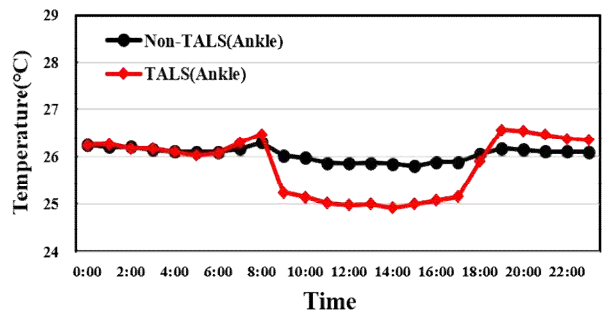
(c) Perimeter zone - Torso



(d) Center zone - Torso



(e) Perimeter zone - Ankle



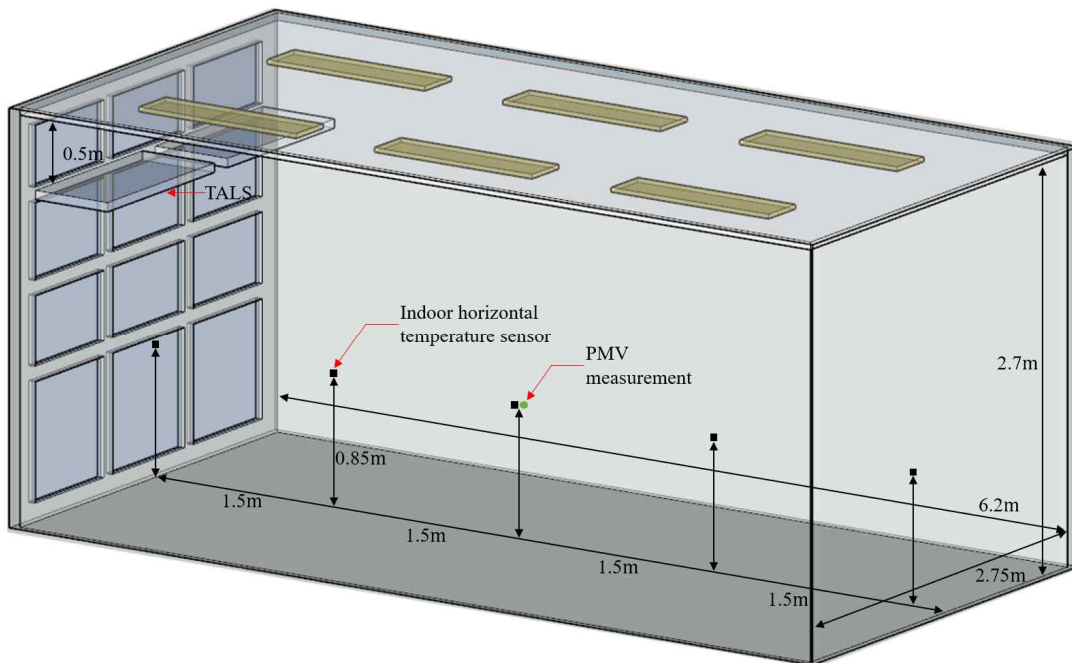
(f) Center zone - Ankle

[그림 4.7] 여름철 수직 높이별 온도 분포곡선

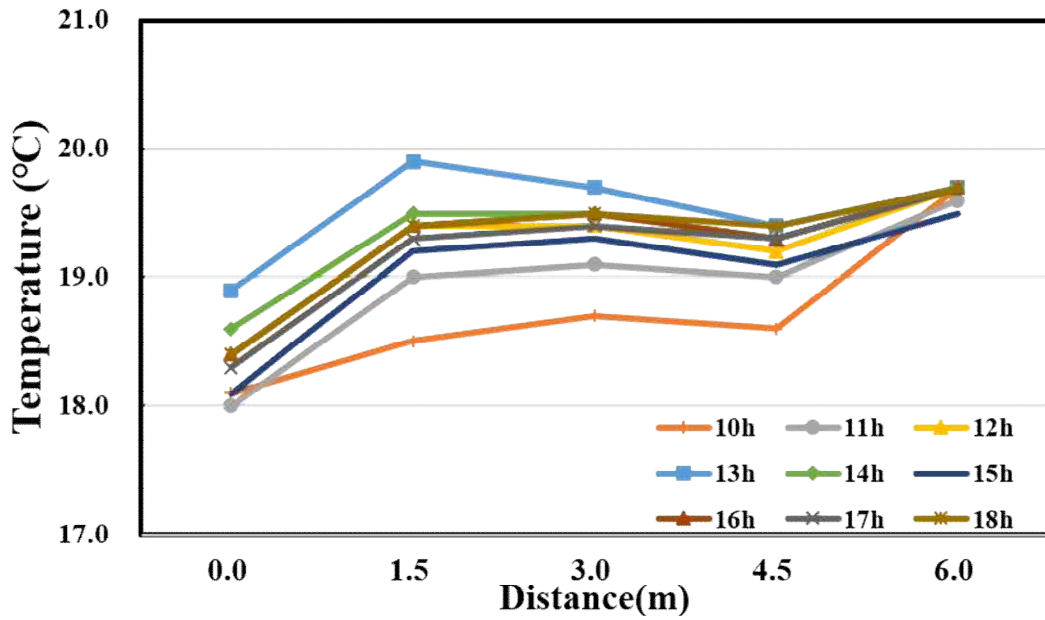
4.2.3 수평 온도

(1) 겨울철 수평 온도 측정결과

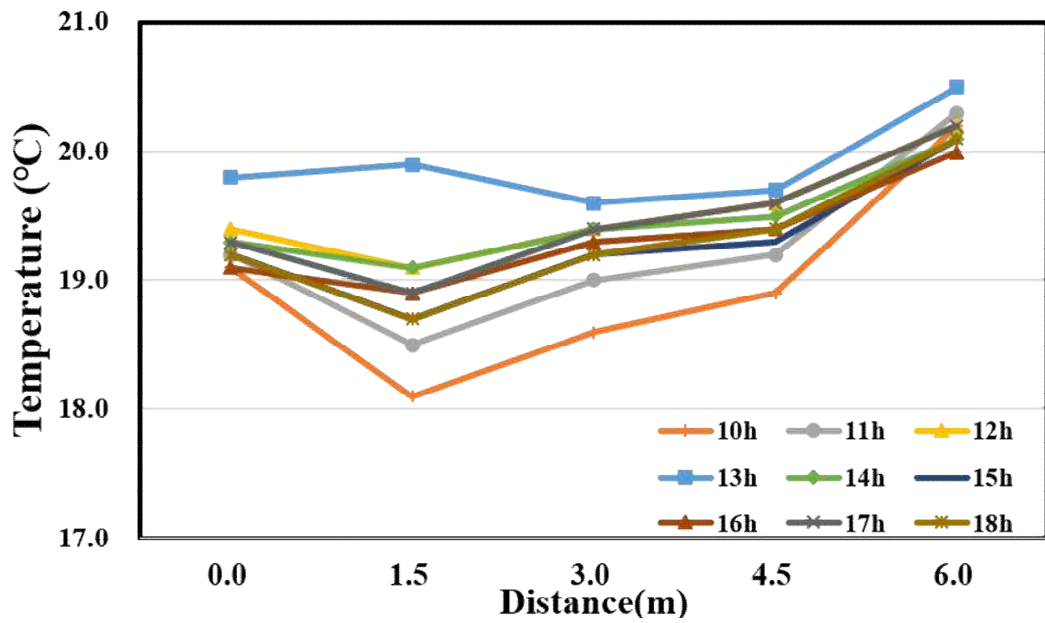
그림 4.9 - 4.10는 창면으로부터의 거리에 따른 작업면 높이의 실내 수평 온도 분포를 나타내며 그림 4.8은 수평 온도 분포 모니터링을 설명한다. 수평 온도 분포의 측정은 오전 10시부터 18시까지 모니터링하였다. 9시 측정 데이터는 TALS 복사난방이 시작되는 시점으로, 복사난방을 통한 수평 온도 비교에 적합하지 않아 본 논문의 분석에서는 제외하였다. Test room의 수평 온도 분포는 18 °C에서 20 °C 사이에서 큰 편차 없이 실내온도가 일정하게 유지되고 있는 것을 확인할 수 있다. 반면, Reference room은 Test room에 비해 온도 편차가 크고 20 °C 이상 온도가 내주부에서 발생하여 국부적인 열환경 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. TALS 복사난방열이 실내 기류를 상승하고 이동시켜 실내 전체적으로 균일한 온도환경을 만들어 실 전체의 수평 온도 분포의 관점에서 균일하게 난방 효과를 갖는 것으로 검증되었다.



[그림 4.8] 수평 온도분포 모니터링



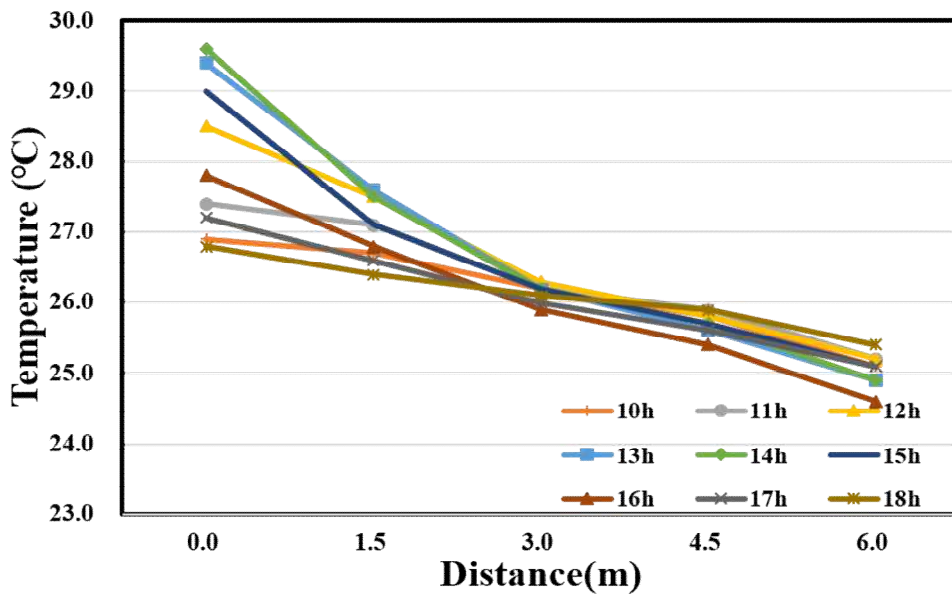
[그림 4.9] 창면으로부터 거리에 따른 겨울 실내 수평 온도 분포(Test room)



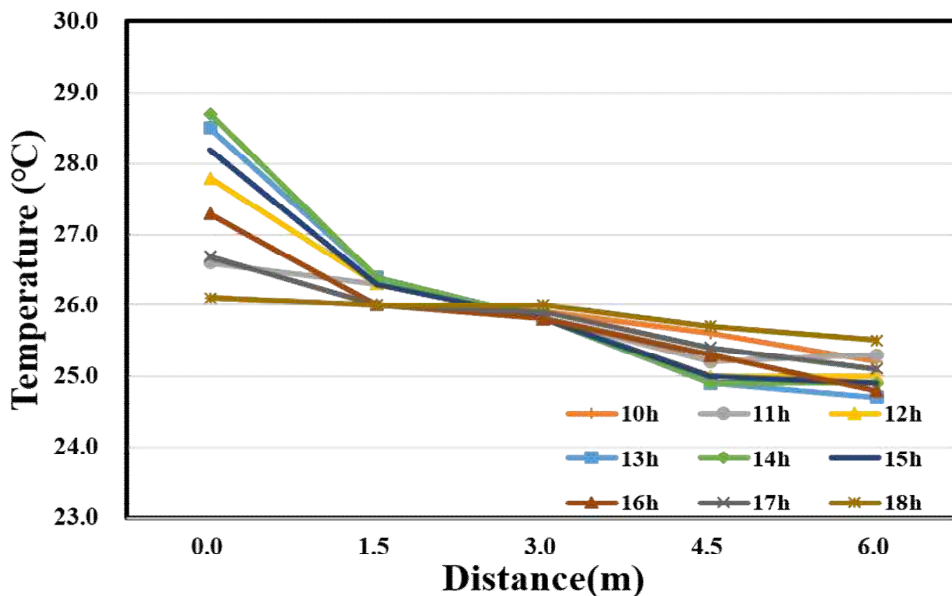
[그림 4.10] 창면으로부터 거리에 따른 겨울 실내 수평 온도 분포(Reference room)

(2) 여름철 수평 온도 측정결과

그림 4.11 - 4.12는 여름철 창면으로부터의 거리에 따른 작업면 높이의 실내 수평 온도 분포를 나타내었다. 여름철은 외주부에 일사열이 집중적으로 발생하는데, TALS가 설치된 Test room은 복사냉방으로 외주부 온도를 감소시키고 Reference room에 비해 수평 온도 편차가 작고 안정적인 실내 기류와 실내온도를 유지하는 것으로 나타났다.



[그림 4.11] 창면으로부터 거리에 따른 여름 실내 수평 온도 분포(Test room)



[그림 4.12] 창면으로부터 거리에 따른 여름 실내 수평 온도 분포(Reference room)

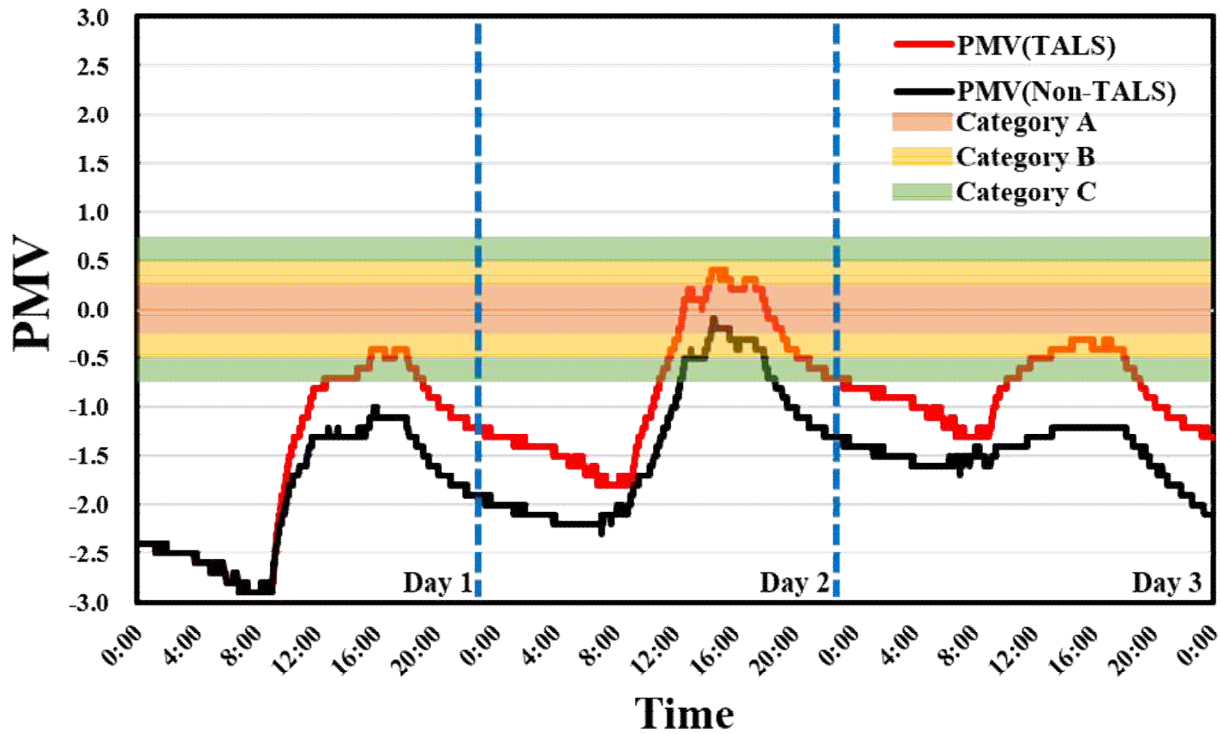
4.2.4 예상온열감

예상온열감은 사람이 느끼는 실내 온열 환경을 정량화한 것으로 건구온도, 평균 복사온도, 기류, 습도, 신진대사량, 의복 착의량 등을 종합적으로 고려한 물리적 온열 반응을 이론적으로 나타낸 것이다. 본 연구에서 개발한 TALS의 복사난방 효과를 평가하기 위해 ISO 7730 “Ergonomics of the thermal environment”와 ASHRAE Standard 55 “Thermal Environmental conditions for Human Occupancy”를 참고하여 실험 환경을 조성하고 쾌적 범위 결과를 산출하였다. 예상온열감 분류 범위는 -3(Cold), -2(Cool), -1(Slightly cool), 0(Neutral), +1(Slightly warm), +2(Warm), +3(Hot)이다. PMV 물리량은 0에 가까울수록 쾌적한 실내환경을 나타내며, 그 중 -0.5부터 +0.5 사이의 물리량을 쾌적한 실내환경으로 규정한다. 실내 쾌적 범위는 세부적으로 A, B, C로 분류하는데, $-0.2 < \text{Category A} < +0.2$, $-0.5 < \text{Category B} < +0.5$, $-0.7 < \text{Category C} < +0.7$ 의 평가지표가 있다. PMV 측정의 신진대사량은 1.0met 기준인 58.2 W/m^2 , 의복 착의량은 일반적인 평상복 기준인 1.2(clo)로 설정하였다.

(1) 겨울철 PMV 측정결과

난방을 통한 열환경을 평가하기 위해 Test room과 Reference room을 대상으로 겨울철 외기온도 10 °C 이하인 3월 11일부터 0시부터 3일간 실내 PMV를 측정하고 측정 데이터를 도식화하여 그림 4.13에 나타내었다. 난방은 사무실 업무시간인 오전 9시부터 18시까지 실내온도 20 °C 설정 조건으로 실험되었다.

실내 중앙의 작업면 높이에서 측정된 PMV 결과, Test room의 예상온열감은 그림 4.13와 같이 전체적으로 -2.9에서 +0.4의 지표 값을 가지며, Reference room의 예상온열감은 -2.9에서 -0.1의 지표 값을 보인다. TALS 복사난방이 되는 Test room은 사무실 재실 시간 동안 Category A, B에 해당하는 범위를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 그에 반해, 공조 난방만 되는 Reference room은 추위를 느낄 정도의 불쾌적인 온열 환경이 Day 1과 Day 3에 관측되었다. 두 실험 공간은 난방이 시작되기 전에는 불쾌적 영역으로 모니터링 되었지만, TALS 복사난방과 공조 난방이 시작되면서 쾌적한 실내 열환경이 조성되고 PMV 수치가 0에 가까워진다.



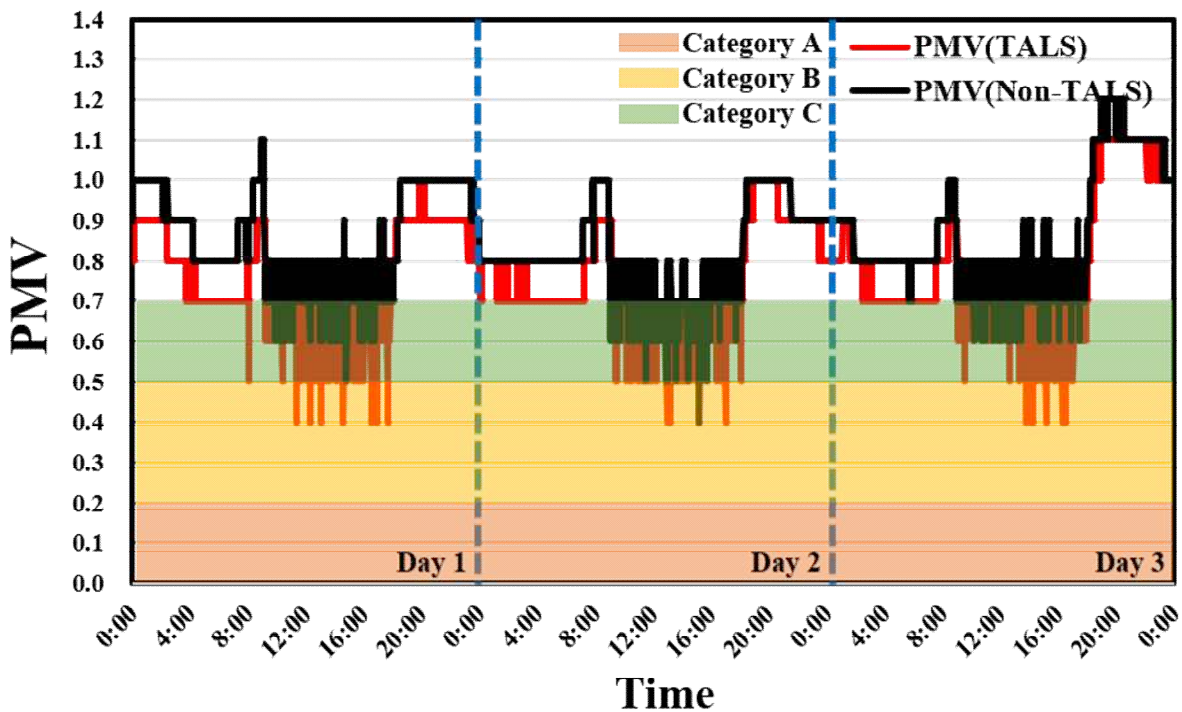
[그림 4.13] 겨울철 난방 시 PMV 결과

3일간 측정된 PMV Category A, B를 세부적으로 비교하면, Test room은 18시간 28분 동안 쾌적 영역으로 나타났고 Reference room은 5시간 25분간 쾌적 영역으로 산출되었다. TALS 복사난방으로 쾌적 범위가 유지되는 시간이 약 3.4배 증가하였다. 또한, 가장 쾌적한 Category A 쾌적 구간이 유지되는 시간을 보면 Reference room은 1시간 16분, Test room은 4시간 42분간 지속되어 약 3.7배 시간 동안 쾌적 범위가 더 많이 나타난다. 이것은 복사냉난방 복합형 광선반의 복사난방이 실내에 거주하는 재실자에게 열적 쾌적감을 향상하는 효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

(2) 여름철 PMV 측정결과

냉방을 통한 열환경을 평가하기 위해 Test room과 Reference room을 대상으로 여름철(하지) 실외온도가 30℃ 이상 나타난 3일간 실내 PMV를 측정하고 결과를 그림 4.14에 정리하였다. 냉방은 연구대상 사무실 재실시간인 오전 9시부터 18시까지 실내온도 26℃ 조건으로 실험되었다.

PMV 측정 결과, Test room의 예상온열감은 +0.4에서 +1.1의 지표 값을 보이며, Reference room은 +0.4에서 +1.2의 물리량이 산출되었다. TALS가 설치된 Test room은 광선반 복사냉방과 공조냉방이 이루어지는 실험 공간으로 Non-TALS에 비해 여름철 사람이 느끼는 온열 쾌적감을 증가시키고 시원한 실내를 유지하는 것으로 나타났다. 쾌적 범위 Category B는 노란색 영역으로 TALS는 1시간 33분 동안 유지되었고, Non-TALS는 12분 동안 나타나 약 7.8배 시간 동안 쾌적 영역이 오래 유지되었다. 쾌적 범위 Category C의 경우 TALS는 38시간 20분, Non-TALS는 14시간 53분 지속된 것으로 분석되었다. 쾌적 범위는 냉방으로 실내온도가 제어되는 시간(재실 시간, 9시 - 18시)에 개선되는 것을 확인하였고, 복사냉난방 복합형 광선반이 실내 온열환경을 개선하여 쾌적한 실내환경을 유지하는 것으로 검증되었다.



[그림 4.14] 여름철 냉방 시 PMV 결과

4.2.5 국부적 불쾌적 관측결과

본 연구에서 개발된 복사냉난방 광선반 시스템은 외주부에 설치되어 열환경을 개선하는 목적으로 개발되었는데, 앞 절의 외주부에 설치된 TALS가 국부적인 기류를 발생시키거나 불균등 복사를 유발할 가능성을 평가하기 위해 수직 온도차와 PD를 평가지표로 선정하였다. 모니터링은 동지, 춘분에 수행되었고, 사무실 재실 시간 및 공조 운영시간인 오전 9시부터 오후 6시까지 진행되었다. 수직 온도차는 실내 공간의 열적 성층화에 의한 불쾌적을 평가하는 물리 지표로, 사무실 용도의 공간은 재실자가 앉아있을 때 가슴높이와 발목 높이 온도차로 산출하였다. 국부적 불쾌감 평가는 ISO 7730 “Ergonomics of the thermal environment”에 명시된 기준으로 비교해 TALS의 실내 열 분포 특성을 분석하였다.

(1) 동지 관측결과

동지의 수직 온도분포, 수직 온도차 데이터 및 수직 온도차에 의한 불쾌적 비율(PD) 결과를 표 4.5과 표 4.7에 정리하였다. 동지의 경우, 난방을 위한 실험의 실내온도가 26℃로 설정되어 절대값이 상대적으로 크지만, Test room과 Reference room의 목표 실내온도를 유지하기 위해 설비시스템이 동일하게 제어되어 결과 비교에 신뢰성이 있다고 할 수 있다. 온열 환경 측정결과 중, 1,100 mm 높이의 온도는 100 mm 높이에 비해 외주부와 실내 중앙에서 모든 시간대에 더 높게 나타났다. 이것은 TALS 복사열 자연대류로 인해 가슴 높이의 온도가 더 큰 폭으로 상승한 것이고, 그에 비해 발목 높이 온도는 약한 대류와 개구부의 열손실의 영향으로 복사난방 효과가 작은 것으로 나타났다. Test room과 Reference room의 온도분포는 설정 온도인 26 ℃에 가깝게 유지되는 것을 볼 수 있으나, TALS가 설치된 외주부의 온도가 실내 중앙에 비해 더 높게 나타난다.

