보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( )
국토교통기술촉진사업 최종보고서

R&D /
18CTAP-C117226-03

제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(IoT)기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호 제품 개발

최종보고서

2019 . 07 . 01 .

주관연구기관 / 연세대학교 산학협력단
공동연구기관 / ㈜ 핸즈온테크놀러지
공동연구기관 / Hong Kong Polytechnic University

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(IoT) 기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 융합한 다기능 스마트 창호제품 개발' (연구개발 기간 : 2016. 10. ~ 2019. 04.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2019. 04. 28

주관연구기관명 :	연세대학교 산학협력단	(대표자)	이 원 등	(인)
공동연구기관명 :	㈜핸즈온테크놀러지	(대표자)	강 현 웅	(인)
공동연구기관명 :	The Hong Kong Polytechnic University	(대표자)	Ping-kong Alexander Wai	(인)
참여기관명 :	㈜핸즈온테크놀러지	(대표자)	강 현 웅	(인)
참여기관명 :	The Hong Kong Polytechnic University	(대표자)	Ping-kong Alexander Wai	(인)
참여기관명 :	대림산업㈜	(대표자)	박 상 신	(인)
참여기관명 :	㈜이에이엔테크놀로지	(대표자)	신 지 웅	(인)
참여기관명 :	㈜한성윈도우	(대표자)	송 영 애	(인)

주관연구기관책임자: 홍 태 훈
공동연구기관책임자: 강 현 웅
공동연구기관책임자: Wang Shengwei
참여기관책임자: 강 현 웅
참여기관책임자: Wang Shengwei
참여기관책임자: 정 민 호
참여기관책임자: 신 지 웅
참여기관책임자: 박 진 은

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>18CTAP-C117226-03</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2016.10.24. ~ 2019.04.27.</td><td>단계구분</td><td>1/1 (해당단계)/ (총단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">첨단융합</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">-</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(IoT) 기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호 제품 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">홍 태 훈</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 39 명
내부: 20 명
외부: 19 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부: 890,000 천원
민간: 302,000 천원
계:1,192,000 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 39 명
내부: 20 명
외부: 19 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 890,000 천원
민간: 302,000 천원
계:1,192,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">연세대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명: ㈜핸즈온테크놀로지, The HongKong Polytechnic University, 대림산업(주), ㈜이에이엔테크놀로지, ㈜한성윈도우</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명: 홍콩</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:
The HongKong Polytechnic University</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 해당사항 없음.</td><td colspan="2">연구책임자: 해당사항 없음.</td></tr>
<tr><td colspan="6">※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의 보안등급 및 사유</td><td colspan="5">해당사항 없음</td></tr>
</table>

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

■ 연구 목표

사물인터넷(IoT)기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호제품 개발

■ 세부 목표

1. IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발(박막 태양광 블라인드와 능동형 환기 시스템의 '최적 설계 및 생산 기술')
2. IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발(센서 네트워크 및 데이터 분석 기술을 이용한, 태양광 블라인드의 발전량 및 실내 공기질에 대한 실시간 모니터링 및 평가)
3. IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발(기계학습을 이용한, 태양광 블라인드의 발전량 극대화 및 실내 공기질 최적화)

보고서 면수: 152 쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구에서는 「제로에너지빌딩 구현을 위한, **사물인터넷(IoT) 기반의 다기능 스마트 창호**」제품을 개발하고자 한다. 본 연구의 최종결과물은 **창호형 태양광 블라인드와 능동형 환기 시스템의 융합**을 통해, **혁신성과 차별성**을 갖춘 스마트 제품이다. ○ 본 연구는 2016년 국토부 7대 신(新)산업)인 **제로에너지빌딩**을 구현하고, **쾌적한 실내 공기환경** 구현하기 위한 제품 개발 · 실용화 연구임. 이를 위해, 본 연구과제는 크게 3개의 부문(PART)으로 구성됨. ○ 첫째, IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 **'최적 설계 및 생산 기술'** 개발 ○ 둘째, IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 **'실시간 모니터링 및 평가 기술'** 개발 ○ 셋째, IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 **'자동 제어 기술'** 개발
연구개발성과	본 연구개발은 크게 3가지 부문에서 창의성 및 혁신적 성과가 있음. ○ 첫째, 태양광 블라인드를 통한 자체전력 생산을 위해, **온도에 의한 효율 저하율이 상대적으로 낮은 박막형 태양광 패널을 사용**하여 태양광 블라인드를 구성하고, **운영단계**에서 **실시간 모니터링과 하이브리드 기반의 양방향 태양광 패널 제어**를 통해 **발전량을 극대화** 함. ○ 둘째, 창호형 환기시스템을 통한 쾌적환 실내 공기 환경을 위해, **실내·외 오염물질의 종합평가지표를 개발**하여, 실시간 **실내 공기질을 평가**함. 또한, **실내 공기질 모니터링 DB**와 **기계학습**을 이용하여, **재실자에 최적화된 실내 공기질 환경을 제공**하고자 함. ○ 셋째, 본 연구 성과물은 **신·기축 건물에 모두 적용 가능한 창호형 제품**으로서, 기존 제품과 비교하여, **시공성·경제성이 우수**함. 또한, 소요 전력은 **태양광 블라인드의 자체 생산 전력을 이용하기 운영비용을 절감**할 수 있음.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 연구의 결과물(사물인터넷(IoT) 기반의 다기능 스마트 창호 제품)은 ① 제로에너지빌딩 구현을 위한, **자체전력 생산 효과**, ② 재실자의 편의성·쾌적성·건강성 향상을 위한 최적의 **실내 공기질 개선 효과**를 제공하는 제품으로서, **지자체 및 자가 사용자가 활용**할 수 있음. 또한, **에너지 절감 요소기술**로서, **그린리모델링 및 에너지절약 전문기업, 태양광 및 공기질 대여 및 컨설팅 사업**을 통해 신사업 창출이 가능함. ○ 본 연구의 결과물(사물인터넷(IoT) 기반의 다기능 스마트 창호 제품)의 경제적·사회적 기대효과는 다음과 같다. 첫째, 국내 초등학교(5,418 개교)에 설치 할 경우, **모든 초등학교에서 경제적 타당성이 확보**되고, NPV(25년) 측면에서 **총 458,492,670,000원의 경제적 순이익**(=에너지절감비-유지관리비-초기투자비)이 발생할 것으로 분석된다. 둘째, 국내 초등학교(5,418 개교)에 설치 할 경우, 초등학교 전기 사용량의 **최대 80% 이상 에너지 자립**이 가능한 것으로 분석되었다. 셋째, 초등학교 한 학급에 설치할 경우, 표준학급 환기기준(488CMH)의 **170%(832CMH)**를 달성할 수 있는 것으로 분석되어, 실내 공기질 개선을 통한 건강증진 및 생산성 향상을 기대할 수 있다.

국문핵심어 (5개 이내)	제로에너지빌딩	태양광 블라인드	환기시스템	실시간 모니터링	자동 제어
영문핵심어 (5개 이내)	Zero Energy Building	Photovoltaic Blind	Ventilation System	Real Time Monitoring	Automatic Control

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 ····· 5
2. 연구수행내용 및 성과 ····· 25
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 134
4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 142
5. 연구개발성과의 향후 목표 ····· 146
6. 연구개발 추진 ····· 147
붙임. 참고 문헌 ····· 149

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 목적

[최종 목표]

○ IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산기술' 개발

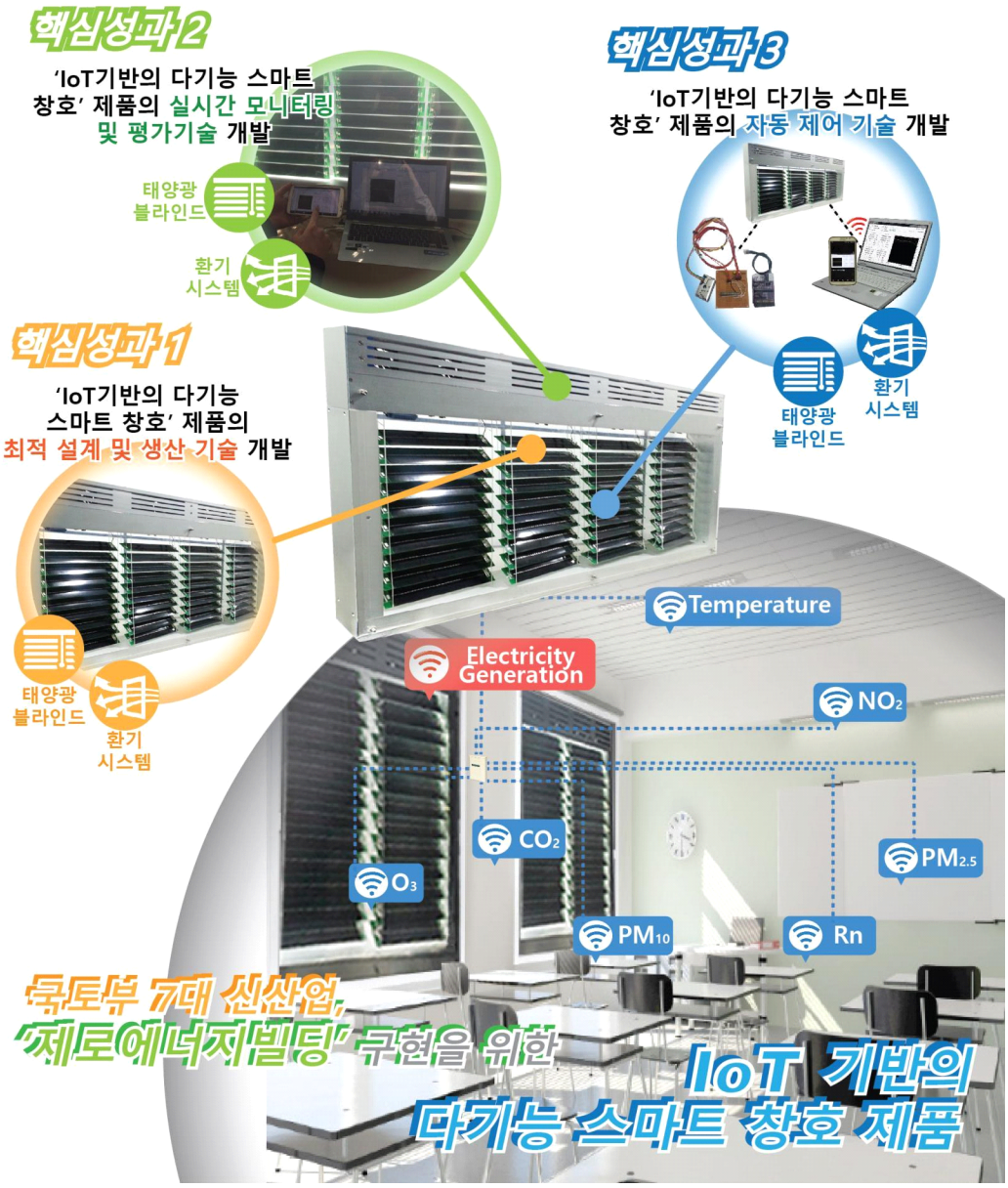
- 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발

○ IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발

- 실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가 기술' 개발

○ IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발

- 전력생산 최대화를 위한, '태양광 추적 기술' 개발



[그림 1-1] 연구의 개념도

나. 연구개발의 필요성

○ 국내 건물 부문의 에너지 소비량은 국가 전체 소비량의 약 22%(산업부분에 이어 2위)를 차지하고 있으며, 특히, 가구당 평균 전력 소비량은 연간 평균 2.95%(약 0.1MWh)씩 증가하고 있다[1]. 이러한 상황에서, 2015년 12월, 신(新)기후체제(POST-2020) 출범에 따른, 우리나라의 국가 온실가스 감축목표 (2030년 BAU 대비 온실가스 배출량 37% 감축)를 달성하기 위하여, 건물부문에 대한 에너지 소비량 절감은 필수적이다[2]. 이에 선제적으로 대응하기 위하여, 우리나라는 '2025년 제로에너지 건물 의무화' 정책을 수립하고, '2017년 패시브 건물 단열 기준 강화' 및 '분산형 전력 공급방식 활성화' 정책을 수립하였다.
뿐만 아니라, 국토부는 올해 초 7대 신(新)산업 중 하나로 제로에너지빌딩을 선정하는 등, 국가적 차원에서 제로에너지빌딩에 대한 지원을 강화하고 있다.[3]

○ 하지만, 건물부문에 대한 에너지 소비량 절감을 위해서, 에너지 소비량을 억제하고 에너지 효율을 개선하는 것만으로는, 궁극적으로 제로에너지빌딩을 구현하기 어렵다.[4] 따라서 건물에서도 깨끗하고 무한정한 에너지원을 사용한 전력 공급이 가능하고, 전기 요금 부담을 줄일 수 있는 대체에너지 사용이 필수적이다. [5]태양광 에너지는 우수한 발전 잠재량을 가진 에너지원으로서, 다양한 형태로 건물에 도입이 가능하다. 하지만, 기존의 태양광 시스템은 (1) 무겁고 유연성이 없는 실리콘 계 태양광 모듈의 사용, (2) 고가의 모니터링 시스템의 사용, (3) 크고 복잡한 구조의 추적 제어장치의 사용 등의 한계가 존재한다. [6]따라서 기존의 태양광 시스템의 한계 극복 및 상용화를 위해서, 신·기축 건물 창호에 모두 적용할 수 있는 태양광 블라인드 개발이 필요하다.

○ 한편, 제로에너지빌딩 구현을 위한, 고단열·고기밀(기존 대비 25.8% 단열기준 강화, 건축물의 에너지절약 설계기준 개정안 2016, 국토교통부) 설계는 실내 열성능을 향상시킨 반면, 실내 공기질의 악화를 초래하였다[7]. 악화된 실내 공기질 개선을 위한, 실내 기계 환기 시스템(신규 학교에 대한 기계 환기 시설 의무화 및 학교보건법 시행규칙)은 추가적인 에너지 사용을 증가시켜 사용자의 경제적 부담을 가중시킨다. 즉, 에너지 소비량 절감을 통한, 온실가스 배출량 절감과 실내 공기질 개선을 통한, 재실자의 쾌적성·생산성·건강성을 모두 만족시키는 것은 한계가 있다. [8]위의 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는, (1) 제로에너지빌딩 구현을 위한, 태양광 블라인드 발전 기술(에너지·환경 및 신소재 기술), (2) 재실자 맞춤형 최적 실내 공기질 개선을 위한, IoT 기반의 능동형 제어 기술(정보·통신 및 전자 기술), (3) 신·기축 건물에 모두 적용 가능한, 창호형 환기 기술(건축공학 기술)을 복합적으로 적용함으로써, 에너지 자립도 및 실내 공기질 향상을 모두 만족할 수 있는 첨단 융합형 제품을 개발하고자 한다 ([그림 1-2] 참조).