<표 4.5> 수직 온도 분포(°C) - 동지(12.22)

시간	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm
9시	18.57	17.13	19.43	18.83	18.28	17.55	19.56	18.74
10시	22.41	19.52	22.41	20.39	21.55	20.28	21.51	19.77
11시	24.87	21.58	24.42	21.85	24.21	22.84	23.92	21.36
12시	26.52	23.37	25.89	23.12	25.82	24.64	25.46	22.45
13시	27.93	25.10	27.11	24.81	27.14	26.06	26.54	24.02
14시	28.75	26.40	27.81	24.53	27.94	26.91	27.31	23.82
15시	29.66	27.33	28.69	25.48	27.58	26.72	26.88	23.21
16시	27.73	26.39	26.97	23.82	26.46	25.79	26.20	23.04
17시	24.65	24.31	24.59	22.85	23.23	23.10	23.80	22.28

먼저 외주부 비교 결과, TALS가 설치된 Test room이 Reference room에 비해 수직 온도차가 상대적으로 크게 나타났고, 사람이 느끼는 온열 불쾌감도 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. Test room 외주부에서는 오전 10시부터 15시 사이에 쾌적 수준 Category B와 C가 나타났고, 반면 Reference room 외주부는 쾌적수준 Category A를 만족하며 국부적 불쾌적이 일어나지 않는 것으로 분석되었다. 이것은 TALS 복사난방이 운용될 때, 복사난방의 열에너지가 TALS가 설치된 높이 주변에서만 열이 확산되고 실내 바닥 부분은 복사난방의 영향을 적게 받아 가슴 높이와 발목 높이 온도차가 크게 발생하여 국부적 불쾌감의 원인이 되는 것으로 보인다. 쾌적 수준 Category 분류 기준은 아래의 표 4.6와 같다.

<표 4.6> 수직 온도차(°C) 및 PD(%) 쾌적범위 기준

Category	Local discomfort	
	PD(%)	수직 온도차(°C)
A	< 3	< 2
B	< 5	< 3
C	< 10	< 4

<표 4.7> 수직 온도차(℃) 및 PD(%) - 동지(12.22)

시간	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD
9시	1.44	1.07	0.60	0.52	0.72	0.58	0.82	0.63
10시	2.89*	3.60*	2.02*	1.75	1.27	0.92	1.73	1.37
11시	3.29**	5.00**	2.56*	2.75	1.36	1.00	2.57*	2.76
12시	3.16**	4.49*	2.77*	3.27*	1.19	0.86	3.01**	3.98*
13시	2.83*	3.44*	2.30*	2.21	1.08	0.79	2.52*	2.66
14시	2.35*	2.30	3.28**	4.95*	1.03	0.75	3.49**	5.90**
15시	2.33*	2.27	3.21**	4.68*	0.86	0.65	3.66**	6.75**
16시	1.34	0.98	3.15**	4.46*	0.66	0.55	3.16**	4.50*
17시	0.34	0.42	1.74	1.37	0.13	0.35	1.53	1.15

* 열은 회색은 쾌적수준 Category B : 수직온도차 < 3 ℃, PD < 5 %

** 진한 회색은 쾌적수준 Category C : 수직온도차 < 4 ℃, PD < 10 %

실내 중앙의 경우, 수직온도차 절대량의 차이가 크게 나타나지는 않지만, Test room에 비해 Reference room이 온도차와 불쾌적 수준이 더 높고 국부적 불쾌감 빈도가 많은 것으로 나타났다. 실내 중앙은 실내 전체의 기류가 혼합되어 외주부에 비해 수직 온도차 및 국부적 불쾌감 비교 분석을 위한 대표지점으로서의 의미가 있다. Reference room은 14시와 15시에 국부적 불쾌감 Category C에 해당하는 가장 취약한 열환경이 모니터링되어 사무실 재실자에게 열적 불쾌감을 유발하는 것으로 분석되었다. 반면, TALS가 설치된 Test room의 국부적 불쾌감은 최대 Category B로 산출되어 TALS는 실내 열적 쾌적감을 개선하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

(2) 춘분 관측결과

모니터링된 춘분의 수직 온도 분포, 수직 온도차 데이터 및 수직 온도차에 의한 불쾌적 비율(PD) 결과를 표 4.8 - 4.9에 정리하였다. 춘분 실험은 실내온도를 20℃로 유지하는 조건으로 Test room과 Reference room을 동일한 액티브 설비시스템 통해 제어되었다. 수직 온열 환경 측정결과, 바닥면으로부터 수직 높이 1,100 mm 온도는 수직 높이 100 mm 온도에 비해 모든 시간대에서 더 높게 기록되었다. 앞 절의 동지의 수직 온도 분포와 동일하게 TALS 복사열 자연대류로의 영향으로 가습 높이의 온도가 더 높은 것으로 나타났다.

<표 4.8> 수직 온도 분포(℃) - 춘분(3.21)

시간	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm
9시	18.52	16.01	19.62	18.10	18.52	16.58	20.20	18.17
10시	19.76	17.33	20.65	19.18	19.92	17.73	21.28	19.04
11시	19.75	17.73	20.47	19.44	20.01	17.96	21.24	19.14
12시	19.72	17.99	20.37	19.61	20.08	18.19	21.28	19.26
13시	19.90	18.26	20.52	19.73	20.13	18.39	21.28	19.36
14시	20.24	18.65	20.83	20.01	20.16	18.63	21.18	19.46
15시	20.69	19.07	21.17	20.19	19.80	18.89	20.68	19.55
16시	20.72	19.11	21.21	20.21	20.00	18.75	20.97	19.61
17시	20.28	18.72	20.92	20.03	19.97	18.25	21.16	19.42

<표 4.9> 수직 온도차(℃) 및 PD(%) - 춘분(3.21)

시간	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD
9시	2.50*	2.62	1.52	1.15	1.95	1.64	2.03*	1.76
10시	2.43*	2.46	1.47	1.10	2.19*	2.01	2.24*	2.09
11시	2.01*	1.74	1.03	0.76	2.05*	1.79	2.11*	1.87
12시	1.72	1.36	0.76	0.60	1.89	1.56	2.01*	1.74
13시	1.64	1.26	0.79	0.62	1.74	1.38	1.92	1.60
14시	1.59	1.22	0.81	0.63	1.53	1.15	1.72	1.36
15시	1.62	1.25	0.98	0.72	0.91	0.68	1.12	0.82
16시	1.61	1.24	1.00	0.74	1.25	0.91	1.36	1.00
17시	1.56	1.19	0.89	0.67	1.72	1.35	1.74	1.38

* 열은 회색은 쾌적수준 Category B : 수직온도차 < 3℃, PD < 5 %

** 진한 회색은 쾌적수준 Category C : 수직온도차 < 4℃, PD < 10 %

춘분의 수직 온도차는 오전 9시부터 12시에 Test room은 외주부에서, Reference room은 외주부와 실내 중앙에서 Category B로 나타났다. 그에 반해, TALS 복사난방이 되는 Test room의 실내 중앙은 Category A 쾌적범위를 만족하였다. 실내 중앙 온도는 실내 기류가 혼합된 안정화 데이터로 실내 전체의 온도를 대표한다. 춘분의 국부적 불쾌감은 전 시간대의 실험 조건과 상관없이 Category A에 해당하는 쾌적 범위가 측정되었다. PD의 절대량으로 비교할 경우, 외주부는 TALS로 인해 Test room이 더 크게 나타났고, 실내 중앙은 Reference room이 더 크게 나타났다. 수직온도차 및 PD 물리지표 결과를 보면, TALS 적용으로 사무실 공간의 열환경을 개선하고 사람이 느끼는 온열감을 개선하는 것을 검증하였다.

(3) 하지 관측결과

하지의 열환경 실험 결과를 표 4.10 - 4.11에 나타내었다. 하지의 목표 실내온도는 26 °C를 유지하고 실험군과 대조군은 동일한 설비시스템으로 냉방 제어되며, 실험군인 Test room에는 TALS 복사냉방 조건으로 실험되었다. 하지 실험 결과, TALS는 높이 2.1 m 외주부 창면에 설치되어 냉방 복사열이 실내 바닥으로 하강하는 기류를 형성하여 Reference room에 비해 Test room의 수직높이별 온도 차이 절대량이 더 크게 나타나지만, 쾌적 범위 기준 Category A를 모두 만족하여 여름철 TALS 복사냉방 및 공조 냉방에 의한 수직 온도차 및 수직 온도차에 의한 불쾌적이 발생하지 않고 쾌적한 실내를 유지하는 것으로 분석되었다.

<표 4.10> 수직 온도 분포(°C) - 하지(6.21)

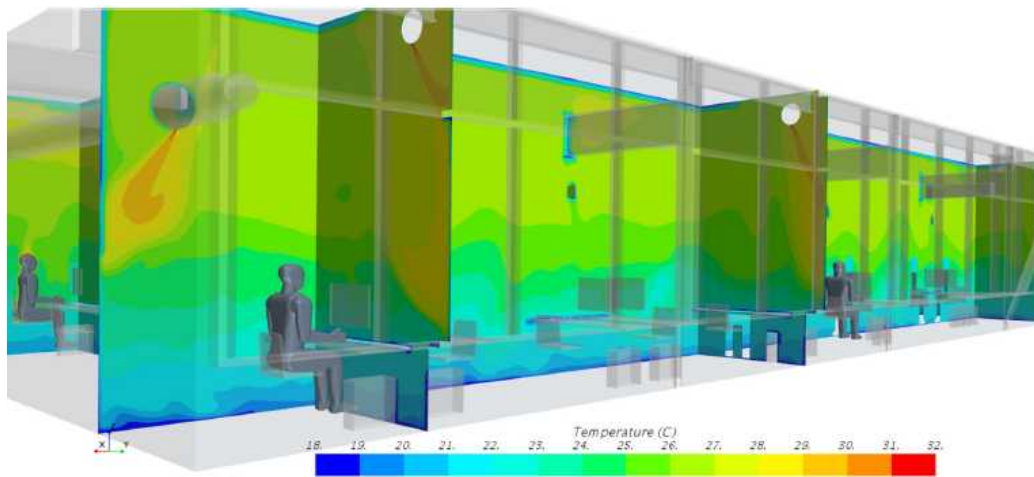
시간	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm
9시	26.07	25.56	25.70	25.24	26.28	26.30	25.85	26.02
10시	26.40	26.00	25.66	25.14	26.61	26.78	25.86	25.97
11시	26.77	26.78	25.69	25.02	26.80	27.32	25.68	25.86
12시	27.23	27.68	25.67	24.98	27.20	27.81	25.73	25.86
13시	27.41	28.37	25.70	25.00	27.30	28.05	25.74	25.86
14시	27.40	28.59	25.69	24.93	27.29	28.05	25.75	25.85
15시	27.10	28.14	25.69	25.01	27.13	27.74	25.67	25.80
16시	26.63	27.38	25.70	25.08	26.87	27.44	25.85	25.89
17시	26.36	26.99	25.66	25.15	26.53	26.96	25.80	25.89

<표 4.11> 수직 온도차(°C) 및 PD(%) - 하지(6.21)

시간	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD
9시	0.51	0.49	0.46	0.47	0.02	0.31	0.17	0.27
10시	0.40	0.44	0.52	0.49	0.17	0.27	0.11	0.29
11시	0.01	0.31	0.67	0.55	0.52	0.20	0.18	0.27
12시	0.46	0.21	0.69	0.57	0.61	0.19	0.13	0.28
13시	0.97	0.14	0.70	0.57	0.75	0.17	0.12	0.28
14시	1.19	0.11	0.76	0.60	0.76	0.16	0.10	0.29
15시	1.05	0.13	0.68	0.56	0.60	0.19	0.13	0.28
16시	0.75	0.16	0.62	0.53	0.58	0.19	0.04	0.30
17시	0.63	0.18	0.50	0.48	0.43	0.23	0.08	0.29

4.3 열환경 시뮬레이션

본 연구에서는 TALS 복사냉난방 기능의 열환경 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위해 컴퓨터를 이용한 수치해석방법(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 사용하여 실내 환경변화 및 물리 변화를 검증한다. TALS 적용 유무에 따른 실내 온도 변화 현상을 확인하여, 겨울철 실내온도 상승효과 및 여름철 실내온도 저감효과를 분석하여 TALS 본연의 복사냉난방 기능을 검증한다. 수치해석 시뮬레이션은 상용 점성 유동 소프트웨어인 Simens사의 Star-CCM+ V15를 활용하였다(그림 4.15). CFD 해석방법은 실험 결과와 상호 보완할 수 있으며, 실증 실험의 물리적인 제약을 해소할 수 있다. 또한, 설계 변수를 쉽게 변경할 수 있어 다양한 정보 획득과 비선형적인 현상을 대처할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 수치해석방법은 복잡한 물리 현상에 대한 모델의 불안정성 및 해석 격자 개수 증가에 따른 수렴 반복 계산의 단점이 있다. 수치해석 프로그램 수행을 위해 수학적 개념(수렴성, 일관성, 안정성) 정립과 유체유동의 물리적 이해와 실험적 경험 그리고 수치 알고리즘에 대한 고찰이 필요하다^[138, 139].



[그림 4.15] Star-CCM+ CFD simulation^[140]

4.3.1 수학적 모델 및 해석방법

TALS 적용으로 실내공간의 유체 흐름, 물질 전달, 열의 이동 등의 현상을 해석하기 위해서는 이러한 현상을 수학적 원리로 나타내야 한다. 다음은 본 연구에서 적용된 수치 모델과 접근방법을 설명한다.

4.3.1.1 물리적 모델 방정식

실내공간의 기류, 어떤 물질의 농도 및 공기 분포를 예측하기 위해서 실내 기류 및 공기의 거동을 구해야 하며, 지배방정식을 해석해야 한다. 지배방정식에는 에너지 전달 방정식, 운동량 방정식, 연속 방정식, 에너지 방정식, 이류 확산 방정식 등이 있으며 표 4.12에 간단한 수식을 정리하였다^[141, 142].

<표 4.12> 물리적 모델 방정식($k-\epsilon$ 모델)

물리적 모델	수식
연속식	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (22)$
운동량 방정식	$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \rho g \delta_{i3} \quad (23)$
난류에너지 k 의 수송 방정식	$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + G_k - \epsilon \quad (24)$
소산율 ϵ 의 수송방정식	$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k + C_{\epsilon 3} G_k - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (25)$
에너지 θ 의 수송방정식	$\frac{\partial(\rho \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \theta)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad (26)$
스칼라 ϕ 의 수송방정식	$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \quad (27)$

4.3.1.2 일사 복사모델

일사 복사모델로는 일반적으로 열의 복사를 해석하는 view-factor 방법을 사용하여 실내공간을 구성하는 각 표면 간에 미치는 영향을 계수로 계산하여 복사에너지를 역추적하는 방법이다. view-factor는 방위각, 태양고도에 따라 변하는 것이 아닌 실내구성 요소의 각 면의 상호관계를 계산하기 때문에 Thermal flux의 변화가 있거나 반사율, 흡수율, 투과율에 변화가 있을 때 연산하는 방법이다. Kirchhoff의 열복사 법칙에 의해 물체의 방사율은 물체의 흡수율과 같으므로 방사율과 반사율, 그리고 투과율의 합은 모든 면요소에서 항상 1이 되도록 설정해야 한다. 식(28)는 물체에 입사하는 태양에너지의 성분을 표시한 것이다^[143,144].

$$\text{입사율}(1) = \text{반사율}(\tau) + \text{투과율}(\rho) + \text{흡수율}(\alpha) \quad (28)$$

또한, Multi-band 복사모델은 태양 복사에너지와 지구 복사에너지의 파장을 고려해야 하지만, 본 연구의 TALS 실험 환경은 단위 건물에서 평가하는 조건으로 평가되어 지구복사에너지의 영향이 매우 작아 실내공간의 각 면 요소들의 변수들을 배제하고 계산하였다. 태양복사에너지는 에너지를 가지고 있는 적외선이 직접 들어오는 것은 Direct solar flux라고 하고, 대기 안의 구름, 먼지 등에 의해서 생기는 에너지 Diffuse solar flux라고 한다. 이 데이터는 위도와 경도에 따라 다르므로 해석 지역의 특징 및 시간에 따라 계산하여 적용하여야 하고, 본 연구에서 일사 모델 계산은 STAR-CCM+ 내의 User code로 적용하여 계산하였다.

4.3.1.3 난류모델

본 연구에서 제안된 TALS 복사냉난방과 FCU 공조냉난방을 통해 실내 온열환경 및 기류 유동에 미치는 영향을 해석하기 위해 난류모델을 고려하였다. 난류를 수치해석으로 직접 계산할 수 있는 경우는 지극히 단순한 경우에 국한되며, 대부분은 컴퓨터 해석을 이용하지만 시간과 용량의 제약이 있다. 따라서 해석을 위해 난류강도인 속도와 크기의 특성으로 난류모델을 도입하여 복잡한 난류 현상을 계산한다. 복잡한 난류 현상을 연산하기 위해 일반적으로 평균 시간 개념이 사용된다. 식(30)와 같은 관계식을 운동량 방정식에 대입하여 전체식에 대한 시간 평균을 취하면 선형항에서는 순간값들이 모두 평균값으로 표현되고 비선형 유동항에서는 난류 변동 변수에 의한 상관 관계식이 나타나는데 이를 Reynolds stress라 한다. 레이놀즈 전단력을 정량화하기 위해 난류 모델은 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 이용하였다. 난류 운동의 속도와 길이를 수송방정식에 주도록 하는 것이 two-equation 이며, 점성에 의해 소멸되는 난류에너지 소산율은 아래 식으로 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{C_D k^{\frac{2}{3}}}{l} \quad (29)$$

k 와 ε 의 수송방정식과 난류점성계수를 아래에 나타내었다.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (30)$$

난류 점성계수 μ_t 는 Prandtl-Kolmogorove 관계식에 의해 단위 질량당의 난류에너지 k 와 k 의 소산율인 ε 으로 나타낸다.

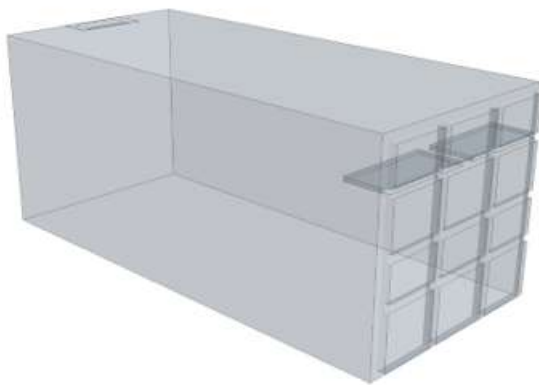
$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (31)$$

위 식의 상수들은 실험 데이터로부터 얻어진 결과를 일반적으로 사용한다.

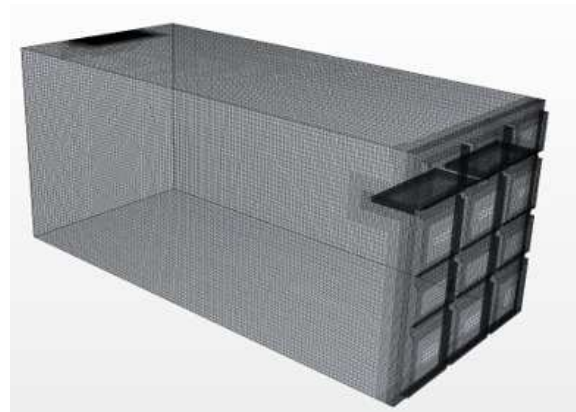
$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 0.9, \sigma_\varepsilon = 1.22$$

4.3.2 시뮬레이션 해석 영역 및 경계조건

CFD 시뮬레이션 해석 영역과 경계조건은 다음과 같다. 시뮬레이션 프로그램은 STAR-CCM+ V15를 사용하였고, Time domain은 Steady state, 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 비압축성 흐름 조건과 Ideal gas model 및 2nd order up-wind scheme를 계획하였다. 그림 4.16는 해석을 위한 3D 모델링과 Mesh형태로 나누어진 실험실 공간의 모습을 나타내었다. TALS가 설치된 Test room 공간의 격자수는 약 180만개로 Trimmed mesh 형태로 이루어져 있다. 대조군인 Non-TALS의 Reference 공간의 격자수는 약간 차이가 있지만 거의 동일하다. Test room의 크기는 2,750 mm(W) × 6,200 mm(L) × 2,700 mm(H)이며, 개구부를 제외한 벽체, 천장, 바닥은 단열이 되는 물성으로 구성하였다. TALS 사이즈는 1,200 mm(L) × 600 mm(W) × 50 mm(H)로 외주부 창면에 바닥으로부터 2,100 mm 높이에 2개가 수평으로 설치되었다. 개구부는 정남향면 격자 형태로 전면 설치되었고, THK26 로이복층유리(5LE+16AR+5LE)로 열관류율은 1.800 W/m^2K 이다.



(a) 3D Modeling



(b) Trimmed mesh

[그림 4.16] Test room(TALS) CFD 수치해석 모델링

유동해석 조건은 다음과 같다. 먼저, TALS 난방 열원공급온도 45 °C, 냉방 열원 공급온도는 15 °C, 유량은 7 LPM으로 사무실 재실시간대(오전 9시 - 오후 6시)에 열원이 공급되는 것으로 가정하였다. 냉난방 복사면 온도의 경우, 광선반 하부 가열면은 35 °C(겨울), 하부 냉각면은 18 °C(여름)이로 설정하였고 반사판의 가시광선 반사율은 95 %이다. FCU는 1Way 형식으로 냉방능력 2,688 kcal/h, 난방 능력

3,910 kcal/h, 표준 풍량: 7 m³/min, 표준 유량: 9 LPM, 소비전력 28 W, 운전 전류 0.12 A이다. FCU는 천장 카세트 슬림형으로 410 mm(W) × 950 mm(L) × 135 mm(H)이며, 디퓨저 크기는 70 mm(W) × 700 mm(L)로 디퓨저 정중앙의 풍속은 3 m/s이다. TALS의 열환경 개선효과를 절기와 시간에 따라 비교 분석하기 위해 Test bed에서 측정한 일사량, 실외온도, 방위각 및 고도(표 4.13 - 14)의 경계 조건을 설정하였다.