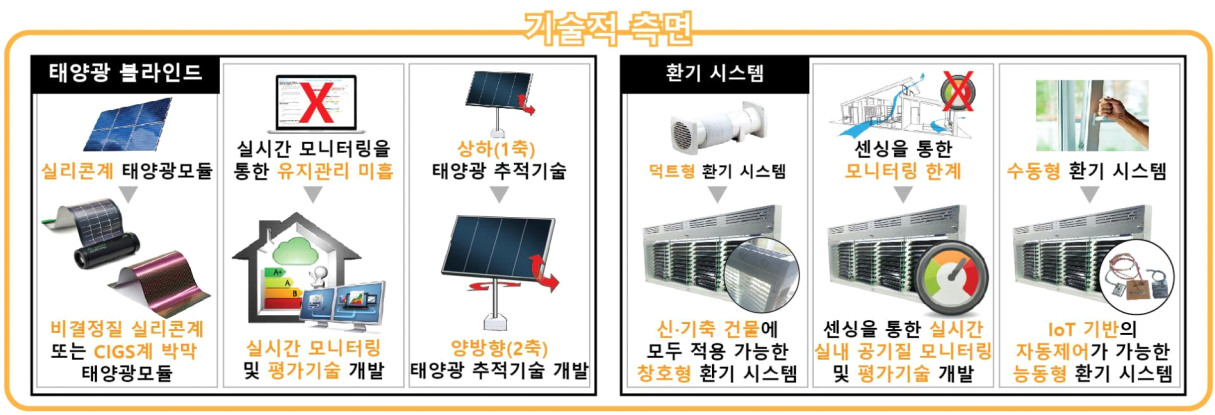
[그림 1-2] 융합기술을 통한 신제품 개발 필요성

다. 연구개발의 중요성

(1) 기술적 측면 ([그림 1-3] 참조)

○ 기존 태양광 시스템 및 태양광 블라인드를 건물에 도입함에 있어, 다음과 같은 한계가 존재한다. 첫째, 기존 태양광 시스템 및 태양광 블라인드에 사용되는 실리콘 계 태양광 모듈은 무겁고 유연성이 없기 때문에, 건물 도입이 제한적이고 하중 부담이 크다. 또한, 실리콘 계 태양광 모듈의 효율은 25℃ 이상에서 1℃ 상승 시 0.5%씩 저하되어 기온이 높은 여름철 발전량이 크게 저하된다. 둘째, 기존 태양광 시스템 및 태양광 블라인드는 실시간 모니터링을 통한 유지관리가 효과적으로 수행되지 못하고 있다. 특히, 고가의 시스템으로 인해 보급에 불리하다. 셋째, 기존 태양광 시스템 및 태양광 블라인드의 태양광 추적 기술은 대부분 상하(1축) 제어에 국한되어 있으며, 복잡한 메커니즘으로 인해 가격이 높고 크기가 크다. 따라서 기존 태양광 시스템 및 태양광 블라인드의 한계를 극복하기 위하여, (가) 가볍고 유연하며 온도 상승에 따른 효율 저하에 민감하지 않은 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 모듈을 이용한 태양광 블라인드 개발, (나) 저가형 실시간 태양광 발전량 모니터링 및 평가 기술 개발, (다) 저비용으로 발전효율을 극대화할 수 있는 위치·시간 및 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적기술 개발이 필수적이다.

○ 기존 환기 시스템을 건물에 도입함에 있어, 다음과 같은 한계가 존재한다. 첫째, 쾌적한 실내 공기질 유지 및 개선을 위하여 대부분 매립형(덕트형) 환기 시스템을 이용하지만, 기축 건물에 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 둘째, 기존 창호형 환기 시스템의 대부분은 자연환기 방식을 이용하기 때문에, 센싱을 통한 실내 공기질 모니터링에 한계가 있다. 셋째, 기존 창호형 환기 시스템의 대부분은 사용자가 직접 제어하는 수동형 환기 시스템으로, 재실자 맞춤형 자동제어에 한계가 있다. 따라서, 기존 환기 시스템의 한계를 극복하기 위하여, (가) 신·기축 건물에 모두 적용이 가능한 창호형 자가발전 및 환기 시스템 개발, (나) 저가형 센싱 기술을 활용한 실시간 실내 공기질 모니터링 및 평가 기술 개발, (다) 능동형 실내 환경 제어가 가능한 IoT 기반의 환기 자동제어 기술 개발이 필수적이다.

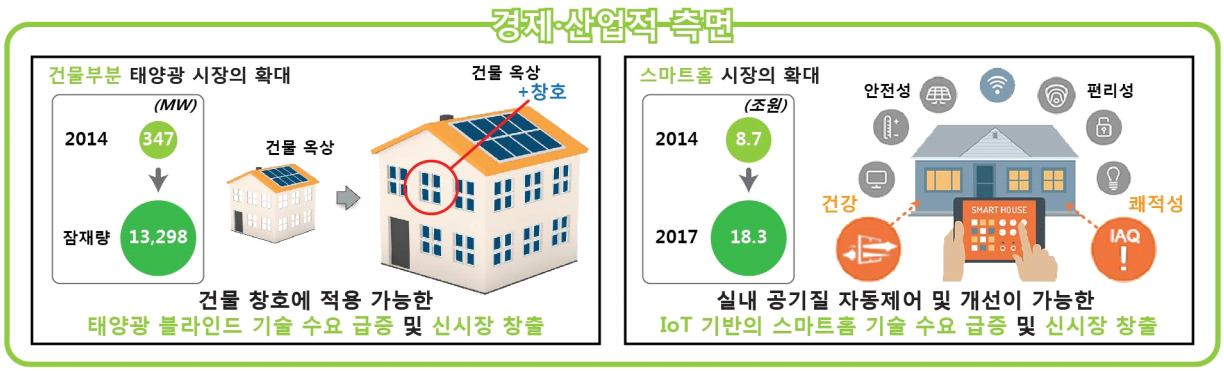


[그림 1-3] 기술적 측면

(2) 경제·산업적 측면 ([그림 1-4] 참조)