<표 4.13> Test bed 일사량 (W/m²)과 실외온도(°C)

시간	춘분		하지		추분		동지	
	일사량	온도	일사량	온도	일사량	온도	일사량	온도
8시	333.62	4.87	572.26	27.74	404.05	21.34	135.33	-0.56
9시	548.22	7.11	760.56	27.80	658.76	23.28	312.82	2.36
10시	725.20	10.20	1,025.75	29.05	681.98	24.52	428.96	5.28
11시	739.23	11.96	1,061.50	30.16	904.80	25.78	537.46	7.73
12시	681.88	13.76	1,065.05	31.43	872.98	26.34	582.25	10.21
13시	489.73	14.65	1,032.08	32.19	926.69	27.08	551.18	11.79
14시	343.86	14.71	985.05	32.55	818.32	27.36	452.64	12.36
15시	216.20	14.02	848.55	32.79	559.26	27.52	307.83	12.42
16시	128.24	12.66	604.66	31.85	332.98	25.97	118.36	11.34
17시	60.31	11.22	414.21	32.22	111.74	24.37	6.82	9.11
18시	7.62	10.08	180.99	33.57	20.53	22.95	0.30	6.35

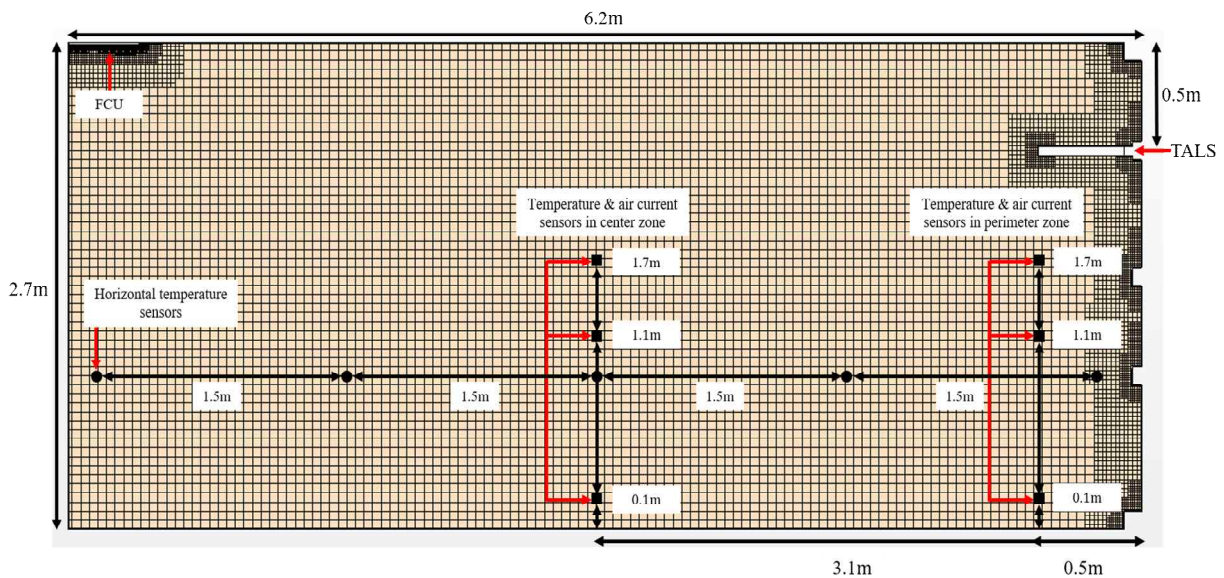
<표 4.14> Test bed 방위각 및 고도(°)

시간	춘분		하지		추분		동지	
	방위각	고도	방위각	고도	방위각	고도	방위각	고도
8시	101	16	81	30	104	19	121	3
9시	111	28	89	42	114	30	131	13
10시	124	38	98	54	128	41	142	21
11시	140	48	113	66	146	49	156	27
12시	163	53	145	76	169	54	171	30
13시	188	54	207	77	195	53	187	31
14시	212	50	243	67	217	48	203	27
15시	230	42	259	56	234	39	216	21
16시	244	31	269	44	247	28	228	13
17시	255	20	277	31	257	17	238	3
18시	264	8	285	19	266	4	246	7

4.3.3 시뮬레이션 해석 결과

4.3.3.1 실내온도 및 기류 속도 분포

TALS 시스템 복사냉난방 효과와 실내 열환경 성능 개선을 평가하기 위해 CFD 수치해석 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 설정 조건은 다음과 같다. 사계절을 대표하는 절기인 춘분, 하지, 추분, 동짓날에 태양고도가 높고 열의 이동이 많은 13시를 기준으로 TALS 적용 유무에 따라 변화하는 실내 열환경을 검토하였다. 춘분, 하지, 추분에는 실내로 유입되는 일사량이 크고 실험실 공간을 구성하는 벽체와 바닥면(재질과 복사열 흡수율 적용)에 열이 축열되는 현상이 발생하여 높은 실내온도가 유지되어 냉방부하가 발생하였고 설정 온도 26 °C로 FCU 공조 냉방과 TALS 복사 냉방이 되었다. 동지에는 설정 온도 20 °C로 FCU 공조 난방과 TALS 복사 난방이 되었다. TALS 복사냉난방의 경우 광선반 하부면의 경계조건을 35 °C(겨울), 18 °C(여름)로 설정하였다. 해석대상 공간에 적용된 일사량은 TALS 설치 유무와 상관없이 일사에 대한 영향은 동일하게 고려하였다. 데이터 모니터링을 위한 측정점 설정은 그림 4.17과 같이 실험과 동일한 외주부와 실내 중앙의 머리 높이, 가슴 높이, 발목 높이로 지정하였고, 실내온도 및 기류 속도 분포 결과를 절기별로 비교 분석하여 TALS의 복사냉난방 효과 검증한다.



[그림 4.17] TALS 적용 유무에 따른 춘분 CFD 해석 결과

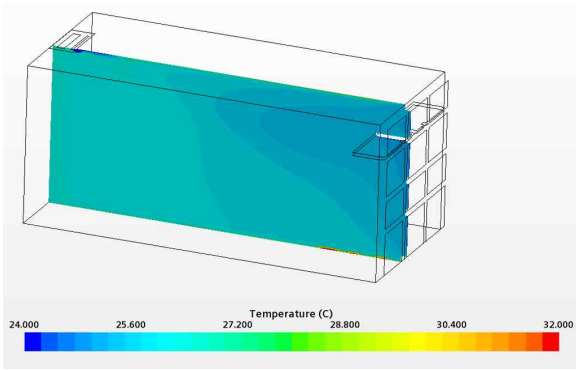
(1) 층분 CFD 수치해석 결과

TALS 적용 유무에 따른 층분의 실내 온열환경 및 기류 변화를 관측하기 위해 다음과 같은 조건을 설정하였다. 해석 기준 시간 13시의 일사량은 489.73 W/m^2 , 실외온도는 $14.65 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며, 방위각 188° , 고도 53° 으로 TALS가 설치된 Test room 과 Non-TALS의 Reference room에 동일하게 경계조건을 설정하였다. 층분에는 일사량과 실내온도의 영향으로 냉방부하가 발생해 FCU 공조 냉방과 TALS 복사냉방 되었다. 수치해석을 통해 계산된 결과는 표 4.15에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 이미지는 실내 폭 중심을 절단한 단면으로 FCU와 TALS의 영향을 모두 고려할 수 있는 경계이며 그림 4.18에 정리하였고, TALS 적용 유무에 따른 실내온도 분포, 속도 분포, Radiation heat flux, Vector 분포를 분석하였다.

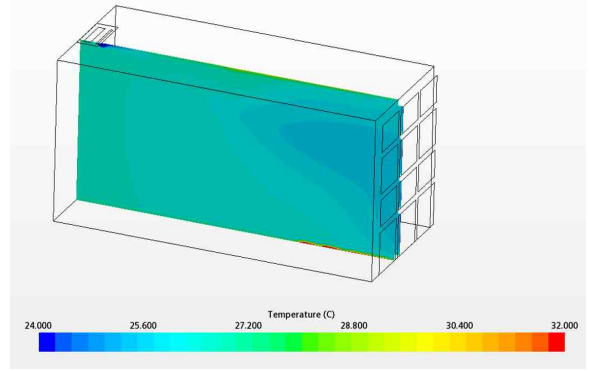
해석결과를 보면, TALS가 설치된 Test room의 실내온도가 더 낮게 나타났는데, 그림 4.18의 (e)와 (f)를 보면, 광선반에 의해 실내로 들어오는 일정 부분의 일사열이 차단되고 공조 냉방과 복사냉방에 의해 Non-TALS의 Reference room의 실내온도가 더 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 0.1 m 발목 높이의 온도가 모든 조건에서 가장 크게 나타나 공조와 TALS 복사냉방의 영향이 바닥면에는 작은 것으로 분석되었다. 기류변화는 FCU의 풍량과 풍속에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었는데 그림 4.18의 (g), (h)에서 대각선 방향으로 와류가 형성된 지점의 풍속이 높았고, TALS 복사냉방에 의한 기류변화는 영향이 없는 것으로 분석되었다.

<표 4.15> 층분 시뮬레이션 결과

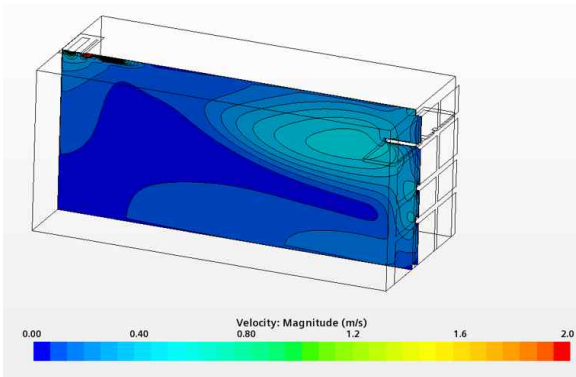
항목		온도($^\circ\text{C}$)		기류 속도(m/s)	
		TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
외주부	1.7m	25.28	25.57	0.42	0.43
	1.1m	25.47	25.67	0.20	0.31
	0.1m	25.71	25.94	0.13	0.14
실내 중앙	1.7m	25.80	26.16	0.35	0.14
	1.1m	26.00	26.32	0.04	0.06
	0.1m	26.02	26.38	0.01	0.11
수평 온도	0.1m	25.32	25.61	0.32	0.29
	1.6m	25.81	26.08	0.03	0.05
	3.1m	25.96	26.30	0.07	0.08
	4.6m	26.10	26.43	0.06	0.08
	6.1m	26.27	26.63	0.06	0.07



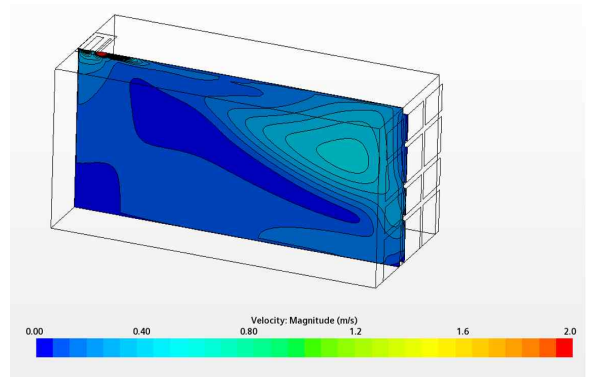
(a) TALS 온도 분포



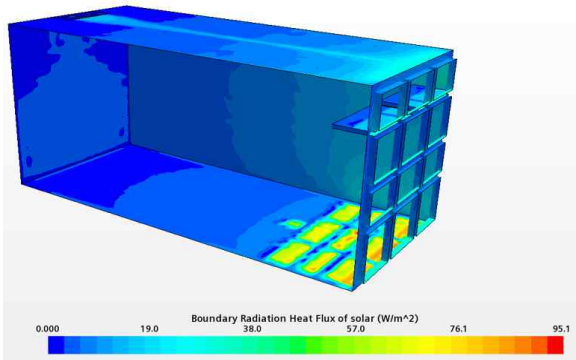
(b) Non-TALS 온도 분포



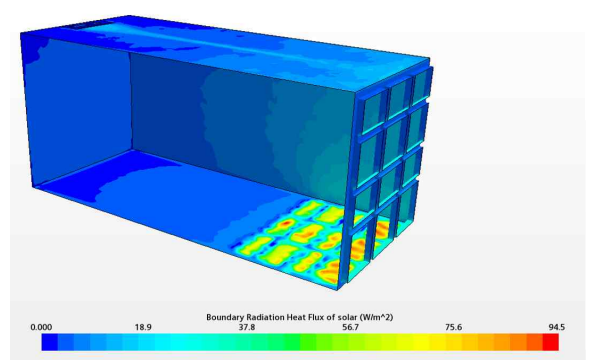
(c) TALS 속도 분포



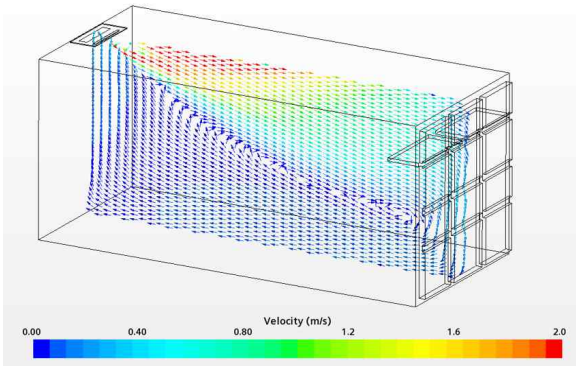
(d) Non-TALS 속도 분포



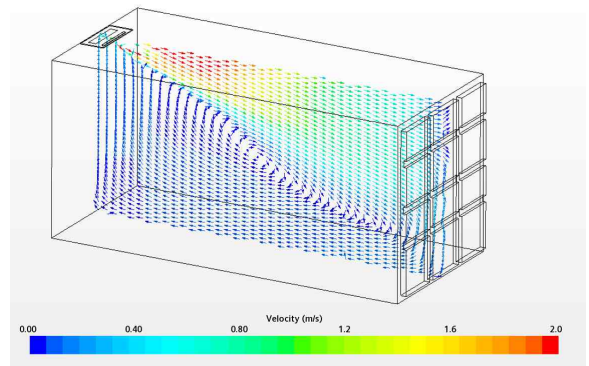
(e) TALS radiation heat flux



(f) Non-TALS radiation heat flux



(g) TALS vector 분포



(h) Non-TALS vector 분포

[그림 4.18] TALS 적용 유무에 따른 층분 CFD 해석 결과

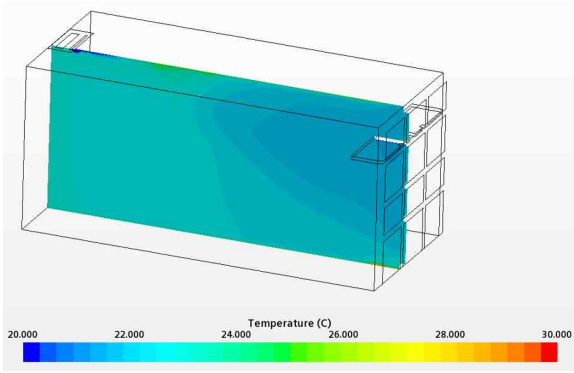
(2) 하지 CFD 수치해석 결과

하지 해석 기준 시간 13시의 일사량은 $1,032.08 \text{ W/m}^2$, 실외온도는 $32.19 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며, 방위각 207° , 고도 77° 으로 TALS의 Test room과 Non-TALS의 Reference room을 동일한 경계조건을 설정하였다. 하지는 여름을 대표하는 절기로 실내 목표 온도는 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하여 FCU 공조 냉방과 TALS 복사냉방(하부 냉각면 $18 \text{ }^\circ\text{C}$)이 가동되었다. CFD 해석을 통해 산출된 결과는 표 4.16에 정리하였다. 시뮬레이션 상세 열해석 및 기류해석은 그림 4.19에 중앙의 단면을 이미지화하여 결과를 분석하였다.

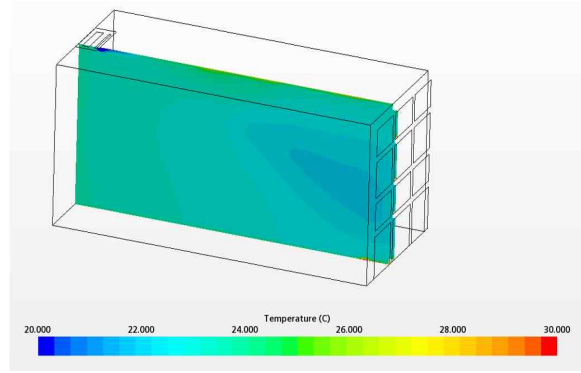
하지 해석결과, 일년 중 가장 높은 태양 고도가 나타나는 하지는 실내로 유입되는 일사량이 작음과 동시에 TALS가 일사열을 차단하거나 반사하여 산란 일사의 영향이 아주 미비한 것으로 나타났다(그림 4.19 (e),(f)). 외주부에 설치된 TALS는 복사냉방 효과로 실외에서 들어오는 부하량을 감소시키고 열을 대류시켜 실내 중앙에 까지 차가운 기류를 형성하는 것으로 나타나 실내온도를 낮추고 사람이 느끼는 열적 쾌적감을 개선하는 것으로 분석되었다. 수직 온도 분포의 경우 TALS의 냉각 효과로 Test room이 모든 온도 측정 지점에서 낮은 온도를 보이며, 기류 속도는 TALS 설치 유무에 따른 차이가 크지 않은 것으로 확인되었다.

<표 4.16> 하지 시뮬레이션 결과

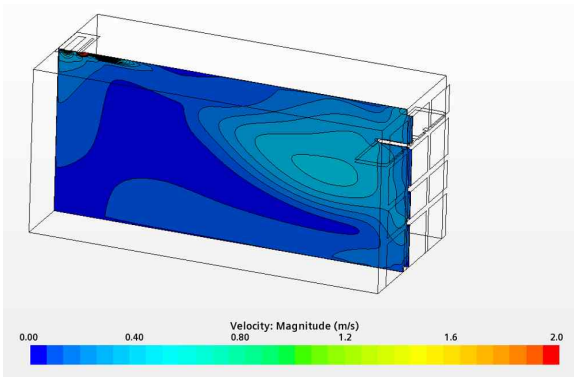
항목		온도($^\circ\text{C}$)		기류 속도(m/s)	
		TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
외주부	1.7m	21.52	22.28	0.36	0.38
	1.1m	21.68	22.05	0.31	0.40
	0.1m	22.32	22.54	0.12	0.12
실내 중앙	1.7m	22.16	22.67	0.42	0.26
	1.1m	22.55	22.98	0.03	0.03
	0.1m	22.56	23.04	0.08	0.07
수평 온도	0.1m	21.78	22.22	0.26	0.21
	1.6m	22.02	22.29	0.24	0.37
	3.1m	22.48	22.93	0.03	0.03
	4.6m	22.65	23.16	0.06	0.06
	6.1m	22.87	23.46	0.07	0.08



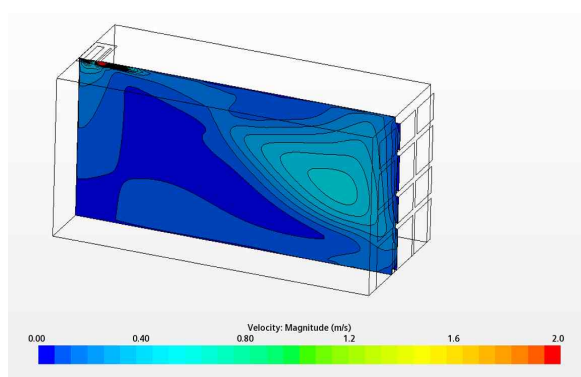
(a) TALS 온도 분포



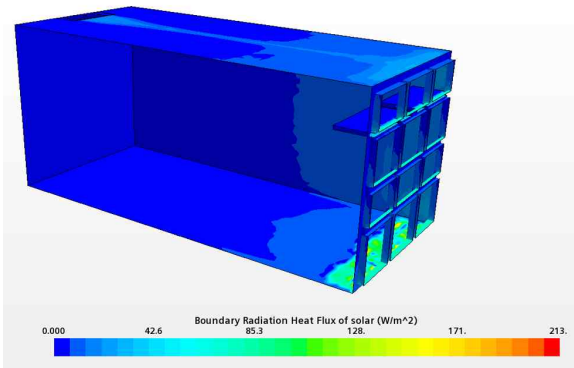
(b) Non-TALS 온도 분포



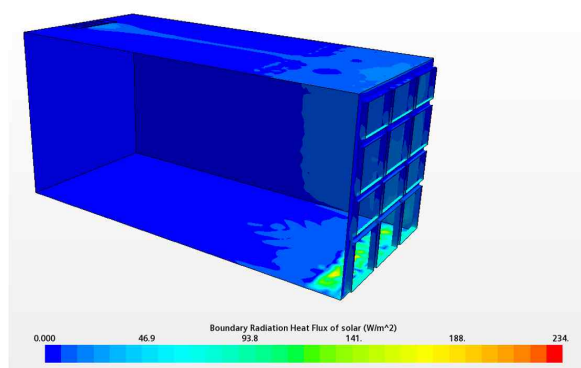
(c) TALS 속도 분포



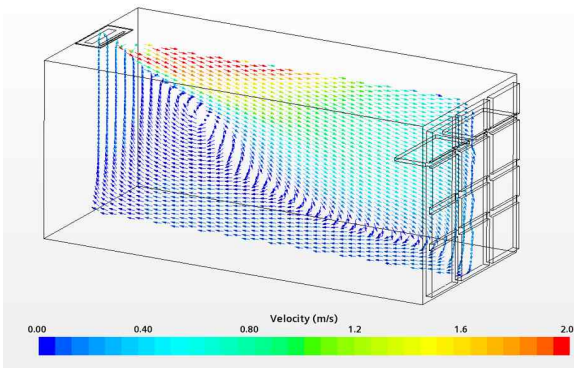
(d) Non-TALS 속도 분포



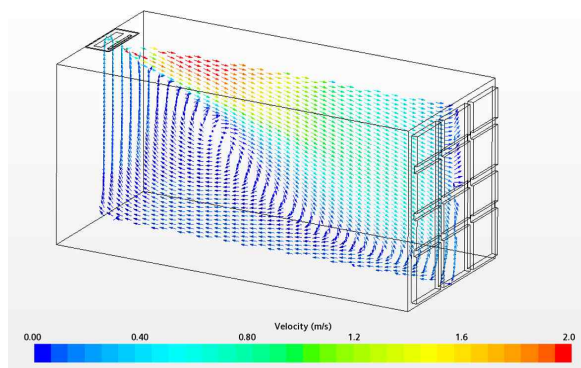
(e) TALS radiation heat flux



(f) Non-TALS radiation heat flux



(g) TALS vector 분포



(h) Non-TALS vector 분포

[그림 4.19] TALS 적용 유무에 따른 하지 CFD 해석 결과

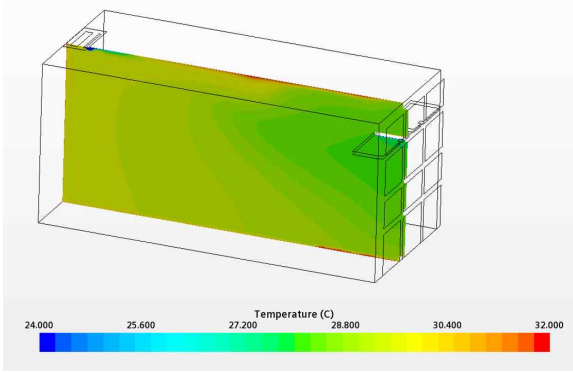
(3) 추분 CFD 수치해석 결과

추분 절기의 TALS 복사냉방 효과를 분석하기 위해 실내 온도분포와 기류분포 수치해석을 실시하였고 다음과 같은 조건을 설정하였다. 추분 해석 기준 시간은 13시로 일사량은 $926.69 W/m^2$, 외기온도 $27.08 ^\circ C$, 방위각 $195 ^\circ$, 태양 남중고도 $53 ^\circ$ 로 결과 비교를 위한 2개의 실험공간 경계조건을 동일하게 설정하였다. 실증 실험으로 관측된 일사량과 외기온도는 추분에 실내 냉방부하의 원인이 되어, 추분에는 FCU 공조 냉방과 TALS 복사냉방이 가동되었다.

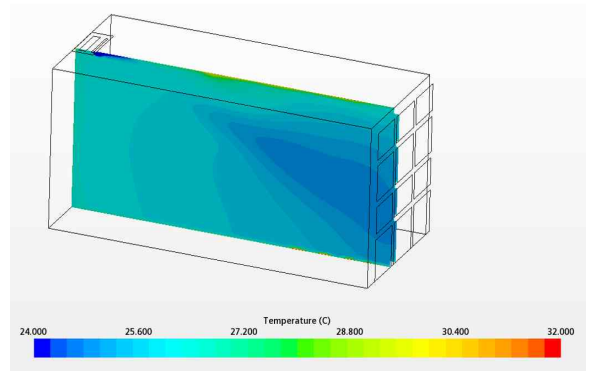
추분 수치해석 결과는 다른 절기의 결과와 상이하게 TALS가 적용된 Test room의 실내온도가 더 높게 나타났고 발목 높이에서 온도가 가장 크게 나타났다(외주부 $27.74 ^\circ C$, 실내 중앙 $28.60 ^\circ C$). 추분과 춘분의 태양 고도는 같지만, 추분은 추분에 비해 일사량과 실외온도가 2배 이상 큰 경계조건이 입력되고 TALS에 반사된 확산 일사의 영향으로 실내온도가 더 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 그림 4.20의 (a), (b)처럼 외주부 바닥면에 일사열이 집중되어 표면 온도가 많이 상승하여 실내온도를 상승하는 원인인 것으로 나타났다. TALS와 일사량 및 실외온도의 변인에 따른 실내 온열환경 변화추이에 대한 정량적인 결과를 도출하기 위한 추가해석이 필요하다. TALS 적용 유무에 따른 기류 속도 차이는 사절기 중 가장 작게 관측되어 추분에는 공조 냉방 및 복사냉방의 영향이 매우 작은 것으로 분석되었다.

<표 4.17> 추분 시뮬레이션 결과

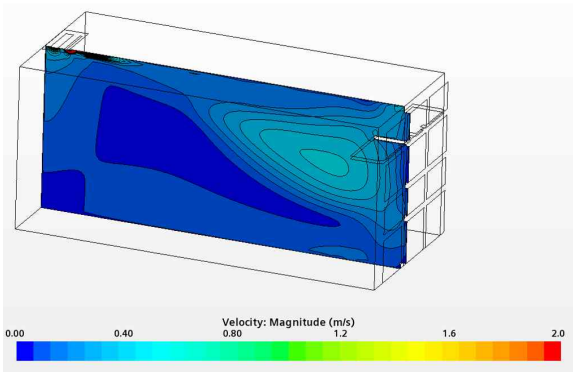
항목		온도(°C)		기류 속도(m/s)	
		TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
외주부	1.7m	27.26	25.03	0.39	0.42
	1.1m	27.28	24.78	0.33	0.43
	0.1m	27.74	25.09	0.14	0.14
실내 중앙	1.7m	28.29	25.51	0.20	0.21
	1.1m	28.50	25.77	0.04	0.04
	0.1m	28.60	25.81	0.12	0.11
수평 온도	0.1m	27.42	24.91	0.21	0.23
	1.6m	27.77	25.09	0.20	0.32
	3.1m	28.42	25.70	0.04	0.05
	4.6m	28.79	25.93	0.07	0.08
	6.1m	29.23	26.28	0.08	0.09



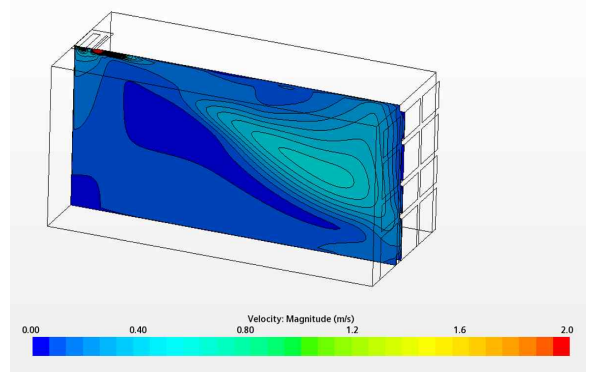
(a) TALS 온도 분포



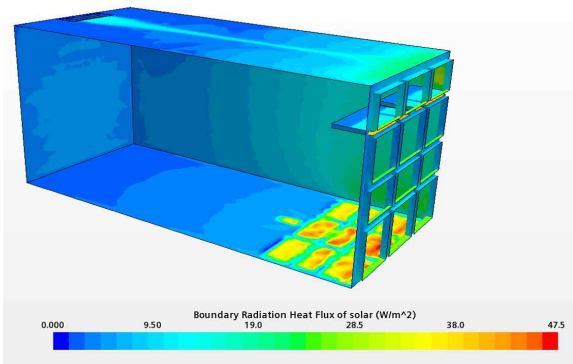
(b) Non-TALS 온도 분포



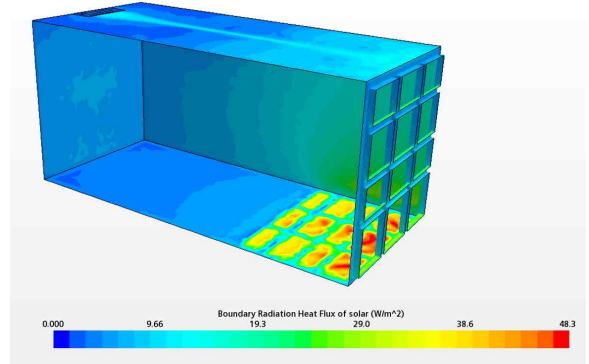
(c) TALS 속도 분포



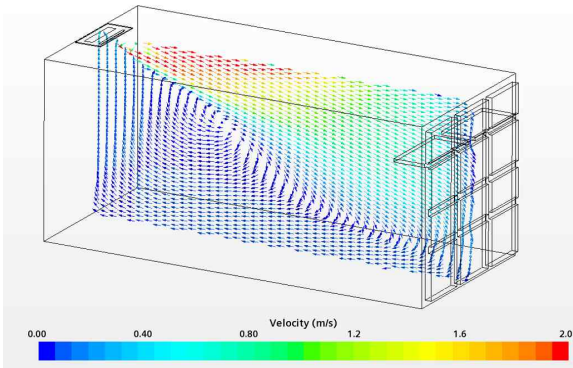
(d) Non-TALS 속도 분포



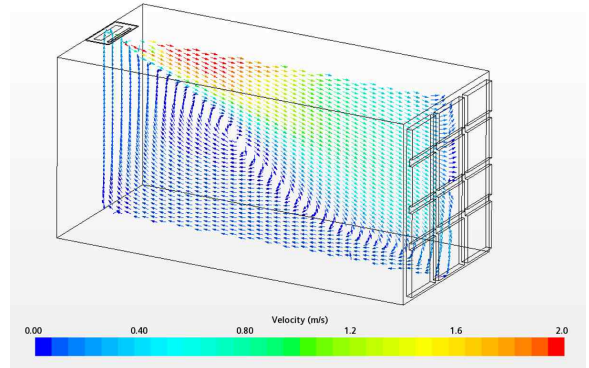
(e) TALS radiation heat flux



(f) Non-TALS radiation heat flux



(g) TALS vector 분포



(h) Non-TALS vector 분포

[그림 4.20] TALS 적용 유무에 따른 추분 CFD 해석 결과

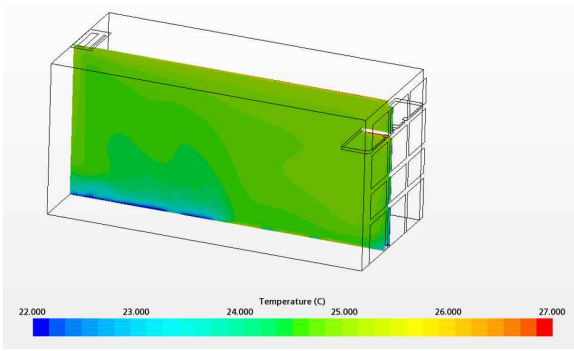
(4) 동지 CFD 수치해석 결과

일년 중 태양고도가 31 ° 로 가장 낮은 동지는 실내로 유입되는 주광과 일사량이 가장 많은 절기로 그림 4.21 (f)를 보면 다른 절기와는 다르게 실내 내주부까지 일사열 유입 영향이 있는 것으로 나타났다. 동지 13시의 일사량은 551.18 W/m^2 , 실외온도는 11.79 °C이며, 방위각은 187 ° 이다. 동지에는 실내 목표 온도 20 °C 를 유지하는 조건으로 FCU 공조 난방과 TALS 복사난방이 구성되었고 TALS 하부 가열면의 경계조건은 35 °C로 설정하였다. 수치해석을 통한 온도와 기류분포는 표 4.18에 정리하였고, TALS와 Non-TALS의 비교결과를 그림 4.21에 나타내었다.

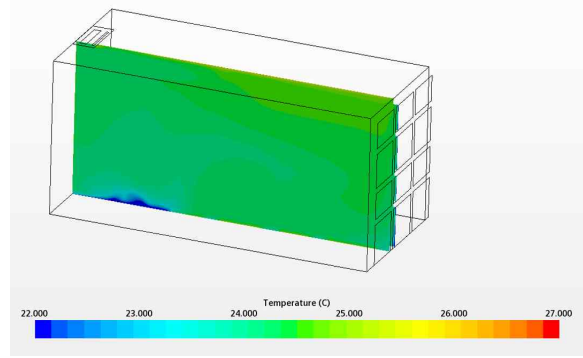
동지 해석결과, 실내로 유입되는 일사열은 실내 중앙 깊이까지의 바닥면을 가열하고 TALS가 설치된 공간은 실내 내주부까지 들어오는 복사열을 차단하여 바닥 높이의 온도를 낮추고 재실자에게 직접적으로 영향을 미치는 온열 불쾌감을 감소하는 효과가 기대된다. 실내온도는 TALS의 복사열로 인해 Reference room에 비해 Test room의 수직 및 수평 온도가 더 높게 나타났고, 기류분포는 밀도가 낮은 난방열이 상승하는 이유 때문에 실내 천장 주위에서 기류의 편차가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. Vector 분포는 TALS의 차양 효과로 인해 내주부의 온도분포 및 기류가 변화하여 Non-TALS에 비해 좀 더 다양하게 기류가 변화하는 것을 확인할 수 있다.

<표 4.18> 동지 시뮬레이션 결과

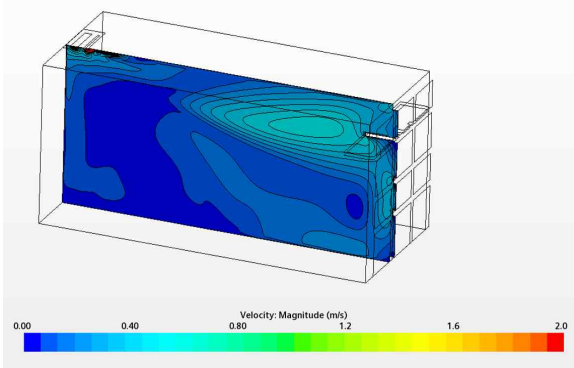
항목		온도(°C)		기류 속도(m/s)	
		TALS	Non-TALS	TALS	Non-TALS
외주부	1.7m	24.87	24.43	0.35	0.23
	1.1m	24.86	24.36	0.15	0.23
	0.1m	24.72	24.19	0.18	0.15
실내 중앙	1.7m	24.64	24.19	0.06	0.08
	1.1m	24.50	24.22	0.11	0.09
	0.1m	24.14	24.28	0.06	0.16
수평 온도	0.1m	24.72	24.25	0.36	0.26
	1.6m	24.75	24.28	0.10	0.12
	3.1m	24.59	24.25	0.13	0.06
	4.6m	24.46	24.09	0.03	0.11
	6.1m	24.76	24.18	0.08	0.17



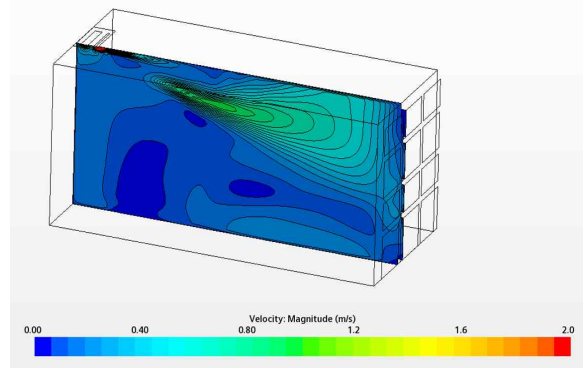
(a) TALS 온도 분포



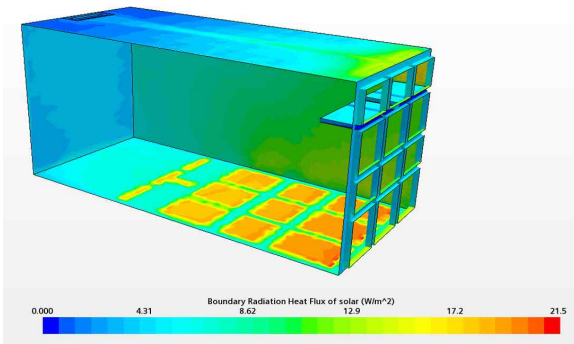
(b) Non-TALS 온도 분포



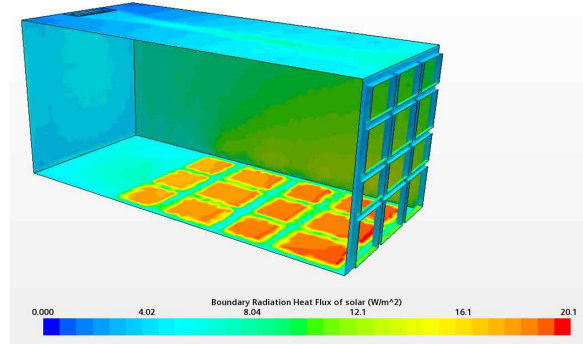
(c) TALS 속도 분포



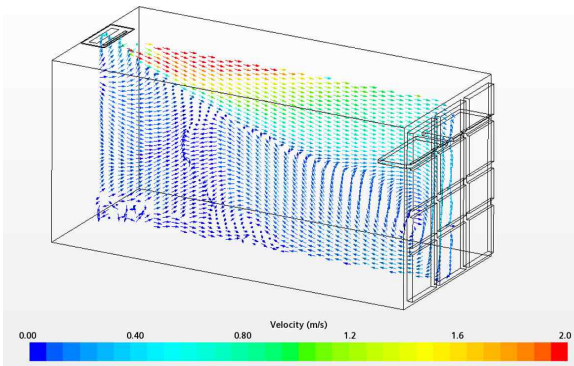
(d) Non-TALS 속도 분포



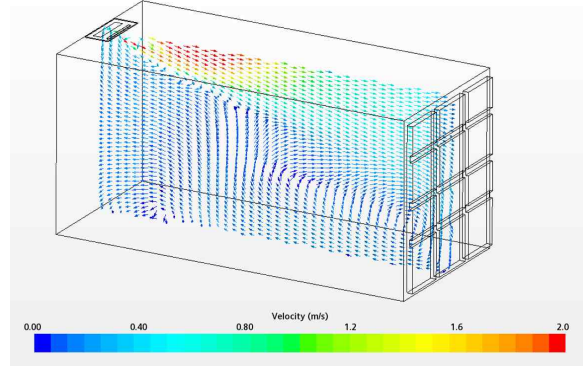
(e) TALS radiation heat flux



(f) Non-TALS radiation heat flux



(g) TALS vector 분포



(h) Non-TALS vector 분포

[그림 4.21] TALS 적용 유무에 따른 동시 CFD 해석 결과

4.3.3.2 국부적 불쾌감(수직온도차 및 불쾌적 비율)

TALS의 복사냉난방 기능을 통해 재실자가 체감하는 온열환경을 분석하기 위해 CFD 수치해석 결과를 통해 국부적 불쾌감을 평가하였다. 실내공간의 열적 성층화 불쾌적을 평가하는 물리 지표인 수직온도차와 수직온도차에 따른 불쾌적 비율을 산출하였다. 평가 기준은 ISO 7730 “Ergonomics of the thermal environment”의 재실자 앉은 자세 가슴 높이와 발목 높이의 온도를 연산하였다. 관측결과는 표 4.19과 4.20에 정리하였다.

수직 온도 분포는 앞 절의 결과와 같이 춘분과 하지는 TALS 적용으로 실내온도가 낮게 나타났고, 추분과 동지에는 TALS 적용으로 실내온도가 높게 관측되었다. 수직온도차와 수직온도차에 따른 불쾌적 비율은 모든 절기에서 TALS 적용 유무와 관계없이 Category A 쾌적 범위가 산출되어 열적으로 안정화된 환경을 조성하는 것으로 나타났다. 불쾌적 비율을 정량적으로 비교하면, TALS 적용시 외주부에서는 불쾌적 비율이 개선되지만, 실내 중앙은 불쾌적 비율이 증가하는 것으로 나타나 실내 중앙의 온열환경 개선 방법에 대한 고찰이 필요하다.

<표 4.19> TALS 적용 유무에 따른 절기별 수직 온도 분포(°C)

절기	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm	1,100mm	100mm
춘분	25.47	25.71	26.00	26.02	25.67	25.94	26.32	26.38
하지	21.68	22.32	22.55	22.56	22.05	22.54	22.98	23.04
추분	27.28	27.74	28.50	28.60	24.78	25.09	25.77	25.81
동지	24.86	24.72	24.50	24.14	24.36	24.19	24.22	24.28

<표 4.20> TALS 적용 유무에 따른 절기별 수직 온도차(°C)와 PD(%)

절기	Test room(TALS)				Reference room(Non-TALS)			
	외주부		실내 중앙		외주부		실내 중앙	
	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD	온도차	PD
춘분	0.24	0.26	0.02	0.31	0.27	0.25	0.06	0.29
하지	0.64	0.18	0.01	0.31	0.49	0.21	0.06	0.29
추분	0.46	0.21	0.10	0.29	0.31	0.24	0.04	0.30
동지	0.14	0.35	0.36	0.43	0.17	0.36	0.06	0.29

4.4 소결

본 장에서는 제안된 복사냉난방 복합형 광선반 시스템(TALS)의 열환경 개선 효과를 검증하기 위하여 C대학 Test bed 실증 실험과 시뮬레이션을 수행하였다. 실증 실험은 TALS 적용 유무에 따른 결과를 비교하기 위해 동일한 실내환경을 구현한 2개의 Test room을 구축하고 실험되었다. 열환경 평가요소는 실내온도, 수직온도차, 수직온도차에 의한 불쾌감(PD), 수평 온도, 예상온열감이며 계절별로 비교 분석하였다. 시뮬레이션은 실험 환경을 동일하게 구현해 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 겨울철 실험 결과, 열손실이 많이 발생하는 창면 및 외주부는 실내 중앙에 비해 낮은 온도가 관측되지만, TALS 적용으로 복사난방열이 외주부에 전달되어 열손실을 감소시키고 약 1.76 °C 실내온도를 증가시키는 것을 확인하였다. TALS는 외피 부하를 저감하고 열원 효율을 향상하여 겨울철 난방에너지 사용량 절감을 통해 건물 운용비용을 절감할 수 있다.

2) 수직온도차와 PD 실험 결과, TALS가 설치된 외주부는 수직온도차와 PD가 불쾌적 범위로 관측되었다. 이는 TALS 복사난방열의 밀도 때문에 실내 바닥으로 확산되지 않고, 천장으로 다량의 열이 이동한 것으로 보인다. 반면, 실내 중앙은 전체 기류가 혼합된 대표지점으로 Non-TALS 실험 공간에 비해 TALS 실험 공간의 쾌적 범위 절대량과 빈도수가 증가하는 결과를 얻었다.

3) 수평 온도 분포 특징은 TALS에서 복사되는 난방열이 실내 기류를 상승시키고 이동시켜 실내 공간 전체적으로 균일한 온도환경이 조성되는 것으로 나타났다. 예상온열감은 TALS가 설치된 공간이 Non-TALS에 비해 쾌적 범위 유지시간이 약 3.7배 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구의 대상은 사무실 공간으로, TALS를 적용했을 경우 재실자에게 더욱 쾌적한 온열 환경을 제공하여 업무 능력향상과 생산성 증가가 기대되고 건물 운용비용을 절감하여 경제성이 향상될 것으로 기대된다.

4) 여름철 실험 결과, 일년 중 태양고도가 가장 높은 하지는 외주부에서 열을 집중적으로 획득하게 되는데, TALS 복사냉방 기능으로 밀도가 높은 차가운 기류를 형성하여 외주부 부하 감소, 실내온도 상승 방지, 발목 높이의 온도를 낮추는 효과가 매우 뛰어난 것으로 분석되었다. TALS는 외주부에서 발생할 수 있는 냉방부하를 차단하여 안정적인 실내 기류와 실내온도를 유지할 수 있고, Non-TALS에 비해 PMV 쾌적 범위 유지시간과 쾌적 절대량을 증가시키는 것을 확인하였다. 또한, TALS는 높이 2.1 m의 창면에 설치되어 냉방 복사열이 실내 바닥면으로 하강하는 기류를 형성하여, 수직 높이에 따른 온도 차이는 Non-TALS 실험실에 비해 절대량이 더 크게 나타나지만, 쾌적 범위 기준 Category A를 모두 만족하여 재실자에게 불쾌감을 발생시키지 않는 것으로 증명되었다.

5) CFD 수치해석 결과, 춘분, 하지, 추분에는 냉방부하가 발생하여 FCU 공조 냉방과 TALS 복사냉방이 되어, 외기온도의 영향과 실내로 유입되는 일사열을 차단하여 외주부 부하를 감소시키는 효과가 있는 것을 증명하였다. 또한, 실내온도를 낮추고 기류를 안정화하여 쾌적한 온열환경을 조성하는 것으로 분석되었다. 동지는 TALS 복사난방으로 따뜻하고 쾌적한 실내 온열환경이 나타났다. 모든 절기에서 실내 외주부의 국부적 불쾌감을 개선하는 효과를 정량적으로 검증하였다. 제안된 TALS는 복사냉난방 기능으로 열환경을 개선하고 사람이 쾌적하게 느끼는 온열감을 향상시키는 효과가 있는 것을 검증하였다.

제5장 TALS 건물에너지 절감 효과 분석

본 5장에서는 실내 빛환경 및 열환경 개선을 위해 개발된 복사냉난방 복합형 광선반의 건물에너지 절감 성능을 Test bed 실증 실험을 통해 평가한다. TALS 설치 는 외주부의 남향 창면 높이 2,100 mm 부분에 2개의 기구가 수평으로 실내에 설치되었고, 크기는 1,200 mm(L) × 600 mm(W) × 50 mm(H)이다. TALS 상부면은 반사판 역할을 하여 실외 주광을 실내 내주부로 유입시키고 균일한 시환경을 조성 하여 재실자에게 쾌적한 빛환경을 제공한다. 또한, 반사면을 통해 입사하는 조도는 내주부 실내조도를 증가시켜 디밍 제어를 통한 조명에너지 절약 효과를 기대할 수 있다. TALS 하부면은 복사냉난방 기능이 있어 외피 부하와 공조 부하를 저감시켜 에너지사용량을 감소시킬 것으로 예상된다. 복사냉난방 복합형 광선반은 자연 채광 증가와 복사냉난방으로서 각각 빛환경과 열환경, 더 나아가 조명에너지와 냉·난방에너지에 많은 영향이 있다. 본 연구에서는 TALS 적용으로 에너지사용량 저감효과를 분석하여 기술 제안의 정량적, 정성적 유의성을 검증한다.

5.1절에서는 건물에너지 성능평가 지표를 설명하고, 5.2절에서는 조명에너지 사용량을 비교한다. 먼저, 조명기구 전원과 디밍이 100 % 활성화된 대조군 Non-TALS 공간을 설정하고, DRDS 실험실은 광센서 조광제어 시스템을 적용하여 주광에 따라 디밍 제어되는 실험공간을 구축하고, 마지막으로 TALS와 DRDS가 같이 운용하는 설정으로 실험을 계획하여 조명에너지 절감량을 정량적으로 비교 분석했다. 5.3절에서는 냉난방에너지 사용량 비교를 위해 공조기기만 운행되는 Non-TALS을 대조군으로 지정하고, 복사냉난방과 공조기기가 작동하는 TALS를 실험군으로 설정하여 TALS 복사냉난방 기능의 공조에너지 절감 효과를 정량적으로 분석한다. 5.4절에서는 TALS 설치 유무에 따른 조명에너지와 공조에너지 절감량을 총 정리하고 결과를 비교 분석하여 복사냉난방 복합형 광선반이 가지는 에너지사용량 절감 효과의 의미를 설명한다.

5.1 건물에너지 성능평가 지표

본 연구에서 제안한 TALS는 복사냉난방이 가능하여 냉난방 에너지사용량을 줄이고, 광센서 조광제어 시스템 복합형 기술로 조명에너지 절약이 가능하다. 건물에너지 절감율을 정량적으로 비교 분석하기 위해 Test bed 냉난방 자동제어 시스템 데이터 수집을 통해 부하와 에너지사용량을 모니터링하여 TALS 적용으로 개선되는 건물에너지 성능을 평가한다.

냉난방에너지 성능평가는 TALS가 설치된 Test room과 TALS가 설치되지 않은 Reference room에서 동일한 실험 조건과 환경에서 실험한다. 냉난방시스템은 난방 시 실내온도 20 °C, 냉방 시 실내온도 26 °C를 유지할 수 있게 프로그래밍하였고, Dead band를 0.5 °C로 설정 및 운용한다. 공조시스템 운영 프로세스의 예를 들면, 겨울철 실내온도가 19.5 °C 이하가 되면 실내온도를 높이기 위해 공조기가 켜지고 실내온도를 20.5 °C까지 상승시키고 전원이 차단된다. 마찬가지로, 여름철 실내온도 26.5 °C 이상이 모니터링되면 공조기가 작동하고 냉방으로 실내온도를 25.5 °C로 낮추고 작동을 멈춘다. TALS 복사열을 공급을 위해 냉난방 열원(겨울 난방공급 온도 45 °C, 여름 냉방공급온도 10 °C)이 유량 7LPM으로 오전 9시부터 오후 6시까지 공급된다.

조명에너지 성능평가는 실험 공간 3곳에 각각 실험 조건을 다르게 설정하여 실험한다. Reference room 1은 조명기구 100 %를 모두 작동시키는 상태로 운용되고, Reference room 2는 광센서 조광제어 시스템 운용하고, Test room은 광선반과 광센서 조광제어 시스템 복합운용하는 조건으로 실험한다. Reference room 1은 실내 목표 조도가 설정되어 있지 않고, 광센서 조광제어 시스템이 적용된 Reference room 2와 Test room은 실내 목표 조도가 600 lx로 설정되어 일광에 따라 변화하는 실내 빛환경에 맞게 조명기기가 디밍된다. 조명에너지의 경우, 광센서 조광제어 시스템 적용으로 절약되는 에너지와 광선반으로 저감 되는 조명 부하 비교분석이 가능하여 TALS 원단위 효과를 도출할 수 있다.

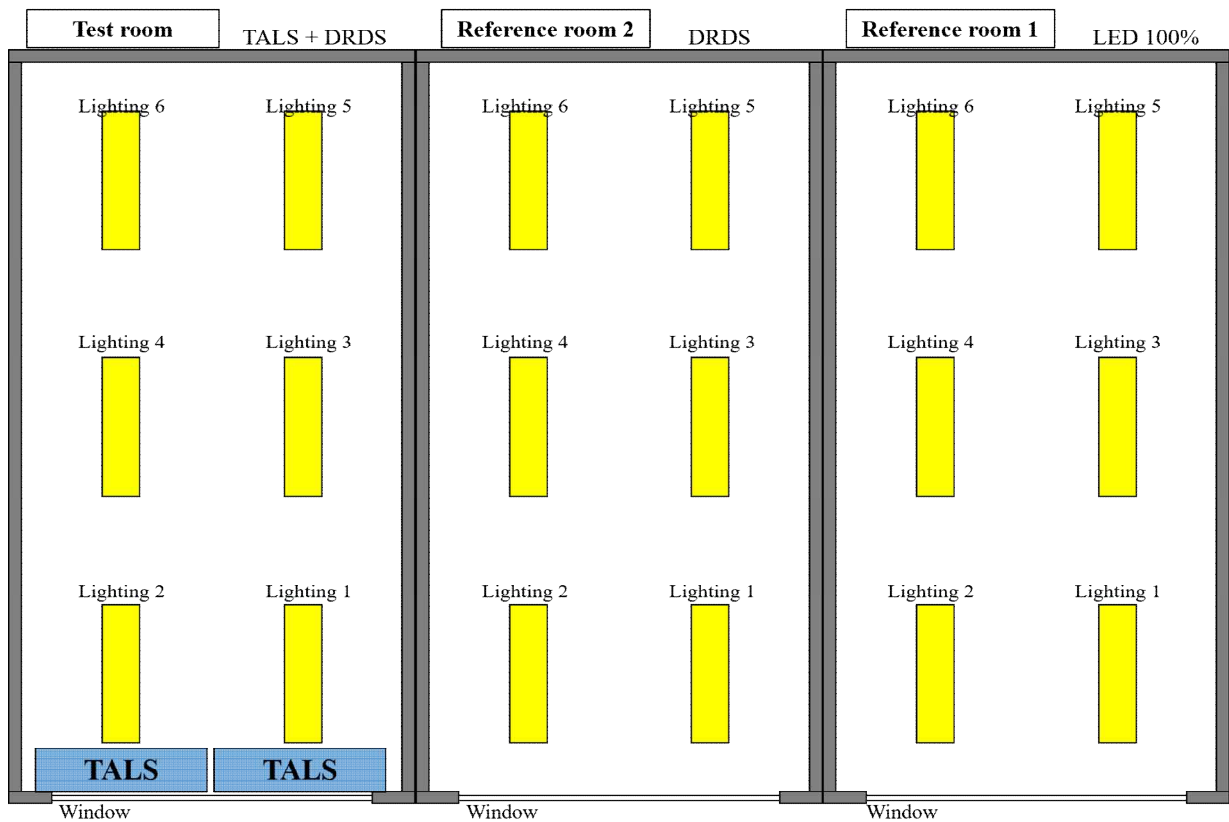
5.2 조명에너지 사용량 분석

TALS는 상부 반사면을 통해 주광을 건축물 실내 내주부로 유입시켜 균일한 조도 분포를 만들어 쾌적한 시환경을 조성한다. TALS는 실내 외주부에 설치되어 창면에서 발생하는 과도한 주광의 유입을 막고, 창면에서 거리가 먼 실내 내주부로 빛을 반사시켜 실내조도를 증가시킨다. 본 연구에서는 조명에너지 사용량 저감 효과를 분석하기 위해 설정한 실내조도를 일정하게 유지할 수 있는 광센서 조광제어 시스템을 적용하여 각 실험 조건별 조명에너지 사용량을 비교 분석한다. 광센서 조광제어 시스템 제어는 실내로 유입되는 자연채광량을 실시간으로 모니터링하고 필요에 따라 조명기기를 점등 및 소등시켜 목표 실내조도를 만족시키고 조명에너지 사용량을 최적화할 수 있다.