○ 전 세계 신·재생에너지 시장은 기술의 성장 및 활성화 정책으로, 최근 약 30 - 40%의 성장을 이루었다. 특히, 태양광 에너지 시장의 규모는 지속적으로 증가하는 추세이다. 2004년, 전 세계의 태양광 시스템 설치용량은 4GW에 불과했으나, 2014년에 이르러 177GW를 달성하면서, 태양광 에너지 시장은 급격한 성장을 이루었다.[9] 국내에서는, 2004년 4MW에 불과했던 태양광 시스템 설치용량이 신재생에너지 의무할당제(RPS) 등의 정책으로 인해 2008년 이후 큰 폭으로 증가하여, 2014년 기준으로 2,481MW를 차지하고 있다. 2030년 국내 태양광 시장은 2014년 대비 약 7배(17.5GW) 가까이 성장할 것으로 예상되고 있다.[10] 국내 건물부분 태양광 시장의 경우, 2014년 기준으로 총 누적 설치 용량은 347MW이며, 현재 건물 현황을 기반으로, 최대 13,298MW까지 보급이 가능할 것으로 전망되고 있다. 이처럼, 건물부분 태양광 시장의 수요가 꾸준히 증가함에 따라, 건물 옥상뿐만 아니라 건물 외벽 및 창호에도 적용할 수 있는 창호형 태양광 및 태양광 블라인드의 개발이 요구되고 있다.

○ 최근, 스마트폰 및 네트워크 시장의 확산에 따라, IoT 기반의 스마트홈(IoT를 융합하여, 거주자의 주거환경을 자유롭게 제어하는 기술) 시장이 새롭게 급부상하고 있다. 미국 IT 시장조사기관인 'Strategy Analytics' 및 한국 스마트홈산업협회에 따르면, 세계 스마트홈 시장은 2014년 480억 달러(약 54조 원)에서 연평균 19%씩 증가하여, 2019년 약 1,150억 달러(약 129조 원) 규모로 성장할 것으로 전망하고 있다. 국내 스마트홈 시장의 경우, 2014년 8조 8,677억 원에서 연평균 28%씩 증가하여, 2017년 약 18조 2,583억 원의 규모로 성장할 것으로 예측되고 있다. 스마트홈 시장을 선도하는 미국의 경우, 주로 안전 및 보안에 대한 수요를 기반으로 스마트홈 시장이 성장하였다. 뿐만 아니라, 에너지 및 에너지 비용 절감을 위하여, 주거 내 가전제품을 편리하게 제어하는 에너지 관리 중심의 스마트홈 서비스도 주를 이루고 있다. 하지만, 기존에 안전성 및 편리성에 집중했던 스마트홈 산업은 최근 들어 거주자의 건강 및 주거환경의 쾌적성을 추구하는 방향으로 패러다임이 전환되고 있으며, 다양한 스마트홈 서비스를 제공함으로써 신(新)시장 창출을 꾀하고 있다. 특히, 최근 공기 중 오염물질 및 미세먼지의 농도가 급증하면서, 자동으로 실내 공기질을 제어하고 향상시킬 수 있는 IoT 기반의 스마트홈 기술 수요가 급증하고 있다. [11]



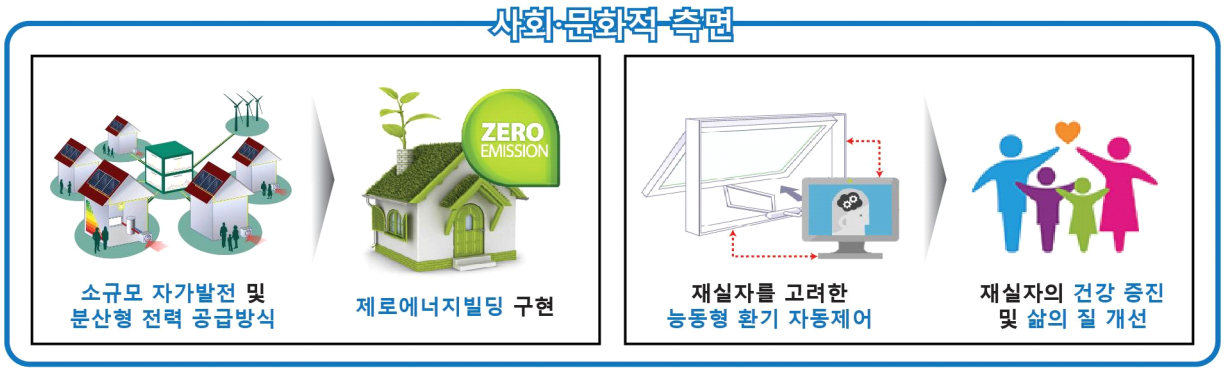
[그림 1-4] 경제·산업적 측면

(3) 사회·문화적 측면 ([그림 1-5] 참조)