<표 5.1> 실험 시스템 개요

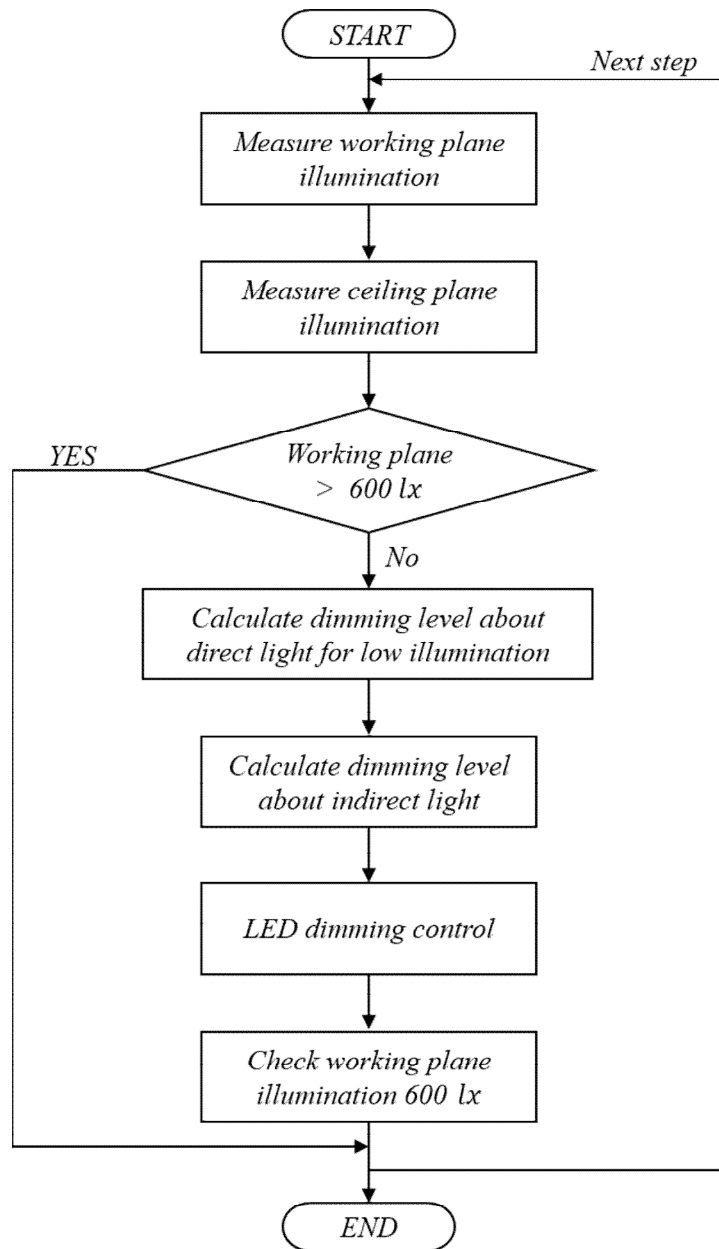
적용기술	Non-TALS	DRDS	TALS+DRDS
LED		0	
광센서 조광제어	X	0	0
광선반	X	X	0
복사 냉난방	X	X	0
냉난방 공조	X	0	0

조명에너지 사용량 및 저감량 분석 실험에 대한 환경과 조건은 표 5.1과 같다. Test bed은 3개의 실험실로 구성되어 있고 각각의 실험실에는 동일한 위치에 광센서 조광제어 시스템으로 20단계 디밍제어가 가능한 40 W LED 조명기구가 6개씩 설치되어 있다. 디밍제어를 위한 광센서는 LED에 내장되어 있고, 천장면의 조도값을 측정하고 작업면 조도값을 알고리즘을 통해 연산하여 필요한 조도가 디밍 제어된다. 조명기구의 설치 위치는 그림 5.1과 같다. 조명에너지 절감 평가를 위해 대조군을 설정하였다. Reference room 1(Non-TALS)은 조명기구를 100% 디밍한 상황을 가정한 실험공간이며, Reference room 2(DRDS)는 광센서 조광제어 시스템을 적용하여 디밍 제어로 실내 목표 조도 구현이 가능한 실험 공간으로 설정하였다. Test room(TALS+DRDS)은 실험군으로 광센서 조광제어를 통한 디밍 제어와 TALS 반사면을 통해 주광이 실내 내주부로 유입되는 실험 공간을 구현하였다.



[그림 5.1] 조명에너지 사용량 실험 개요

광센서 조광제어 시스템의 디밍 프로세스는 그림 5.2와 같다. 광센서 조광제어 시스템은 LED에 설치되어 있는 광센서가 천장면 조도값을 센싱하면 실내 작업면 조도를 계산하는 알고리즘을 통해 조도값을 예측한다. 계산된 작업면 조도값이 600 lx 이하가 모니터링될 경우, 각각의 작업면에 필요한 조도만큼 조명기구를 추가 디밍하여 목표 조도를 만족시킨다. 주간 시간대 많은 주광의 유입으로 실내 작업면 조도의 산출값이 600 lx 이상을 만족하면 조명기구는 모두 꺼지고 디밍 제어는 종료된다. 조명에너지 절감은 광센서 조광제어 시스템으로 LED가 디밍 제어되거나 등기구 완전히 꺼졌을 때 전력사용량이 저감 된다.



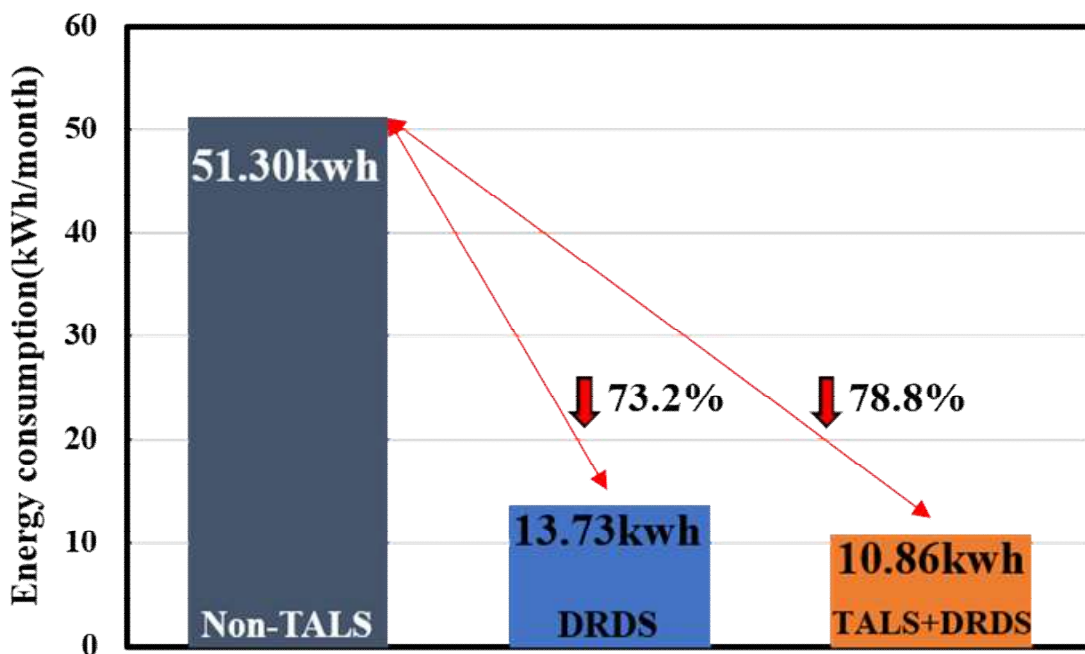
[그림 5.2] 광센서 조광제어 시스템 제어 알고리즘 Flow chart

본 장에서는 TALS 적용 유무에 따른 조명에너지 사용 저감량을 정량적으로 비교하기 위해 한 달 동안 에너지사용량을 모니터링하여 결과를 정리하였다. 사무실 업무시간인 오전 9시부터 오후 6시까지의 데이터를 수집하였고, 기상 상황과 천공 상태에 따라 조명에너지 소비량의 편차가 크게 나타나 천공상태를 실험 결과와 같이 비교하였다.

<표 5.2> 월간 조명에너지 사용량 비교

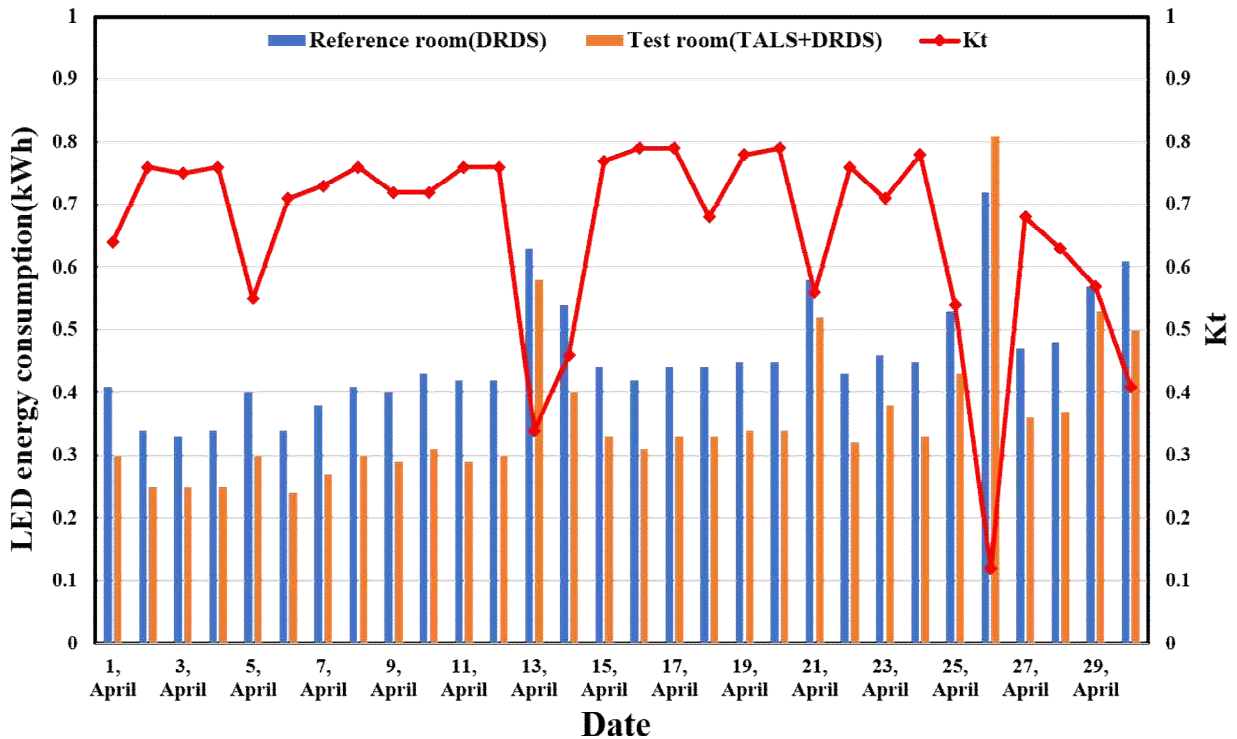
일 시	조명에너지 사용량(<i>kWh</i>)			조명에너지 절감율(%)		TALS 에너지 절감율(%)	Kt (max)
	Non-TALS	DRDS	TALS+DRDS	Non-TALS and DRDS	DRDS and TALS+DRDS		
1	1.71	0.41	0.30	76.3	82.6	6.3	0.64
2	1.71	0.34	0.25	80.4	85.4	5.0	0.76
3	1.71	0.33	0.25	80.5	85.6	5.1	0.75
4	1.71	0.34	0.25	79.9	85.4	5.5	0.76
5	1.71	0.40	0.30	76.8	82.4	5.6	0.55
6	1.71	0.34	0.24	79.9	85.8	5.9	0.71
7	1.71	0.38	0.27	77.6	84.5	6.9	0.73
8	1.71	0.41	0.30	75.8	82.4	6.6	0.76
9	1.71	0.40	0.29	76.4	83.1	6.7	0.72
10	1.71	0.43	0.31	74.9	81.6	6.7	0.72
11	1.71	0.42	0.29	75.6	83.0	7.4	0.76
12	1.71	0.42	0.30	75.3	82.2	6.9	0.76
13	1.71	0.63	0.58	63.4	66.4	3.0	0.34
14	1.71	0.54	0.40	68.6	76.7	8.1	0.46
15	1.71	0.44	0.33	74.3	80.7	6.4	0.77
16	1.71	0.42	0.31	75.4	81.6	6.2	0.79
17	1.71	0.44	0.33	74.3	80.7	6.4	0.79
18	1.71	0.44	0.33	74.4	80.7	6.3	0.68
19	1.71	0.45	0.34	73.8	80.2	6.4	0.78
20	1.71	0.45	0.34	73.8	80.4	6.6	0.79
21	1.71	0.58	0.52	66.2	69.4	3.2	0.56
22	1.71	0.43	0.32	74.7	81.4	6.7	0.76
23	1.71	0.46	0.38	73.0	78.0	5.0	0.71
24	1.71	0.45	0.33	73.8	80.6	6.8	0.78
25	1.71	0.53	0.43	68.9	75.0	6.1	0.54
26	1.71	0.72	0.81	58.2	52.8	-5.4	0.12
27	1.71	0.47	0.36	72.8	79.2	6.4	0.68
28	1.71	0.48	0.37	72.0	78.3	6.3	0.63
29	1.71	0.57	0.53	66.6	69.2	2.6	0.57
30	1.71	0.61	0.50	64.6	71.0	6.4	0.41
[총 에너지사용량] Non-TALS: 51.3 <i>kWh/month</i> , DRDS: 13.73 <i>kWh/month</i> , TALS+DRDS: 10.86 <i>kWh/month</i>							

표 5.2는 2022년 4월 한 달간 조명에너지 실험에 의한 전기에너지 사용량을 정리한 결과다. Non-TALS는 조명기구가 100 % 디밍된 상태로 소비되는 에너지로 관측된 모든 일의 에너지사용량이 일정하다. DRDS는 광센서 조광제어 시스템으로 디밍 제어되는 실험 공간의 조명에너지 사용량이다. TALS+DRDS는 TALS와 광센서 조광제어 시스템이 작동하는 공간의 조명에너지 사용량을 정리하고 절감율을 비교하였다. 또한, TALS 원단위 개선 효과를 조명에너지 절감율 비교결과의 차를 통해 산출하였다.



[그림 5.3] 월간 조명에너지 누적 사용량

월간 조명에너지 총사용량을 분석하면(그림 5.3), Non-TALS 51.30 kWh, DRDS는 13.73 kWh, TALS+DRDS는 10.86 kWh로 나타났다. 광센서 조광제어 시스템 적용으로 월간 37.57 kWh가 저감되었고 73.2 % 절감율이 산출되었다. TALS와 DRDS 시스템 적용으로 월간 40.44 kWh가 저감되었고 절감율은 78.8 %로 나타났다. 주광을 실내 내주부로 반사시키는 광선반 본연의 조명에너지 절감 효과는 2.87 kWh로 나타났고, 전체 에너지의 5.6 %를 절감하는 것으로 나타났다.



[그림 5.4] 월간 조명에너지 사용량 비교

조명에너지 사용량은 기후와 천공상태에 영향을 많이 받는다. 그림 5.4을 보면 천공상태 Kt 는 조명에너지 사용량에 큰 영향을 미치는데, 담천공 범위의 Kt 가 관측된 날(13일, 26일)의 에너지사용량은 부분 담천공과 청천공에 비해 크게 나타났다. 이것은 광센서 조광제어 시스템이 정상적으로 작동하는 것을 알 수 있고, 실내조도 기준을 만족시키기 위해 조명기구 추가 디밍으로 에너지사용량이 많이 발생한 것을 알 수 있다. 덧붙여, 4월 26일의 경우(표 5.3) 악천후 기후 및 Kt 값이 0.12로 기록된 날로 오히려 TALS 적용으로 조명에너지사용량을 증가시켜 주광이 작은 담천공의 천공상태에서는 조명에너지 절감효과가 없는 것으로 분석되었다.

담천공 천공상태는 주광량이 매우 작은 상태로 직사 일광보다 확산광이 주로 실내로 유입되어 자연채광 절대량이 청천공에 비해 매우 작게 나타난다. 광선반은 외주부로 들어오는 강한 일광을 막아주는 역할도 하는데, 담천공 조건에서는 광선반이 확산광을 차폐하는 것으로 보인다. 외주부 창면에 설치된 광선반이 확산광을 막기 때문에 내주부의 인공조명이 추가 디밍되어 TALS가 설치된 Test room의 조명

에너지 사용량이 더 크게 나타나는 것으로 추론되었다. 또한, 우리나라 기상청 종관기상관측 자료의 연평균 운량에 따르면^[145], 담천공의 구름 상태는 일 년 중 약 4.7 %로 매우 작게 나타나 연간 에너지사용량에 큰 비중을 차지하지는 않겠지만, 담천공 조건에서 에너지사용량이 증가하는 원인과 영향에 대한 분석이 필요하다.

<표 5.3> 조명에너지 사용량(kWh) 비교(4.26, 최소 Kt 관측일)

시간	Ref room1	Ref room2	Test room	Kt
9시	0.19	0.08	0.09	0.04
10시	0.19	0.08	0.09	0.04
11시	0.19	0.08	0.08	0.08
12시	0.19	0.08	0.07	0.12
13시	0.19	0.08	0.09	0.05
14시	0.19	0.08	0.09	0.06
15시	0.19	0.08	0.09	0.05
16시	0.19	0.08	0.09	0.04
17시	0.19	0.08	0.10	0.02
에너지사용량	1.71	0.72	0.81	-

Ref room1: 조명기구 100% 작동

Ref room2: 광센서 조광제어 작동

Test room: TALS + 광센서 조광제어 작동

반면 표 5.5를 보면, $0.75 < Kt$ 의 청천공 조건에서는 조명에너지 사용량이 다른 천공조건에 비해 에너지사용량이 더 감소하는 것을 확인하였다. 일간 에너지사용량이 가장 적은 일은 4월 3일(Reference room)으로 $0.33 kWh$ 가 관측되었고, Test room은 $0.24 kWh$ 로 4월 6일에 측정되어 청천공 천공상태일 때 에너지 사용량 절감율이 크게 나타남을 알 수 있다. Kt 가 가장 큰 날은 4월 17일(표 5.4)로 최대 Kt 는 0.79 로 청천공 천공상태였고 모든 재실시간에서 Reference room에 비해 Test room의 에너지사용량이 작게 나타나 광선반 반사면을 통한 주광의 실내 유입 효과로 조명에너지 사용량이 절감되는 것을 확인하였다. 하지만, 에너지사용량이 가장 작은 일시는 최대 Kt 값이 기록된 날이 아닌 것으로 확인되었는데, 이는 Test bed 주변 환경과 시시각각 변화하는 천공상태가 영향을 미친 것으로 분석되었다.

<표 5.4> 조명에너지 사용량(kWh) 비교(4.17, 최대 $k\ell$ 관측일)

시간	Ref room1	Ref room2	Test room	$k\ell$
9시	0.19	0.07	0.05	0.52
10시	0.19	0.06	0.04	0.65
11시	0.19	0.04	0.03	0.75
12시	0.19	0.03	0.02	0.79
13시	0.19	0.03	0.02	0.75
14시	0.19	0.03	0.03	0.66
15시	0.19	0.04	0.03	0.53
16시	0.19	0.07	0.05	0.34
17시	0.19	0.07	0.06	0.17
에너지사용량	1.71	0.44	0.33	-

Ref room1: 조명기구 100% 작동

Ref room2: 광센서 조광제어 작동

Test room: TALS + 광센서 조광제어 작동

TALS는 외주부에서 주광을 차폐하여 자연채광 유입량을 감소할 수도 있지만, 청천공 천공상태와 부분담천공 천공상태에서는 에너지 절감 효과가 매우 좋고, 담천공 천공상태에서는 에너지 절감 효과가 미비한 것으로 분석되었다. 북반구에 위치한 우리나라는 계절의 흐름에 따라 태양 고도가 변화해 건축물 실내로 유입되는 자연채광량을 변화시킨다.

<표 5.5> 천공조건에 따른 조명에너지 사용량(kWh/day) 비교

구분	일 수	일 평균에너지 사용량		개선 효과
		DRDS	TALS+DRDS	
청천공	13일	0.41	0.30	0.11
부분담천공	15일	0.47	0.37	0.10
담천공	2일	0.68	0.70	-0.2

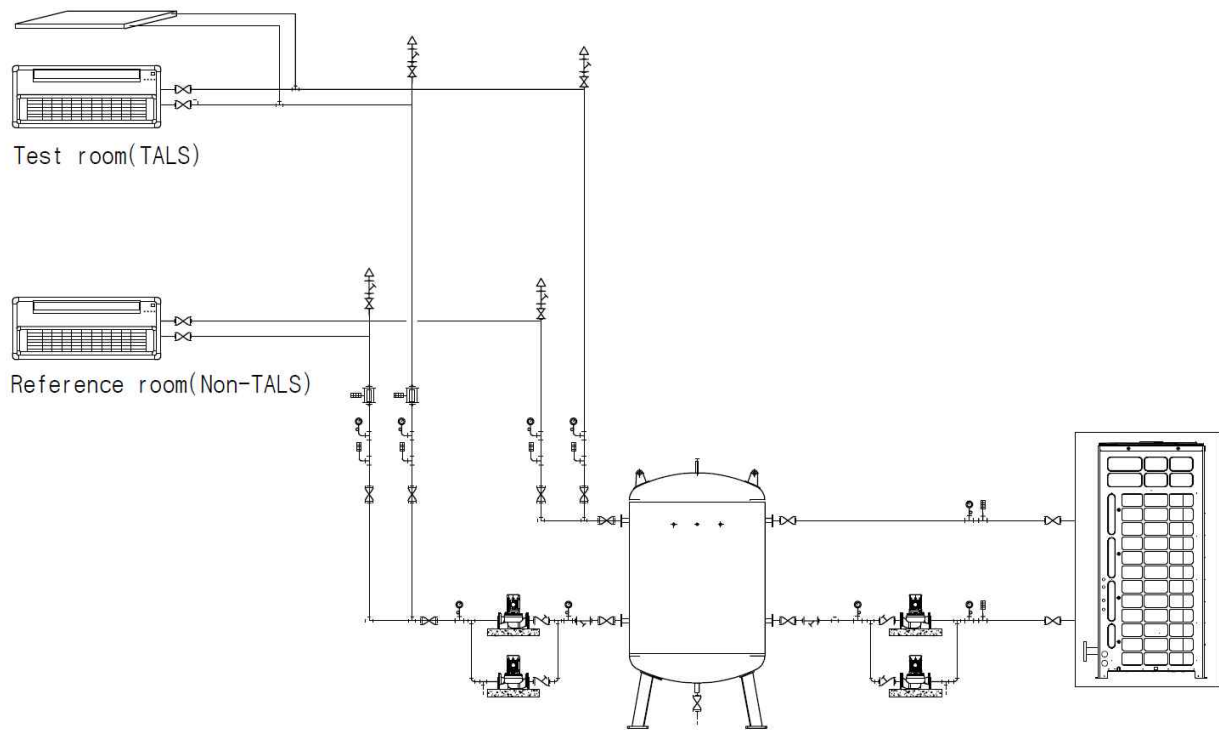
5.3 냉난방에너지 사용량 분석

본 절에서는 복사냉난방이 가능한 복합형 광선반의 냉난방 에너지사용량에 대한 실험과 결과를 정리한다. Test bed는 액티브 설비시스템이 구축되어 냉난방기기 제어 및 성능평가를 위한 서버가 구축되어있고 실험 공간과 설비 기기 등을 모니터링 및 제어할 수 있다. TALS는 복사냉난방이 가능한 광선반으로, 하부 표면 위에 순환용 배관이 삽입되어 복사냉난방이 가능하다. TALS는 열손실과 일사 유입이 많은 외주부에 설치되어 냉·난방 부하를 감소할 것으로 기대된다. 예를 들어, 겨울철 열손실이 많은 창면을 복사난방하여 공조 부하를 감소시키고, 여름철은 외주부 냉각으로 실내로 유입되는 일사열 획득을 감소시키고 공조 부하 저감 효과가 있을 것으로 기대된다. 본 절에서는 사무실 공조환경을 구현한 실증 실험을 통해 TALS 시스템의 냉난방 에너지 절감량을 검증한다.