○ 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회를 통해, POST-2020이 출범하였고, 우리나라는 2030년 BAU 대비 37% 감축목표를 설정하였다. 이에 대응하기 위해, 우리나라는 (가) 소규모 자가발전에 대

한 전력 거래시장 창출, (나) 기존 중앙 집중형 전력 공급방식에서 분산형 전력 공급방식으로의 전환 등의 에너지 신산업 확산전략을 중장기 정책대안으로 수립하였다. 따라서 소규모 자가발전을 통한 분산형 전력 공급이 가능한 태양광 블라인드를 개발함으로써, 중장기 정책에 부합하는 제로에너지빌딩 구현 전략 수립이 필요하다.

○ 전 세계적으로 환경 문제가 중요한 사회적 이슈로 인식됨에 따라, 대기오염뿐만 아니라 실내 공기오염에 대한 대책 마련이 시급한 상황이다. 특히, 하루의 85% 이상을 실내에서 생활하고 있는 도시인의 증가에 따라, 재실자의 건강 및 쾌적성을 보장하기 위한 실내 공기질 관리가 필수적이다. 한정된 실내 공간에서 계속 누적되는 오염물질로 인하여, 실내 공기오염은 대기오염 보다 2배에서 많게는 100배 이상 높아진다.[12] 세계보건기구(WHO)에 따르면, 연간 약 700만 명이 공기오염에 의해 사망하며, 이중 약 430만 명(61%)는 실내 공기오염에 의한 것으로 보고되고 있다. 따라서, 오염된 실내 공기질의 실시간 모니터링 및 재실자를 고려한 능동형 환기 자동제어를 통하여, 재실자의 건강 증진 및 삶의 질 개선이 필요하다.



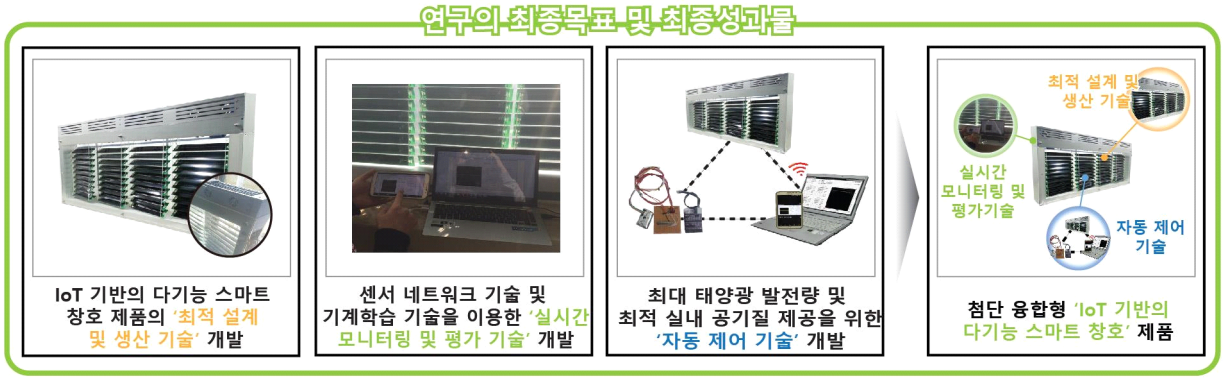
[그림 1-5] 사회·문화적 측면

라. 연구의 최종목표 및 최종성과물

○ 본 연구에서는 건물의 에너지 소비량 절감 및 실내 공기질 개선을 모두 만족시키기 위한 방안으로써, 제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(Internet of Things; 이하 IoT) 기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호 제품을 개발하고자 한다.

○ 이를 달성하기 위해, (1) IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술'을 개발한다. 또한, 운영단계에서의 센서 네트워크 기술 및 기계학습 기술을 이용한, (2) IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술'을 개발한다. 더불어, 본 제품의 최대 태양광 발전량 및 최적 실내 공기질을 제공하기 위해, (3) IoT기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술'을 개발한다.

○ 최종적으로, 본 연구의 최종성과물은 기술성숙도 8단계(실용화)를 목표로 하며, ○○대학교에서 실제 적용할 계획이다 ([그림 1-6] 참조).