냉난방 에너지 사용 분석 실험에 대한 배경과 실험 조건은 다음과 같다. 먼저, Test room에는 냉난방복사 광선반을 통해 복사난방이 운용되었고, 그 외의 실험 조건은 Reference room과 Test room이 동일하게 구현하여 똑같은 실내환경에서 실험되었다. 공조기기 작동 제어를 결정하는 실내온도 센서는 실내의 대표 온도 측정을 위해 정중앙에 설치하였다. 공조기 가동 제어 시간은 사무실 업무시간에 맞춰 오전 9시부터 오후 6시까지 총 9시간으로 설정하였다. 겨울철 난방 실험의 경우, 실내온도를 20 °C로 제어 및 유지하고 Dead band를 0.5 °C로 설정하여 19.5 °C 이하의 온도가 모니터링되면 공조 난방이 운전되고, 20.5 °C 이상 실내온도가 센싱되면 난방이 종료된다. 마찬가지로 여름철 냉방의 경우, 목표 실내온도를 26 °C로 설정하여 냉·난방 자동제어 시스템 제어를 운용하였다. 또한, 실외기를 통해 순환수를 가열 및 냉각하여 난방공급온도 45 °C, 냉방공급온도 10 °C로 각 실험 공간에 유량 7 LPM으로 공급하였다. TALS 복사냉난방은 사무실 업무시간 동안 스케줄 제어방식으로 작동한다. 냉난방 공조시스템의 열원은 실외기를 통해 냉각 및 가열되어 버퍼 탱크에 보관되고 FCU가 작동할 때 각 순환 펌프를 통해 실험실에 공급된다. 그림 5.5는 Test bed의 공조설비 계통도를 나타내었다. 펌프 제어는 제어 모듈을 사용해 작동되고 각 모듈 간의 연결은 파이프를 통해 이루어져 있다. Test bed 남측면은 창면으로 외기와 직접 면하여 일사와 바람의 영향을 직접 받고

나머지 벽면은 간접면으로 이루어져 있다. TALS 열전달은 난방 및 냉방 복사된 표면과 주변의 복사열 교환, 실내 상하 온도 차에 의한 자연대류에 의한 열교환이 일어나고, 공조시스템으로부터 취출되는 냉·난방 공기와 주위 공기와 교환되는 강제 대류 열교환이 있다.

본 장에서는 TALS 적용 유·무에 따른 냉난방 에너지 사용 저감량을 정량적으로 비교 분석하기 위해 Test bed 실증 실험을 통해 계절에 따른 냉난방 에너지사용량을 평가하였다. 냉난방 에너지사용량은 냉난방기기의 제어에 따른 전력사용량을 도출하여 냉난방 환경 기반의 TALS 에너지 소비 절감량을 평가한다. 냉난방 에너지사용량 분석은 열원을 가열 및 냉각하는 히트펌프와 순환 펌프(반송동력)의 에너지사용량은 Test room과 Reference room에 동일하게 적용되기 때문에 본 연구에서는 제외하였고, 냉난방수 입출구 온도차의 열량과 FCU 전기소비량을 합산한 결과를 비교분석하였다.

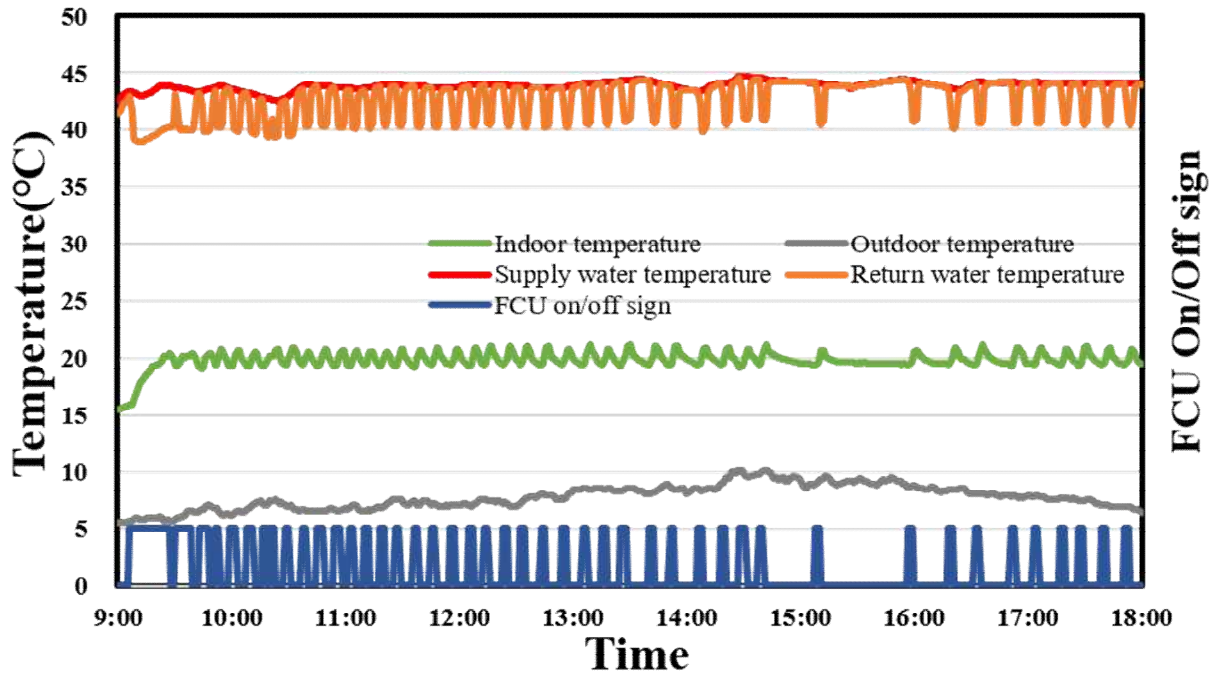


[그림 5.5] 공조시스템 설비계통도

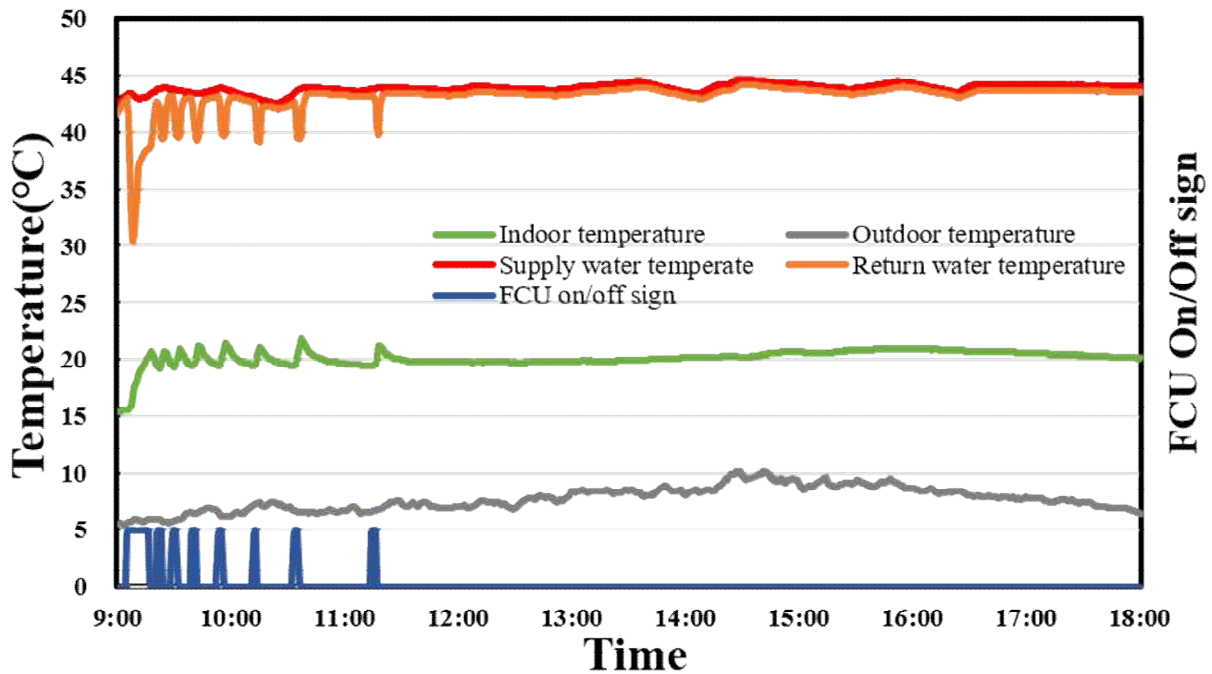
5.3.1 난방 에너지사용량 비교분석

TALS 난방 에너지사용량 절감 효과를 분석하기 위해 먼저 광선반 복사냉·난방과 FCU 공조냉·난방이 이루어지는 Test room과 일반적인 공조 냉·난방만 되는 Reference room을 설정하였다. 공조시스템은 정풍량으로 공조되고 난방기간 동안 사용되는 에너지 소비량을 최소화하기 위해 FCU on/off 신호로 제어된다. 작동 신호는 실내온도 20 ℃, Dead band 0.5 ℃로 겨울철 난방시 실내온도가 19.5 ℃ 이하가 센싱되면 공조 난방이 작동하고 20.5 ℃ 이상이 되면 작동이 멈춘다. 모니터링 측정기간 동안 FCU 시스템의 on/off가 빈번하게 이루어졌다. 시스템의 설정 조건에 따라 에너지사용량에 큰 영향을 주기 때문에 시스템 설정 조건은 매우 중요하다. 본 연구에서는 공조시스템에 공급되는 난방수 입출구 온도 차의 열량을 에너지사용량으로 고려하고 FCU 사용시간에 따른 소비전력을 산출한다. 각 실험 공간의 열량을 산출하기 위해 급수온도와 환수온도 및 펌프 유량을 측정하였다.

겨울철 난방 에너지사용량 실험은 최저외기온도 0.99 ℃를 기록한 3월 20일 수행되었다. 공조 난방과 TALS 복사난방 가동 스케줄은 사무실 재실 시간인 오전 9시부터 오후 6시까지 운전하였다. 특히, 공조 난방은 설정 실내온도 불만족 시 가동되었고, TALS 복사난방은 재실 시간 내내 운영되었다. 그림 5.6를 보면, Reference room 난방시스템 제어 결과와 열원의 급·환수 온도 및 유량과 실내·외 온도를 나타내었다. 마찬가지로 그림 5.7는 Test room의 난방시스템 제어 결과를 정리하였다. Reference room의 경우, 남쪽의 창면을 통한 열손실이 많이 발생하여 FCU on/off 제어 신호가 연속적으로 일어나 실내온도의 하강 및 상승이 빈번하게 일어나는 것을 알 수 있다. 반면, Test room은 외주부에서 TALS가 복사난방 열을 전달하여 열손실을 줄이고 난방 부하를 감소시켜 FCU 가동시간이 줄어들며 일정한 실내온도를 유지하는 것으로 나타났다.



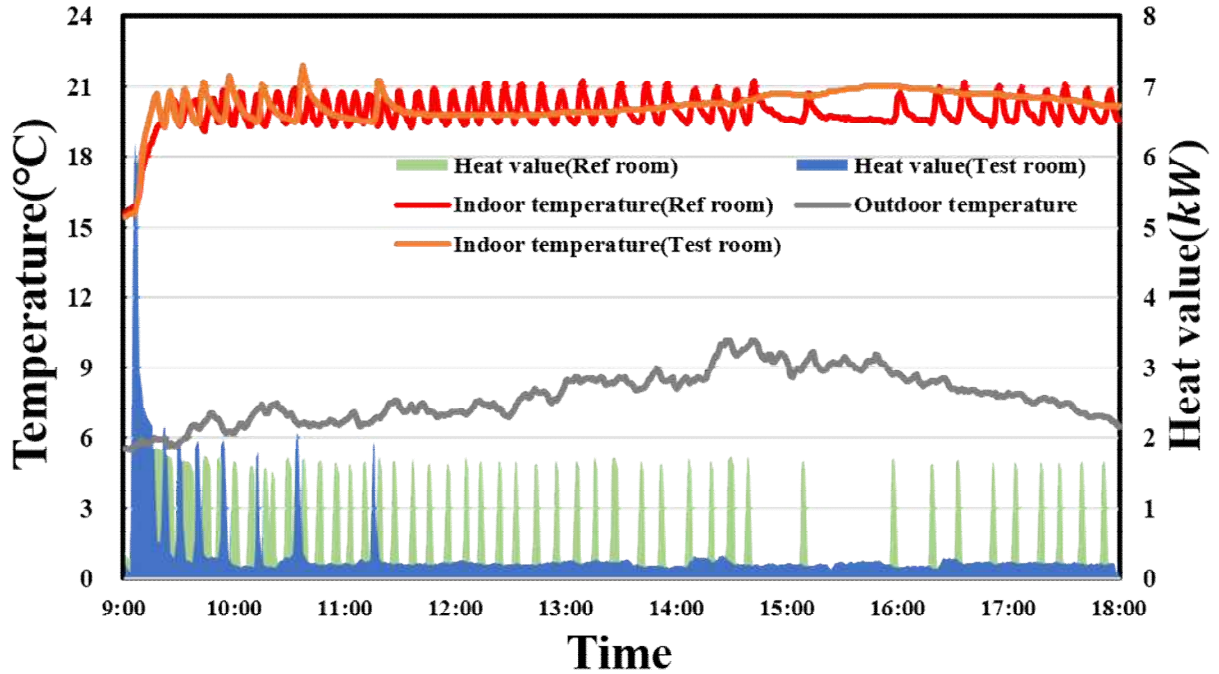
[그림 5.6] 겨울 Reference room 난방시스템 제어특성



[그림 5.7] 겨울 Test room 난방시스템 제어특성

TALS의 Test room의 겨울철 난방시스템은 오전 9시부터 11시 20분까지 공조기 가동이 이루어졌고, 이후의 시간대는 TALS 복사난방열로 실내온도 20 °C를 유지하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 9시 초반 시간대에 환수온도의 경우 30 °C로

Reference room에 비해 낮은 것으로 확인되었지만, 이는 TALS 복사열 가열로 인한 열량의 차이가 발생한 것으로 보인다. 또한, Test bed는 정유량 밸브가 설치되지 않아 순환수 유량이 미세하게 차이가 발생한다.



[그림 5.8] Reference & Test room 난방시스템 제어특성 비교

공조 난방 열량 비교결과는 그림 5.8과 같다. Reference room의 열량은 공조기 on/off sign과 유사한 패턴으로 오전 9시부터 오후 6시까지 발생하였고, Test room은 오전 9시에 집중적으로 공조 에너지가 사용되었고, 기저부하처럼 순환수 입·출구 온도 차에 의한 열량이 발생하고 있다. 공조 난방을 위한 FCU 에너지 소비량 산출은 가동시간에 따른 소비전력(28w)을 환산하여 결과를 표 5.6과 표 5.7에 정리하였다. Non-TALS의 Reference room의 일간 가동시간은 2시간 45분 45초로 일간 0.077 kWh를 소비한다. TALS의 Test room의 일간 가동시간은 32분 6초로 일간 0.015 kWh를 소비되었다. 외주부에 설치된 TALS는 겨울철 복사난방을 통해 실내온도를 증가시키고 공조 난방 운용 횟수와 시간을 감소시켜 FCU 소비 전력량을 약 80% 절감하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

<표 5.6> 겨울철 Reference room FCU 일간 소비전력량(Non-TALS)

시간	가동횟수	가동시간	에너지 소비량(kWh)
09:00-09:59	9	39분 40초	0.019
10:00-10:59	15	27분 35초	0.013
11:00-11:59	14	21분 08초	0.010
12:00-12:59	12	18분 06초	0.008
13:00-13:59	10	16분 04초	0.007
14:00-14:59	8	13분 04초	0.006
15:00-15:59	3	5분 35초	0.003
16:00-16:59	7	9분 29초	0.004
17:00-17:59	10	15분 04초	0.007
합계	88회	2시간 45분 45초	0.077 kWh

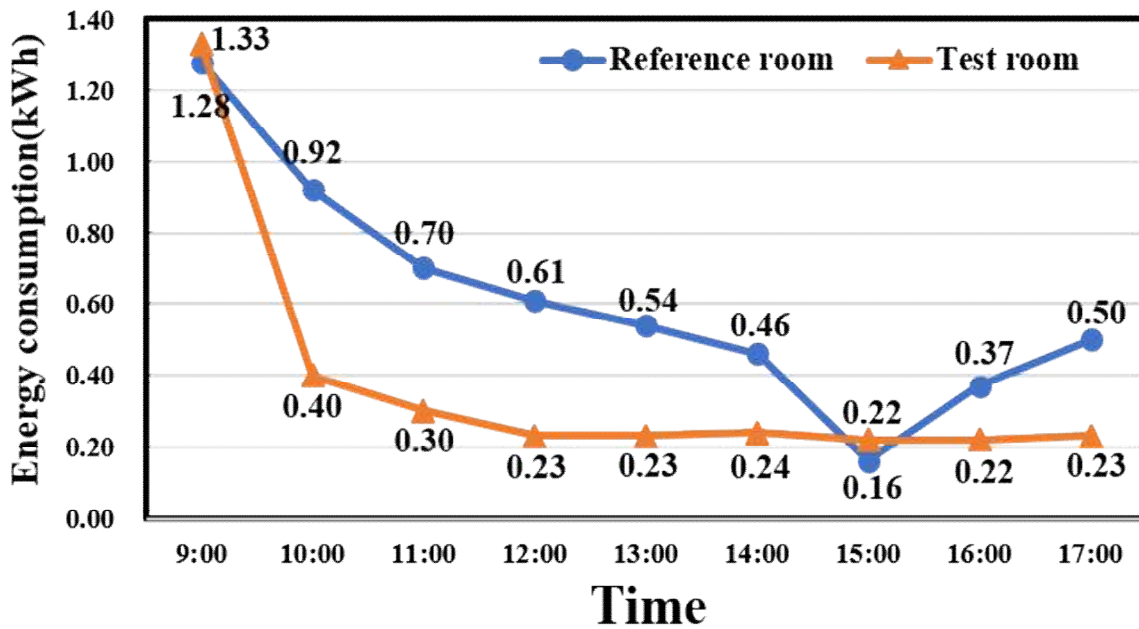
<표 5.7> 겨울철 Test room FCU 일간 소비전력량(TALS)

시간	가동횟수	가동시간	에너지 소비량(kWh)
09:00-09:59	10	24분 05초	0.011
10:00-10:59	4	5분 02초	0.002
11:00-11:59	2	2분 59초	0.001
12:00-12:59	-	-	-
13:00-13:59	-	-	-
14:00-14:59	-	-	-
15:00-15:59	-	-	-
16:00-16:59	-	-	-
17:00-17:59	-	-	-
합계	16회	32분 6초	0.015 kWh

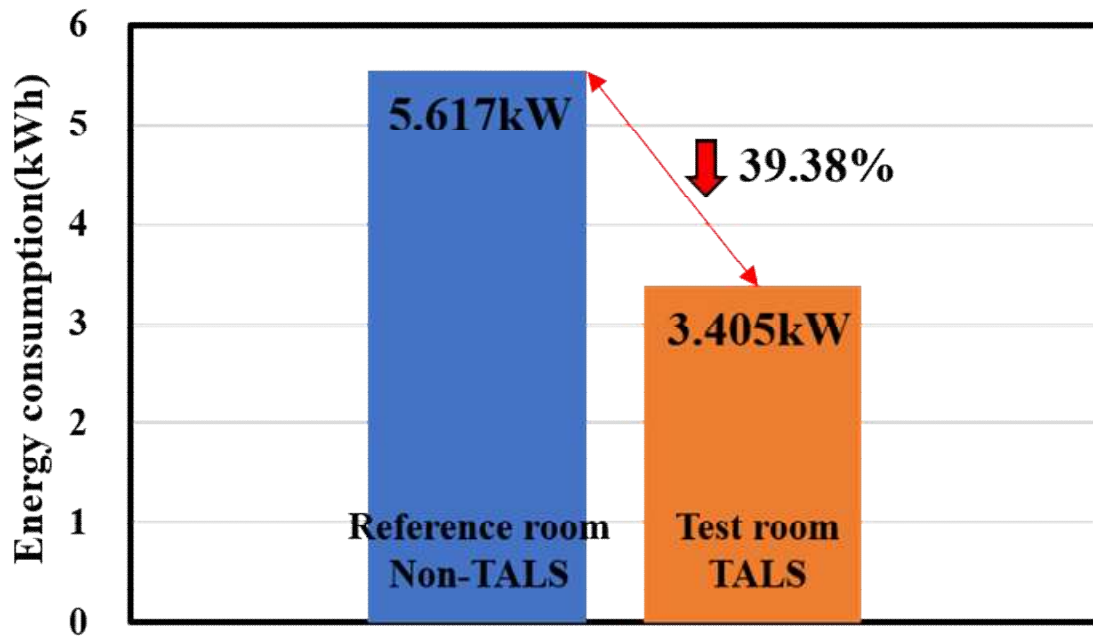
겨울철 난방에너지 실험 결과(표 5.8), FCU 난방만으로 실내온도를 유지하는 Reference room의 일간 난방에너지 사용량은 5.54 kWh 로 나타났다. TALS 복사난방과 FCU 공조 난방이 되는 Test room의 일간 난방에너지 사용량은 3.39 kWh 로, 대조군에 비해 38.8 % 에너지 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 그림 5.9는 겨울철 실험에서 소비된 에너지를 시간별로 정리한 데이터이다. 겨울철 난방에 사용된 열량과 FCU 소비전력량을 합산한 총 난방에너지 사용량을 비교하면(그림 5.10), Test room은 3.405 kWh , Reference room은 5.617 kWh 로 약 39.38 % 에너지 절감 효과가 있는 것으로 증명되었다.

<표 5.8> 겨울 난방 열량 사용량 비교

시간	Reference room(Non-TALS)				Test room(TALS)			
	LPM	입구(°C)	출구(°C)	열량(kWh)	LPM	입구(°C)	출구(°C)	열량(kWh)
9	6.86	43.50	40.83	1.28	6.86	43.47	40.70	1.33
10	6.88	43.37	41.45	0.92	6.88	43.33	42.50	0.40
11	6.88	43.80	42.34	0.70	6.88	43.76	43.14	0.30
12	6.87	43.87	42.60	0.61	6.87	43.83	43.36	0.23
13	6.87	44.14	43.01	0.54	6.87	44.09	43.62	0.23
14	6.87	44.19	43.26	0.46	6.87	44.16	43.66	0.24
15	6.87	44.11	43.81	0.16	6.87	44.07	43.61	0.22
16	6.88	44.01	43.26	0.37	6.88	43.99	43.53	0.22
17	6.87	44.11	43.07	0.50	6.87	44.07	43.60	0.23
비교	Non-TALS: 5.54 kWh, TALS: 3.39 kWh (38.8% 저감)							



[그림 5.9] 시간에 따른 겨울철 난방에너지 사용량



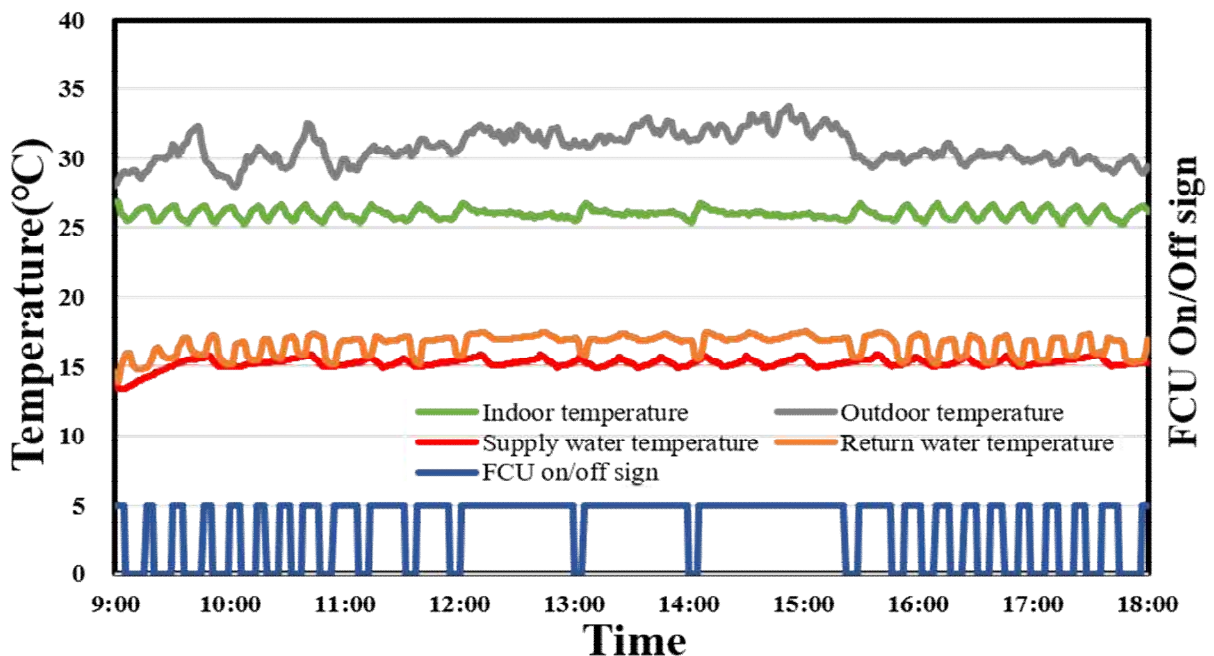
[그림 5.10] 겨울철 난방에너지 일 사용량 비교

광선반 복사난방 기능은 실내온도 상승시키고 난방 공조에너지 사용량을 절감시켜 본 연구에서 제시하는 복사냉난방 복합형 광선반 개발의 유효성을 검증하였다. 본 연구에서는 Test bed 실증 실험으로 인체의 현열과 잠열 및 구조체의 관류, 침기, 환기에 의한 열손실을 고려하지 못했지만, 이에 대한 자세한 실험과 고찰을 통해 더 정확한 에너지사용량에 대한 연구가 필요하다. 또한, 시스템 실용화를 위한 대류, 복사 각각의 열전달 효율 및 제거 열량에 대한 검토를 통해 실험의 정확성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

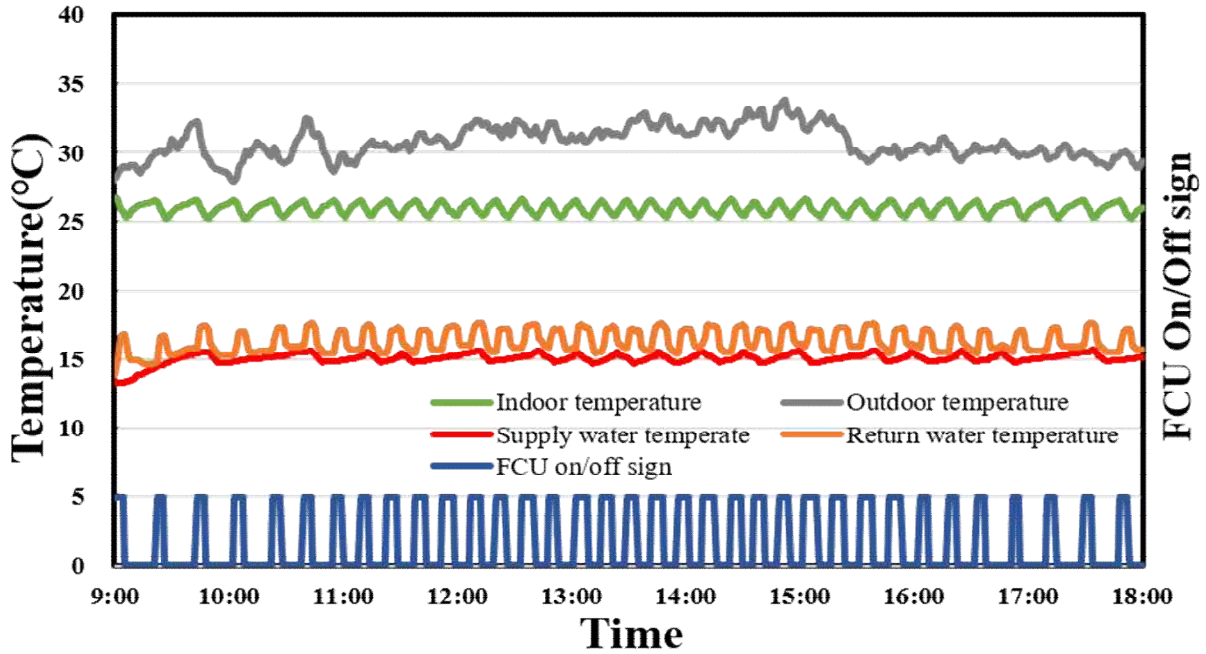
5.3.2 냉방 에너지사용량 비교분석

TALS는 여름철 냉방 열원을 공급받아 복사냉방을 하는데, 이는 외주부를 냉각하여 열적인 부하를 저감하여 공조 에너지사용량을 절감할 수 있을 것으로 기대된다. TALS 냉방 에너지사용량 절감 효과를 분석하기 위해 하지 절기에 다음의 조건으로 실험하였다. Test room은 TALS 복사냉방과 FCU 공조 냉방이 되는 환경을 만들고, Reference room은 FCU 공조 냉방으로만 실내 열환경이 제어되는 상황을 구현하였다. 여름철 실내온도 26℃ Dead band는 0.5 ℃로 설정하였고, FCU 공조 냉방은 정풍량으로 공급되며 실내온도에 따라 FCU on/off 자동으로 제어하였다. 에너지사용량 비교는 공조시스템에 공급되는 냉방 열원의 열량과 FCU 소비전력을 연산하여 결과를 정리한다.

여름철 냉방 에너지사용량 실험은 외기온도 34 ℃가 기록된 하지 절기에 오전 9시부터 오후 6시까지(사무실 재실시간) 실험되었고, Reference room과 Test room의 열환경 제어 특성 및 모니터링 데이터(실내·외 온도, 급·환수 열원 온도, FCU on/off sign)를 그림 5.11와 그림 5.12에 정리하였다.



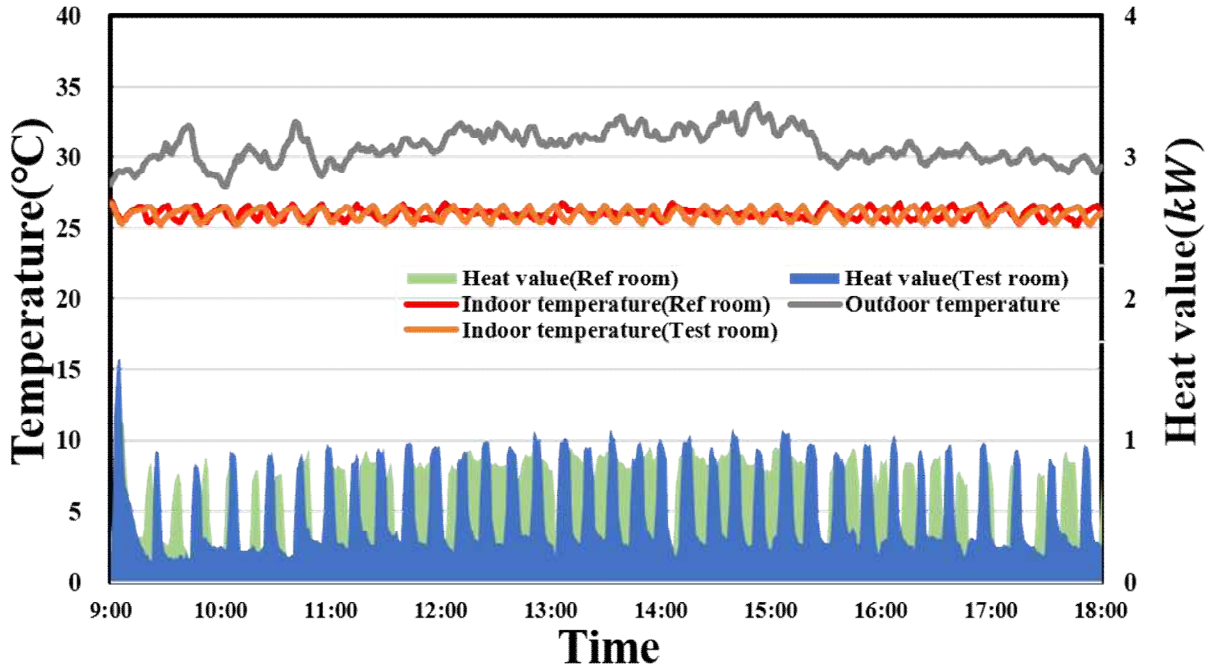
[그림 5.11] 여름 Reference room 냉방시스템 제어특성



[그림 5.12] 여름 Test room 냉방시스템 제어특성

그림의 파란색 선은 FCU on/off sign으로 실내로 유입되는 일사와 전도되는 열로 인해 Reference room은 정오부터 FCU가 연속적으로 운전되었음을 확인할 수 있고, 반면에 Test room은 TALS의 복사냉방의 외주부 냉각 효과로 부하를 감소시켜 FCU 가동시간이 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 여름철 냉방을 위해 공급되는 열원은 FCU와 TALS에서 열교환으로 공급온도보다 환수온도가 높게 나타났다. 실내 온도의 경우 FCU on/off에 따라 온도변화가 발생하지만, 목표 실내온도 26 °C를 일정하게 유지하는 것으로 관측되었다.

여름철 냉방을 위해 사용된 열량의 결과는 그림 5.13과 같다. 사용된 냉방 열량은 FCU 작동상태와 유사한 패턴으로 관측되었고, 연두색의 Reference room은 정오부터 FCU의 연속 운전으로 열량이 계속 사용되고 있음을 확인할 수 있다. 파란색의 Test room의 열량은 TALS에 공급되는 열원의 열교환으로 인해 피크가 더 크고 기저부하처럼 열량이 소비되지만, 총량으로 계산된 절대값은 작은 것으로 분석되었다.



[그림 5.13] Reference & Test room 냉방시스템 제어특성 비교

<표 5.9> 여름철 Reference room FCU 일간 소비전력량(Non-TALS)

시간	가동횟수	가동시간	에너지 소비량(kWh)
09:00-09:59	8	20분 05초	0.009
10:00-10:59	9	31분 06초	0.015
11:00-11:59	5	44분 01초	0.021
12:00-12:59	1	58분 01초	0.027
13:00-13:59	2	55분 01초	0.026
14:00-14:59	2	55분 02초	0.026
15:00-15:59	4	46분 01초	0.021
16:00-16:59	9	32분 01초	0.015
17:00-17:59	7	24분 04초	0.011
합계	47회	6시간 5분 22초	0.171 kWh

공조 냉방을 위한 FCU 에너지사용량 산출은 가동시간에 따른 소비전력을 환산하여 결과를 표 5.9와 5.10에 정리하였다. Non-TALS의 Reference room은 일간 6시간 5분 22초 동안 FCU가 가동되어 0.171 kWh 를 소비하고, TALS의 Test room은 일간 3시간 22분 31초 동안 운전되어 0.095 kWh 에너지가 사용되었다. TALS는 여름철 복사냉방을 통해 실내온도를 낮추고 공조 냉방을 위한 가동시간을 감소하여 FCU 소비 전력량을 약 44 % 절감하는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

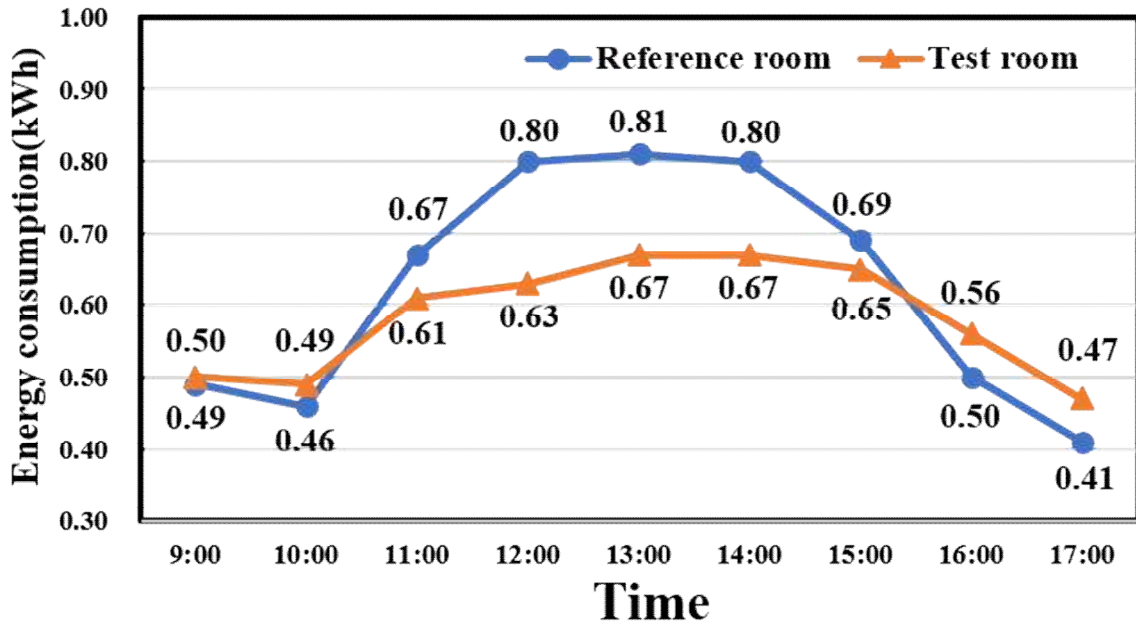
<표 5.10> 여름철 Test room FCU 일간 소비전력량(TALS)

시간	가동횟수	가동시간	에너지 소비량(<i>kWh</i>)
09:00-09:59	6	14분 02초	0.007
10:00-10:59	7	19분 43초	0.009
11:00-11:59	9	24분 25초	0.011
12:00-12:59	8	24분 06초	0.011
13:00-13:59	9	29분 44초	0.014
14:00-14:59	9	27분 23초	0.013
15:00-15:59	8	29분 01초	0.014
16:00-16:59	8	19분 03초	0.009
17:00-17:59	6	15분 04초	0.007
합계	70회	3시간 22분 31초	0.095 <i>kWh</i>

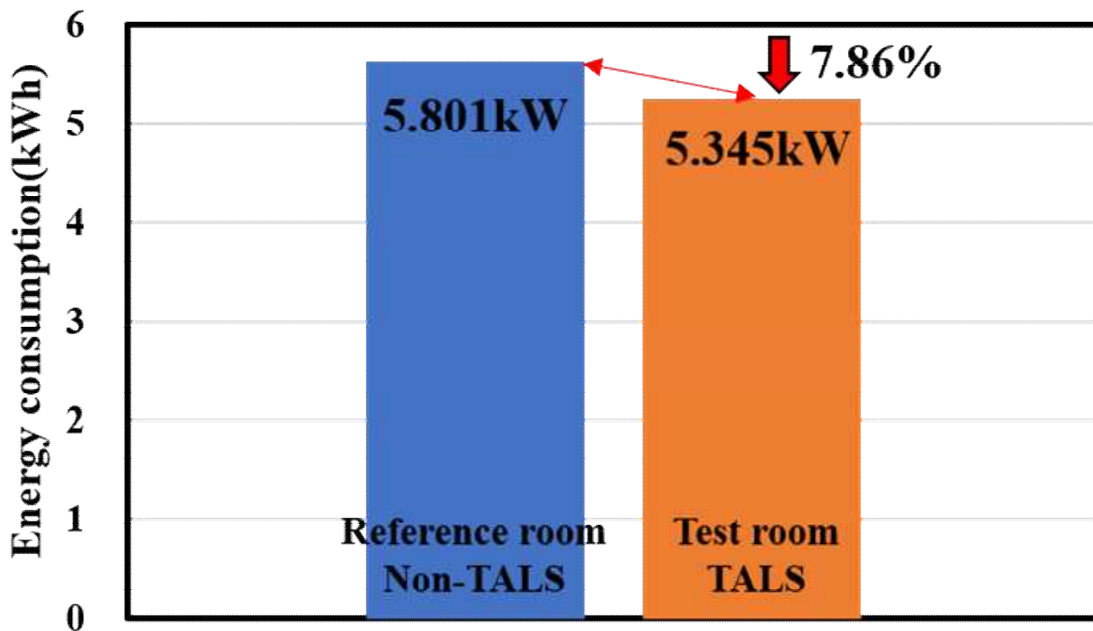
여름철 냉방에너지 실험 결과(표 5.11), FCU 냉방만으로 실내온도를 유지하는 Reference room의 일간 냉방에너지 사용량은 5.63 *kWh*이고, TALS 복사냉방과 FCU 공조 냉방이 되는 Test room의 일간 냉방에너지 사용량은 5.25 *kWh*로, 약 6.75 % 에너지 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 그림 5.14는 하지 실험에서 냉방에 사용된 열량을 시간별로 정리한 그래프이다. 여름철 냉방에 사용된 열량과 FCU 소비전력량을 합산한 총 냉방에너지 사용량을 비교하면(그림 5.15), Test room은 5.345 *kWh*, Reference room은 5.801*kWh*로 약 7.86 % 절감 효과가 있는 것으로 증명되었다.

<표 5.11> 여름 냉방 열량 사용량 비교

시간	Reference room(Non-TALS)				Test room(TALS)			
	LPM	입구(℃)	출구(℃)	열량(<i>kWh</i>)	LPM	입구(℃)	출구(℃)	열량(<i>kWh</i>)
9	6.67	14.74	15.79	0.49	6.67	14.60	15.68	0.50
10	6.71	15.31	16.30	0.46	6.71	15.16	16.21	0.49
11	6.71	15.25	16.69	0.67	6.71	15.11	16.42	0.61
12	6.71	15.37	17.08	0.80	6.71	15.23	16.59	0.63
13	6.71	15.23	16.97	0.81	6.71	15.09	16.53	0.67
14	6.71	15.33	17.04	0.80	6.71	15.19	16.62	0.67
15	6.71	15.33	16.79	0.69	6.71	15.18	16.58	0.65
16	6.71	15.26	16.33	0.50	6.71	15.11	16.31	0.56
17	6.71	15.38	16.25	0.41	6.71	15.23	16.23	0.47
비교	Non-TALS: 5.63 <i>kWh</i> , TALS: 5.25 <i>kWh</i> (6.75% 저감)							



[그림 5.14] 시간에 따른 여름철 냉방에너지 사용량



[그림 5.15] 여름철 냉방에너지 일 사용량 비교

5.4 소결

본 장에서는 제안된 복사냉난방 복합형 광선반 시스템(TALS)의 건물에너지 절감 효과를 정리한다. TALS 적용 유무에 따른 에너지 절감량을 비교하기 위해 동일한 실내환경의 Test room을 구축하였다. 조명에너지 분석은 DRDS 기술과 연계 운영하여 에너지 사용 절감량을 정량적으로 비교분석하고, 냉난방에너지 분석은 공조환경을 구현한 실증 실험을 통해 TALS 시스템의 냉난방 에너지 절감량을 검증하였다.

1) 조명에너지 월간 사용량 분석결과, 조명이 100 % 켜진 실험 공간의 월간 조명 에너지 사용량은 51.3 kWh로 나타났고, DRDS로 조명이 주광량에 따라 디밍되는 실험 환경에서는 13.73 kWh이 모니터링 되었다. TALS와 DRDS가 연계 운영되는 실험 공간의 조명에너지 사용량은 10.86 kWh로 관측되었다. TALS 본연의 조명에너지 절감 효과는 2.87 kWh로 나타났고, 전체 에너지의 5.6 %를 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, 천공상태에 따라 조명에너지 사용량의 차이가 나타나는데, 청천공 및 부분담천공 천공상태에서는 에너지 절감 효과가 매우 좋고, 담천공 상태에서는 효과가 미비한 것으로 나타났다.

2) TALS는 열적으로 활성화되어 복사냉난방이 가능한 광선반으로, 외주부 부하 감소와 공조 에너지 절감 효과를 검증하기 위해 겨울과 여름에 Test bed에서 실증 실험되었다. 난방에너지 일간 사용량 분석결과, TALS가 설치된 Test room은 3.405 kWh로 나타났고, Non-TALS의 Reference room은 5.617 kWh가 모니터링되어 TALS 복사난방으로 일간 2.212 kWh(약 39.38 %) 난방에너지가 감소하는 결과를 얻었다. 냉방에너지 일간 사용량 분석결과, TALS가 설치된 Test room은 5.345 kWh로 나타났고, Non-TALS의 Reference room은 5.801 kWh가 관측되어 TALS 복사냉방으로 일간 0.456 kWh(약 7.86 %) 냉방에너지가 절감되는 것으로 검증되었다.

3) TALS는 외피부하 저감, 열원 효율 향상, 건물에너지 및 온실가스 배출을 감소하는 기술로서, 친환경건축물 및 제로에너지 건축물 뿐만 아니라 기존 건축물에 적용 가능한 복합 시스템으로 건물 분야 에너지 절감에 매우 우수한 효과가 있다.

제6장 결론

본 연구에서는 실내 빛환경과 열환경을 개선할 수 있고 에너지 사용량을 절감할 수 있는 친환경 설비시스템 요소인 복사냉난방 복합형 광선반(TALS)을 개발하고 성능을 검증하였다. TALS의 빛환경 및 열환경 성능을 검증하기 위해 Test bed 실증 실험과 시뮬레이션을 실시하였다. 빛환경은 실내조도, 실내 균제도, 평균 주광률, 창면 휘도에 대해 실증적인 검토와 해석이 이루어졌다. 열환경은 실내온도, 수직온도차, 수직온도차에 의한 불쾌적 비율, 수평 온도, 예상온열감에 대해 실험과 시뮬레이션 되었다. 연구 대상인 사무실 공간을 배경으로 건물에너지 사용량을 실험하여 TALS의 에너지 절감 효과를 분석하였다.

본 연구를 통해 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

1) TALS 빛환경 성능평가 결과는 다음과 같다. TALS는 실내 외주부에 설치되어 직사 일광을 차단하는 역할과 주광을 내주부로 반사시켜 실내의 조도분포를 균일하게 조성하여 쾌적한 빛환경을 조성한다. 실내 평균 주광률을 향상해 밝은 실내를 유지하며 창면 휘도를 감소시켜 불쾌 glare 제어 효과가 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 TALS는 광선반 본연의 기능을 수행하여 빛환경 평가요소를 개선하고 시각적으로 쾌적한 빛환경을 조성할 수 있는 것으로 증명되었다.

2) TALS 열환경 성능평가 결과는 다음과 같다. TALS는 열획득과 열손실이 많이 발생하는 창면 및 외주부에서 복사냉난방열을 전달하여 열의 이동을 감소시키고 실내온도를 안정적으로 유지하는 것으로 확인되었다. 수직온도차와 불쾌적 비율은 실내 전체를 대표하는 실내 중앙 지점의 쾌적 범위가 개선되어 재실자가 쾌적한 열환경을 느낄 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, TALS 적용으로 수평 온도의 편차를 감소시켜 실내 전체적으로 균일한 온도환경을 조성하는 것으로 나타났고, 예상온열감 Category A 쾌적 범위가 약 3.7배 증가하는 것으로 관측되었다.

3) 건물에너지 절감효과는 다음과 같다. 조명에너지 사용량은 DRDS와 연계 운용되어 비교 분석하였다. DRDS 적용시 73.2 %의 조명에너지가 절감되었고, TALS+

DRDS 적용시 78.8 %의 조명에너지가 절감되었다. 광선반 본연의 조명에너지 절감율은 약 5.6 %로 나타났고, 청천공과 부분 담천공 조건에서 조명에너지 절감량이 증가하지만 담천공에서는 절감량이 감소하는 것으로 확인되었다. 난방에너지 절감율은 39.38 %, 냉방에너지 절감율은 7.86 %로 분석되어 TALS 복사냉난방 기술로 외주부 부하를 감소시키고 실내 온열환경을 개선하여 건물에너지 절감효과가 매우 우수한 것으로 증명되었다.

본 연구결과의 의의와 기대효과는 다음과 같은 측면이 있다.

첫째, 본 연구에서는 복사냉난방 복합형 광선반을 개발하고 성능을 검증한 연구로, TALS는 친환경건축물 구현에 필요한 패시브 요소와 액티브 요소가 결합된 설비요소이며, 건축환경설비 분야(열환경 및 빛환경 통합 조절)의 원천기술을 확보한 기술이다. 본 연구에서 수행한 성능검증을 통해 TALS 시스템의 운전 매커니즘을 제안하고 열쾌적 및 냉난방에너지 절감 효과, 빛환경 개선 및 조명에너지 절감효과를 정량적으로 규명하여 TALS 적용과 운용에 대한 기초자료를 제시할 수 있으며 복사냉난방 광선반에 대한 기술 표준 제안과 기술 확장이 가능하다.

둘째, 경제적 측면에서 국가 에너지 절약 정책에 부응할 수 있다. 제로에너지 건축물 구현에 필수적인 패시브 요소와 액티브 요소를 결합한 솔루션을 제공하여 건물 분야 에너지 소비량 절감에 기여할 수 있다. TALS는 외피 부하를 저감하고 열원 효율 향상 및 에너지 절감을 통해 건물 운용비용 절감에 기여하며, 재실자 쾌적성을 향상시켜 생산성을 증대할 것으로 기대된다. 환경이 개선된 외주부 공간을 활용하여 건축물 경제성 향상이 가능하다.

셋째, 산업적 측면에서는 건축환경설비 분야 산업 고도화가 가능하다. 복사냉난방 시스템의 용도와 적용 범위를 확대할 수 있고, 열환경 및 빛환경 조절시스템이 패키지화된 상품 개발을 유도할 수 있다. 또한, 건물 용도와 유형에 따른 TALS 시스템 개발이 가능하다. 또한, 제로에너지 건축물 의무화 대상 공공건축물(공공기관 2020년, 민간 2025년)^[146]에 적용이 가능한 기술력으로 제안할 수 있다. 세계 제로에너지 건축 시장규모는 연평균 45 % 성장하며, 국내 제로에너지 건축 시장 규모도 전체의 30 %까지 성장할 것으로 예상되어 약 30조원의 산업 규모가 될 것

으로 전망되어 산업적 성장에 매우 크게 기여할 것으로 예상된다^[147].