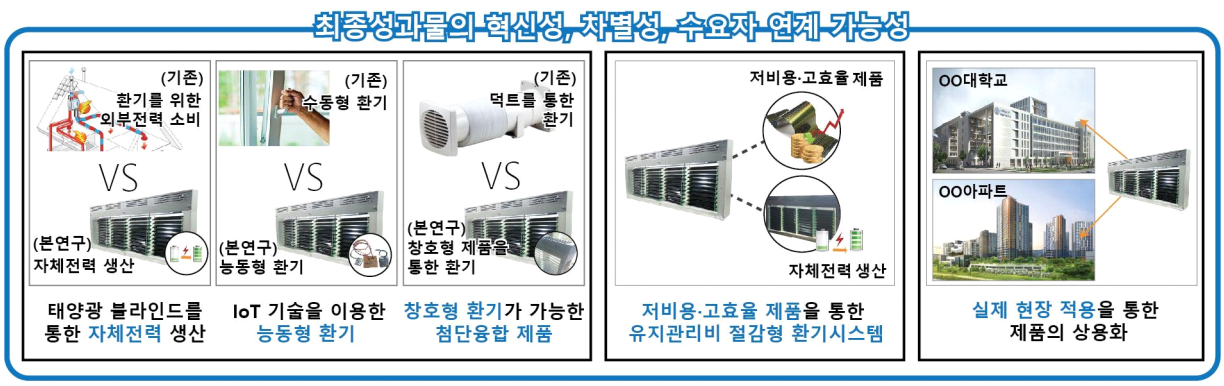
[그림 1-6] 연구의 최종목표 및 최종성과물

마. 최종성과물의 혁신성, 차별성, 수요자 연계 가능성

○ 기존 태양광 발전 및 환기 제품과 비교하여, 본 연구의 최종성과물은, (1) 태양광 블라인드를 통한 자체전력 생산, (2) IoT 기술을 이용한 능동형 제어, (3) 신·기축 건물에 모두 적용할 수 있도록 창호형 환기가 가능한 첨단융합 제품이다. 이는, 기존에 에너지 손실을 발생시키는 창호를, 자체전력을 생산하고 실내 공기질을 향상시키는 공간으로 활용한다는 점에서 혁신성을 갖춘 제품이다.

○ 또한, 저비용(유닛 당 약 35만원)·고효율(태양광 발전효율 14.5% 및 최적 실내 공기질 제공)의 제품을 개발하기 위하여, (1) 박막형 태양광 패널, 양방향(2축) 태양광 추적 기술, 및 저가형 실시간 모니터링 및 평가 기술 이용하고, (2) 자체생산 전력을 에너지원으로 사용하여, 유지관리비를 절감 시킬 수 있는 환기시스템이라는 점에서, 차별성을 갖춘 제품이다.

○ 한편, IoT기반의 다기능 스마트 창호 제품은 잠재적 수요자인 ○○대학교와 ○○건설에서 제공하는 실제 현장 평가를 수행할 계획이다. 이를 통해, 장기적 관점에서 경제성·환경성을 검토함으로써, 제품의 상용화를 이루고자 한다 ([그림 1-7] 참조).



[그림 1-7] 최종성과물의 혁신성, 차별성, 수요자 연계 가능성

바. 현황분석

(1) 국내외 관련 분야의 환경 변화

(가) 사물인터넷(IoT) 관련 기술들의 현황분석

4차 산업혁명의 핵심 기반기술인 사물인터넷(IoT)은 전 세계적으로 연평균 10% 이상의 높은 성장률을 보이고 있으며, 산업 전반에 미치는 영향력 또한 급속도로 확대되고 있다. 특히, 사물인터넷(IoT) 기술의 주요 3대 분야(스마트홈, 스마트 시티, 커넥티드 카) 중 스마트홈 시장은 2020년까지 약 430억 달러 규모로 성장할 것으로 전망된다.

국외의 경우, 다양한 사물인터넷(IoT) 기술 발전을 위한 정책시행과 지원을 제공하고 있다. 일본의 경우, 사물인터넷(IoT) 기술 시장의 급격한 성장에 대응한 정책 로드맵을 제시하여, 2020년까지 모든 사물・사람이 인터넷과 연결된 사물인터넷(IoT) 빅 데이터 거래소를 출범할 계획이다. 또한, 중국은 사물인터넷(IoT) 분야에 대한 정부의 전폭적인 지원 하에, '과학기술 중장기 발전계획', '중국스마트홈산업연합'과 같은 다양한 정책들이 시행되고 있으며, 이를 기반으로 2020년에는 시장규모 1조 위안을 돌파할 것으로 예상된다.

국내의 정부 R&D 동향을 살펴보면, 2017년 초연결 지능형 네트워크 구축 및 차세대 초소형 사물인터넷(IoT) 기술개발 사업이 신규로 추진되어, 정부의 투자가 확대되고 있다. 이를 살펴보면, 사물인터넷(IoT) 관련 내용을 포함하는 국가연구개발사업은 총 148개 사업으로 2018년 정부예산 기준 약 4.6조원 규모에 달하며, 본 연구에서 적용하고자 하는 '지능형 사물인터넷(IoT)'에 부여한 관련 예산은 2018년 정부예산 기준 약 1,726억 원 규모에 달하는 것으로 나타났다. 이와 더불어, 산업통상부의 5대 신산업 프로젝트(전기・자율자동차, 사물인터넷(IoT)가전, 에너지신산업, 바이오・헬스, 반도체・디스플레이)를 통해 관련 기업부설연구소 및 기술사업화에 있어 9,194억 원을 지원하며 관련 기술 육성에 힘을 쏟고 있다. 또한, 과학기술정보통신부의 '사물인터넷(IoT) 융합기술개발'사업(2016 - 2018년)과 '차세대 초소형 사물인터넷(IoT) 기술개발'사업(2018 - 2021년)과 같이 사물인터넷(IoT) 관련기술 개발을 위한 국가연구 개발 사업이 꾸준히 기획되고 추진되고 있다.