넷째, 사회적 측면으로는 한국판 그린 뉴딜의 그린 리모델링 적용기술로 활용하여 기존 건축물 외피 성능을 개선에 활용될 수 있으며 기존 공조설비에 병렬시스템으로 적용하여 실내 환경 제어 성능을 향상시킬 수 있다. 외피 부하의 비중이 큰 상업용 건물의 기존 공조설비와 연계시킬 경우 대대적인 설비 공사 없이 건물 냉난방에너지를 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 관련 산업 확대와 국가 에너지 정책 및 세계 온실가스 배출 목표 달성 부응이 가능하다.

본 연구에서 개발한 TALS 시스템은 현재 실험실 단에서 실증되어 우수한 성능이 검증되었지만, 실제 사무실 공간에 적용할 수 있도록 다양한 환경 변인에 대한 정량적·정성적 평가 이루어져야 한다. TALS와 연계된 광센서 조광제어 시스템은 천공조건에 따라 조명에너지 절감량 차이가 크게 발생하는데, 담천공 조건에서 조명에너지 절감을 위한 운용 방법에 대한 고찰이 필요하다. 또한, TALS 복사냉난방 운용 최적화 방법론을 도출하여 쾌적한 실내 온열환경 조성 과 에너지 소비량 절감 효과에 대한 검증이 필요하다. 마지막으로, TALS 적용과 운용에 대한 경제성을 분석하여 녹색 건축 설계 요소로서 실제 건축물 적용 효과에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] UN climate change conference UK 2021. <https://ukcop26.org/>
- [2] García-Sanz-Calcedo, J., & López-Rodríguez, F. (2017). Analysis on the performance of a high efficiency administrative building in Spain. *International Journal of Green Energy*, 14(1), 55-62.
- [3] Energy Efficiency and Renewable Energy. 2018 Renewable Energy Data Book. <http://www.energy.gov/eere/analysis/downloads/2018-renewable-energy-data-book>
- [4] U.S. Energy Information Administration. Use of Energy Explained. <http://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/commercial-buildings.php>
- [5] Seoul Energy Dream Center. Commercialization of Green Building Remodeling Project for Private Buildings. In *Building Energy Seminar*; Seoul Energy Dream Center: Seoul, Korea, 2015.
- [6] Korea energy agency. 2016 energy consumption statistics. <http://www.kemco.or.kr>
- [7] Korean energy economics institute. 2015. 대학 캠퍼스 건물의 에너지 효율 개선 방안 연구 ISBN 978-89-5504-531-4 93320.
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2016. 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.
- [9] Ministry concerned, 2030 greenhouse gas reduction roadmap amendment, Government's Press Release, 2018. <http://energytransitionkorea.org>
- [10] 김종민 외(2003). 건물파사드에 관한 실측조사 연구. *한국태양에너지학회 논문집*, 23(4), 71-80.
- [11] Ralegaonkar, R. V., & Gupta, R. (2010). Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(8), 2238-2242.
- [12] Sbar, N. L., Podbelski, L., Yang, H. M., & Pease, B. (2012).

Electrochromic dynamic windows for office buildings. *International Journal of sustainable built environment*, 1(1), 125-139.

[13] Schiavon, S., Lee, K. H., Bauman, F., & Webster, T. (2010). Influence of raised floor on zone design cooling load in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 42(8), 1182-1191.

[14] Chaloeitoy, K., Ichinose, M., & Sasaki, R. (2019, July). Comparing the occupants' comfort between perimeter zone and interior zone in Asian office. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 294, No. 1, p. 012075). IOP Publishing.

[15] 문소원, 김태우, 장덕수, & 홍원화. (2009). 오피스 빌딩의 실내 환경측정과 재실자의 주관적 평가에 관한 연구: 계절별 (하계, 중간기) 실내온도변화를 중심으로. *대한건축학회 논문집-계획계*, 25(5), 279-286.

[16] 김광호, & 김병선. (2005). 소규모 유리외피 사무소 빌딩 사례를 통한 온열 환경과 냉방부하 저감방안에 관한 연구. *대한건축학회 논문집-계획계*, 21(8), 187-196.

[17] Illuminating Engineering Society of North America. (2000). *Lighting handbook: Reference & application*. Illuminating Engineering.

[18] Velds, M. (2001). Assessment of lighting quality in office rooms with daylighting systems. Dr. degree. Technische Universiteit Delft, Netherlands

[19] Osterhaus, W. K. (2005). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*, 79(2), 140-158.

[20] Slopach, M. (2011). The Impact of a Window in the Classroom on Learning as Perceived by Students and Teachers. Dr. degree. Central Michigan University, United States.

[21] Lee, H. (2020). A Basic Study on the Performance Evaluation of a Movable Light Shelf with a Rolling Reflector That Can Change Reflectivity to Improve the Visual Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8338.

[22] Dogan, T., & Stec, P. (2018). Prototyping a façade-mounted, dynamic, dual-axis daylight redirection system. *Lighting Research & Technology*, 50(4), 583-595.

- [23] 국토교통부 국토교통과학기술진흥원(2014). 녹색 건축물 설계 실천 메뉴얼
- [24] Mangkuto, R. A., Feradi, F., Putra, R. E., Atmodipero, R. T., & Favero, F. (2018). Optimisation of daylight admission based on modifications of light shelf design parameters. *Journal of Building Engineering*, 18, 195-209.
- [25] Ebrahimi-Moghadam, A., Ildarabadi, P., Aliakbari, K., & Fadaee, F. (2020). Sensitivity analysis and multi-objective optimization of energy consumption and thermal comfort by using interior light shelves in residential buildings. *Renewable Energy*, 159, 736-755.
- [26] Claros, S. T., & Soler, A. (2001). Indoor daylight climate-comparison between light shelves and overhang performances in Madrid for hours with unit sunshine fraction and realistic values of model reflectance. *Solar energy*, 71(4), 233-239.
- [27] Claros, S. T., & Soler, A. (2002). Indoor daylight climate-influence of light shelf and model reflectance on light shelf performance in Madrid for hours with unit sunshine fraction. *Building and Environment*, 37(6), 587-598.
- [28] 최봉철. (2002). 다양한 천공조건에 대한 광선반 시스템의 성능. 한양대학교 석사학위논문.
- [29] 김정태, 신현구, & 김곤. (2003). 광반사를 이용한 광선반 채광시스템의 기본형상 설계 및 성능평가에 관한 연구. *대한건축학회 논문집-계획계*, 19(3), 177-184.
- [30] Al-Sallal, K. A. (2006). Easing high brightness and contrast glare problems in universal space design studios in the UAE: Real models testing. *Renewable energy*, 31(5), 617-630.
- [31] 정유근. (2007). 창호일체형 광선반 시스템 채광성능 평가. *한국생태환경건축학회 논문집*, 7(5), 41-46.
- [32] 김동수, 윤종호, 신우철, & 이광호. (2011). 광선추적기법을 활용한 곡면형 광선반시스템 설계 및 채광성능 평가. *한국태양에너지학회 논문집*, 31(4), 136.
- [33] Raphael, B. (2011). Active control of daylighting features in buildings. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(5), 393-405.

- [34] 채우리. (2013). 광선반의 크기 및 각도 변화에 따른 채광성능평가 기초연구. 국민대학교 석사학위논문.
- [35] Lim, Y. W., & Ahmad, M. H. (2015). The effects of direct sunlight on light shelf performance under tropical sky. *Indoor and Built Environment*, 24(6), 788-802.
- [36] Lim, Y. W., & Heng, C. Y. S. (2016). Dynamic internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings. *Building and Environment*, 106, 155-166.
- [37] Meresi, A. (2016). Evaluating daylight performance of light shelves combined with external blinds in south-facing classrooms in Athens, Greece. *Energy and Buildings*, 116, 190-205.
- [38] Moazzeni, M. H., & Ghiabaklou, Z. (2016). Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in Tehran, Iran. *Buildings*, 6(3), 26.
- [39] Lee, H., Seo, J., & Choi, C. H. (2019). Preliminary study on the performance evaluation of a light shelf based on reflector curvature. *Energies*, 12(22), 4295.
- [40] 백정엽, & 장성주. (2021). 렌즈 및 확산필름을 이용한 광선반의 성능개선 방식. *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, 41(1), 678-681.
- [41] 박훈, 정유근, & 김정태. (2012). PV 일체형 태양광발전 광선반시스템의 성능평가. *한국생태환경건축학회 논문집*, 12(6), 129-134.
- [42] 이종수. (2013). 폴리카보네이트 광선반의 채광 및 에너지 성능평가에 관한 연구. *경희대학교 박사학위논문*.
- [43] 김상훈, 김용성, 이행우, & 서장후. (2014). 에너지 저감을 위한 주거공간 내 위치인식기술 적용 광선반 시스템 개발연구. *설비공학논문집*, 26(6), 275-286.
- [44] Hwang, T., Kim, J. T., & Chung, Y. (2014). Power performance of photovoltaic-integrated lightshelf systems. *Indoor and Built Environment*, 23(1), 180-188.
- [45] 이행우, 서장후, & 김용성. (2015). 결정면 적용 광선반 채광성능 평가 연구. *설비공학논문집*, 27(8), 395-401.

- [46] 김기훈, 성민기, & 최안섭. (2016). PV 일체형 분할 광선반 시스템을 이용한 실내 조광 활용도 및 발전 효율 향상 검토. 한국생활환경학회지, 23(6), 793-798.
- [47] 정성권, 문진우, & 김수영. (2017). 소규모 사무실 공간에서 광선반 디자인 형태에 따른 디밍 시스템 제어효과. 한국생활환경학회지, 24(1), 87-94.
- [48] 김정민, 이행우, 서장후, & 김용성. (2018). PV 부착 광선반의 채광성능 및 에너지 저감 기초 연구. 설비공학논문집, 30(8), 376-387.
- [49] 장민우. (2018). 프리즘시트 적용 광선반 채광성능에 관한 연구. 국민대학교 석사학위논문.
- [50] Kim, K., Lee, H., Jang, H., Park, C., & Choi, C. (2019). Energy-saving performance of light shelves under the application of user-awareness technology and light-dimming control. Sustainable Cities and Society, 44, 582-596.
- [51] Bahdad, A. A. S., Fadzil, S. F. S., & Taib, N. (2020). Optimization of daylight performance based on controllable light-shelf parameters using genetic algorithms in the tropical climate of malaysia. Journal of Daylighting, 7(1), 122-136.
- [52] 윤연주, 백용규, & 김수영. (2020). 개인 사무실 공간의 조광제어 시스템 성능에 대한 광선반의 영향. 한국문화공간건축학회논문집. 1(70), 157-164.
- [53] 김덕우, & 박철수. (2009). 외피 친환경 성능평가 II: 광선반, RetroLux. 한국태양에너지학회 학술대회논문집, 83-90.
- [54] 전강민. (2015). 광선반에 의한 조명 및 냉난방에너지 저감에 관한 기초연구. 국민대학교 석사학위논문.
- [55] Lee, H., Kim, K., Seo, J., & Kim, Y. (2017). Effectiveness of a perforated light shelf for energy saving. Energy and Buildings, 144, 144-151.
- [56] Lee, H., Jang, H. I., & Seo, J. (2018). A preliminary study on the performance of an awning system with a built-in light shelf. Building and Environment, 131, 255-263.
- [57] Mesloub, A., & Ghosh, A. (2020). Daylighting performance of light shelf photovoltaics (LSPV) for office buildings in hot desert-like regions. Applied Sciences, 10(22), 7959.

- [58] Beltran, L.O., E.S. Lee, K.M. Papamichael, and S.E. Selkowitz. (1994). "The Design and Evaluation of Three Advanced Daylighting Systems: Light Shelves, Light Pipes, and Skylights." Proceedings from the ASES 19th National Passive Solar Conference, June 25-30, 1994, San Jose, CA. LBNL-34458. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [59] Littlefair, P. J. (1995). Light shelves: computer assessment of daylighting performance. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 27(2), 79-91.
- [60] Lee, E.S., L.O. Beltran, S.E. Selkowitz, H.Lau G.D. Ander. (1996). Demonstration of a Light Redirecting Skylight System at the Palm Springs Chamber of Commerce. In *Proceedings of the ACEEE 1996 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 4 : 229-241. Washington, D.C.: American
- [61] Soler, A., & Oteiza, P. (1996). Dependence on solar elevation of the performance of a light shelf as a potential daylighting device. *Renewable energy*, 8(1-4), 198-201.
- [62] Soler, A., & Oteiza, P. (1997). Light shelf performance in Madrid, Spain. *Building and Environment*, 32(2), 87-93.
- [63] 조일식, 김기세, 윤종호, & 이진숙. (2001). Lightscape를 이용한 광선반의 주광성능 해석 및 평가. *한국태양에너지학회 학술대회논문집*, 61-70.
- [64] 김기철. (2004). 경사형 광선반 채광시스템의 개발 및 채광성능평가에 관한 연구. *경희대학교 석사학위논문*.
- [65] 김태형. (2006). 학교건물 자연채광용 광선반 시스템의 성능평가 연구, *한밭대학교 석사학위논문*.
- [66] 한은수, 육대근, 진경일, & 윤종호. (2008). 광선반의 불쾌현황에 대한 대책 연구. *한국건축친환경설비학회 학술발표대회 논문집*, 246-250.
- [67] Freewan, A. A., Shao, L., & Riffat, S. J. S. E. (2008). Optimizing performance of the lightshelf by modifying ceiling geometry in highly luminous climates. *Solar Energy*, 82(4), 343-353.
- [68] 고용노동부(2018). 근로기준법 제 50조
- [69] 국토교통부. 국토교통부고시 제2017-881호. 건축물의 에너지절약설계기준 (2018)

- [70] KONICA MINOLTA. T-10A and T-10MA Illuminance Meters.
https://sensing.konicaminolta.us/us/products/t-10a_t-10ma-illuminance-meters
- [71] JIS C 1609-1. 6th edition(2020). Illuminance meters Part 1: General measuring instruments
- [72] 하이랜드 코리아. 동영상 휘도계.
http://www.hi-landkorea.com/product/product01_1.html
- [73] TESTO 400 PMV meter.
<https://www.testo.com/kr-KR/seumateu-dagineung-jonghab-hwangyeong-ceugjeonggi-testo-400-pmv-ceugjeong-seteu-iaq-kwaejeogdo/p/0563-0401>
- [74] ISO 7243(2017). Ergonomics of the thermal environment. Assessment of heat stress using the WBGT(Wet Bulb Globe Temperature) index.
- [75] ISO 7726(1998). Ergonomics of the thermal environment. Instruments for measuring physical quantities.
- [76] DIN 33403(2011). Climate at the workplace and its environments. Part 3: Assessment of the climate in the warm and hot working areas based on selected climate indices.
- [77] ASHRAE standard 55(2020). Thermal environmental conditions for human occupancy
- [78] FLIR C2 열화상카메라. <https://www.flirkorea.com/product/c2/>
- [79] 한국표준협회(2015). KS C 9306(에어컨디셔너)
- [80] Wang, Z., & Tan, Y. K. (2013). Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm. Energy and Buildings, 62, 514-521
- [81] Caicedo, D., Pandharipande, A., & Willems, F. M. (2014). Daylight-adaptive lighting control using light sensor calibration prior-information. Energy and Buildings, 73, 105-114.
- [82] Yoo, S., Kim, J., Jang, C. Y., & Jeong, H. (2014). A sensor-less LED dimming system based on daylight harvesting with BIPV systems. Optics Express, 22(101), A132-A143.
- [83] Gentile, N., Laike, T., & Dubois, M. C. (2016). Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of

electricity savings and occupants' satisfaction. *Solar Energy*, 127, 113-123.

[84] Kim, I. T., Kim, Y. S., Nam, H., & Hwang, T. (2018). Advanced Dimming Control Algorithm for Sustainable Buildings by Daylight Responsive Dimming System. *Sustainability*, 10(11), 4087.

[85] Kim, I. T., Kim, Y. S., Cho, M., Nam, H., Choi, A., & Hwang, T. (2019). High-performance accuracy of daylight-responsive dimming systems with illuminance by distant luminaires for energy-saving buildings. *Energies*, 12(4), 731.

[86] KS A 3011. Jap Recommended Levels of Illumination; The Korean Standards Association (KSA): Seoul, Korea, 1998.

[87] JIS Z 9110. Recommended Levels Illumination; Japanese Industrial Standards Committee: Tokyo, Japan, 2010.

[88] Illumination Engineering Society. *The Lighting Handbook*, 10th ed.; Illuminating Engineering Society (IES): New York, NY, USA, 2011.

[89] GB 50034-2013. Standard for Lighting Design of Buildings; China Lighting Standards: Beijing, China, 2014.

[90] EN 12464-1: 2002. Light and Lighting-Lighting of Work Places. Part 1: Indoor Work Places; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2002.

[91] 유성은, & 하미경. (2011). 직무 만족도에 영향을 미치는 물리적 환경 특성 분석: 오픈 플랜 오피스의 사무가구, 실내환경, 공간계획 특성을 중심으로. *대한건축학회 논문집-계획계*, 27(8), 131-138.

[92] Gifford, R., & Roth, V. (2007). The university faculty office as an environment, *Environment and Behavior*, 12, 467-477.

[93] 일본 건설성 건축연구소. 오피스 실내환경평가법 규제도 기준

[94] 조용상(2001). 조명기구 반사각의 반사율 변화에 따른 조도 분포 및 규제도에 관한 연구. *홍익대학교 석사학위 논문*

[95] 이정은, & 최안섭. (2005). 주거공간의 실내공간별 조도기준을 위한 빛환경 연구. *조명·전기설비학회논문지*, 19(3), 1-9.

[96] 한국표준협회 KS 핸드북(조명(1)) 기준

- [97] USGBC 친환경건축물 가이드라인 창면휘도 기준
- [98] Stein. B., J.S.Reynolds., (1992). Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, Wiley.
- [99] McGuinness Stein Reynolds(1980), “Mechanical and Electrical Equipment for Building” 6th Edition John Willey & Sons.
- [100] 일본건축학회(1963). 채광설계 사무실 주광률 기준
- [101] Orgill, J. F., & Hollands, K. G. T. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar energy, 19(4), 357-359.
- [102] CIE Standard 011/E:2003, Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky. 2004
- [103] 김철호, & 김강수. (2016). CIE 표준 담천공과 청천공 모델의 천공 휘도분포 예측 방법에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 36(3), 33-43.
- [104] 부산지방법원 동부지원 2010. 11. 26. 선고 2009가합3899 판결
- [105] 부산고등법원 2013. 6. 25. 선고 2011나474 판결
- [106] Tsangrassoulis, A., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). Theoretical and experimental analysis of daylight performance for various shading systems. Energy and Buildings, 24(3), 223-230.
- [107] Tsangrassoulis, A., & Bourdakis, V. (2003). Comparison of radiosity and ray-tracing techniques with a practical design procedure for the prediction of daylight levels in atria. Renewable Energy, 28(13), 2157-2162.
- [108] Radiance rendering.
<https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/radiance>
- [109] Crone, S., (1992). Rendering reality, Architectural Dissertation, Lighting Systems Research Group at Lawrence Berkeley Laboratory,
- [110] Greenup, P. J., & Edmonds, I. R. (2004). Test room measurements and computer simulations of the micro-light guiding shade daylight redirecting device. Solar Energy, 76(1-3), 99-109.
- [111] Mardaljevic, J. (1995). Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. International Journal of Lighting Research and Technology, 27(4), 181-188.

- [112] Ochoa, C. E., & Capeluto, I. G. (2006). Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. *Building and environment*, 41(8), 1128-1135.
- [113] 전나무, & 송규동. (2014). Photon Map 알고리즘을 적용한 RADIANCE 의 애니몰릭 광덕트 시스템의 형상지수별 채광성능 평가. *한국생활환경학회지*, 21(5), 763-771.
- [114] 김지현, 김인태, 송규동, & 최안섭. (2013). RADIANCE 프로그램을 이용한 태양광 경면반사에 의한 눈부심 영향 분석방안 연구. *한국생활환경학회지*, 20(1), 64-71.
- [115] 고동환, 최현경(2011). LEARN ECOTECH. 문운당
- [116] 고동환(2010). Autodesk ECOTECH Analysis 2010을 이용한 친환경 건축물 평가 및 분석, *대한건축학회지*, 52(7), 56-60.
- [117] 심세라 외(2012). BIPV창호의 표면온도 특성에 따른 실내 온열환경 평가 연구. *한국건축친환경설비학회 학술대회 논문집*. 58-61
- [118] 문조원 외(2009). 오피스 빌딩의 실내 환경측정과 재실자의 주관적 평가에 관한 연구; 계절별(하계, 중간기) 실내온도변화를 중심으로. *대한건축학회논문집*. 25(5) 279-286
- [119] 배귀남(1995). 실내 온열환경의 쾌적성 평가. *한국온열환경학회지* 2(3). 145-157
- [120] 공효주(2011). 온열환경기준에 따른 여름철 사무실의 열쾌적성 평가. *한국생태환경건축학회 논문집*. 11(3). 37-42
- [121] 배치혜(2008). 가구 유형에 따른 여름철 공동주택의 실내온열환경과 냉방 조절 행위에 관한 연구. *한국주거학회논문집*. 19(1). 89-96
- [122] 국토교통부(2017). 한국에너지공단. 건축물의 에너지절약 설계기준 설명서
- [123] ANSI/ASHRAE 55-2013. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA, 2013.
- [124] ISO 10211: 2007. *Thermal Bridges in Building Construction-Heat Flows and Surface Temperatures-Detailed Calculations*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- [125] ISO 7730: 2005. *Ergonomics of the thermal environment - Analytical*

determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

[126] 이규남, 최선호, & 김창훈. (2012). 설비형 칠드빔이 설치된 공간의 온열환경 분포에 대한 실험적 연구. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 32(2), 291-292.

[127] 문은진, 리령, 정창호, 여명석, & 김광우. (2016). 패키지형 히트펌프 시스템이 적용된 실의 난방 시 드래프트에 의한 재실자 쾌적 특성. 대한건축학회 논문집-계획계, 32(4), 89-96.

[128] 여지은(2017). 주거용 건물에서의 개별 난방기기 사용특성 및 국부적 온열 쾌적에 관한 연구. 서울시립대학교. 석사학위논문

[129] Zhang, S., Cheng, Y., Oladokun, M. O., Wu, Y., & Lin, Z. (2020). Improving predicted mean vote with inversely determined metabolic rate. Sustainable Cities and Society, 53, 101870.

[130] EN 16798-1 (2019). Energy performance of buildings. Ventilation for buildings - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

[131] Buratti, C., & Ricciardi, P. (2009). Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models. Building and Environment, 44(4), 674-687.

[132] Indraganti, M., Ooka, R., & Rijal, H. B. (2013). Thermal comfort in offices in summer: Findings from a field study under the 'setsuden' conditions in Tokyo, Japan. Building and Environment, 61, 114-132.

[133] Liping, P., Jie, Z., Xiaoru, W., Jun, F., & Shuxin, L. (2018). Field study of neutrality cabin temperature for Chinese passenger in economy class of civil aircraft. Journal of thermal biology, 78, 312-319.

[134] Chen, J., Augenbroe, G., Wang, Q., & Song, X. (2017). Uncertainty analysis of thermal comfort in a prototypical naturally ventilated office building and its implications compared to deterministic simulation. Energy and Buildings, 146, 283-294.

- [135] Parkinson, T., Parkinson, A., & de Dear, R. (2019). Continuous IEQ monitoring system: Performance specifications and thermal comfort classification. *Building and Environment*, 149, 241-252.
- [136] Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Li, P., & Brager, G. (2019). Analysis of the accuracy on PMV-PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 153, 205-217.
- [137] McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2004). *Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design*. John Wiley & Sons.
- [138] 정은영(2004). 열유체 수치해석에 의한 환경 장치 설계 연구:하수슬러지 탈수·건조 장치, 공장건물 환기. 충남대학교 석사학위논문
- [139] 김현수(2021). 고 프루드수 선박의 CFD 저항해석 방법 비교연구. 동명대학교 석사학위논문
- [140] Philippe B. Vincent(2018). CFD Modeling for Thermal Comfort in an Open Workspace. *Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada Montreal, QC, Canada, May 9-10, 2018*
- [141] 명현국(2002). 전산열유체공학. 문운당
- [142] 박화란(2008). 아파트 단지 외부 환경 조절인자 성능 검증 및 열환경 개선 방안에 관한 연구. 연세대학교 석사학위논문
- [143] 남선영(2010). 실측과 CFD해석을 통한 중소도시 하절기 열환경 비교 분석. 호서대학교 석사학위논문
- [144] 김재권(2014). 실측과 CFD해석을 통한 중소도시 시청사 외부공간 지표 재료에 따른 열, 기류 환경 연구. 호서대학교 석사학위논문
- [145] 기상청, 기상자료개방포털, 종관기상관측.
<https://data.kma.go.kr/data/grnd>
- [146] 산업통상자원부(2016). 공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정. 고시 제2016-97호
- [147] 산업통상자원부(2016). 에너지공급자의 수요관리 투자사업 운영규정