결과적으로, 사물인터넷(IoT) 관련 기술들은 다양한 분야에 계속해서 적용되고 있으며, 사물인터넷(IoT) 기술 육성을 위한 정부의 정책적 지원 및 투자 동향은 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

(나) 신재생에너지 및 태양광 관련 현황분석

EU 국가들은 2019년부터 모든 공공기관 건물, 2021년부터는 모든 일반 건물에 '제로 에너지 빌딩 기술'의 적용이 의무화됨에 따라, 신재생에너지 보급량이 증가될 것으로 예측된다.[13] 또한, 블룸버그 뉴 에너지 파이낸스(DNEF, Bloomberg New Energy Finance)에서 보고된 바에 의하면, 2017년 세계 태양광 수요는 전년대비 24% 증가한 93GW를 기록하면서 태양광 산업은 지속적인 고성장세에 있다고 분석하였으며, 2018년 세계 태양광 시장은 100GW를 넘어서는 제2차 성장기에 진입할 것으로 예상하였다. 특히, 전 세계 태양광 시장의 50%를 점유하고 있는 중국이 2017년에는 50GW를 초과하는 태양광 발전설비를 설치하는 등 태양광 시장 확보를 위한 확장사업을 지속함에 따라, 세계태양광 시장은 앞으로도 꾸준한 성장세를 보일 것으로 판단되었다.

국내의 경우, 태양광시스템과 같은 재생에너지 확대를 위한 다양한 정책 및 지원제도를 수립하였다. 2017년 산업통상자원부가 수립한 '재생에너지 3020 이행계획'을 통해, 2030년까지 재생에너지 발전 비중을 20%까지 확대하고, 총 100조원을 투입하여 태양광 및 풍력시스템을 위주로 신규 설비를 확충하고 있음에 따라, 국내 재생에너지 수요가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 또한'재생에너지 3020 이행계획'을 성공적으로 추진하기 위하여, 민간의 참여를 장려하고 신재생에너지 관련 규제의 완화할 계획이다. 또한, 자가용 태양광 설비(주택, 건물 등)를 2030년 156만호까지 늘리고 재생에너지에 대한 국민 참여를 확대하기 위해, 신재생에너지 공급의무화(RPS. Renewable Portfolio Standard)와 발전차액 지원제도(FIT, Feed-In Tariff)의 장점이 결합된 한국형 발전차액 지원제도(FIT)를 5년간 한시적으로 도입할 계획이다. 이와 더불어, 일정 비율 이상 주민이 참여하는 대규모 발전사업에는 신재생에너지공급인증서(REC) 가중치를 인센티브로 제공하고, 재생에너지 보급에 걸림돌이 되는 각종 규제(농촌진흥구역 내 태양광 설치 제한, 수상태양광 및 건축물 위 태양광 설비 제한 등)를 개선할 예정이다.

(다) 실내 공기질 관련 현황분석

황사나 미세먼지 등으로 인해 발생하는 심각한 대기오염 수치가 2018년에도 지속적으로 증가함에 따라, 현대인들이 많은 시간을 보내는 실내 공간의 공기질 개선 및 관리에 대한 관심과 요구 또한 더욱 높아지고 있다. 이러한 배경 하에, 공기오염 물질(이산화질소(NO_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 총휘발성유기화합물(TVOCs), 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($PM_{2.5}$) 등)로 인한 재실자의 건강영향 등을 고려하여, 전 세계적으로 실내 공기오염물질에 대한 권고기준을 제시하고 있다.

국외의 실내오염물질 권고기준에 의하면, 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 경우, 독일의 연방환경청(Umweltbundesamt)에서는 24시간 평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 25$\mu g/m^3$ 이하의 관리기준을 수립하고 있으며, 미국 환경청(EPA, Environmental Protection Agency)은 24시간 평균 미세먼지(PM_{10}) 150$\mu g/m^3$ 이하, 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 35$\mu g/m^3$ 이하로 유지하도록 권고하고 있다. 또한, 미국공조냉동공학회(ASHRAE)에서는 연평균 미세먼지(PM_{10}) 농도를 50$\mu g/m^3$ 이하로, 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 12$\mu g/m^3$ 이하로 유지하도록 권고하고 있다.

한편, 국내의 실내오염물질 유지 기준을 살펴보면, 고용노동부, 보건복지부, 국립환경과학원에서는 24시간 평균 미세먼지(PM_{10})를 150$\mu g/m^3$ 이하로 유지하는 것을 권고하고 있으며, 환경부에서는 2018년부터 다중이용시설 외 의료기관, 어린이집, 산후조리원, 노인요양시설에서도 6시간 평균 미세먼지(PM_{10})를 100~200$\mu g/m^3$ 이하로 유지하고, 초미세먼지($PM_{2.5}$)를 70$\mu g/m^3$ 이하로 유지하는 강화기준을 제시하였다. 하지만, 국내에서 제시하는 실내 공기 오염물질 기준은 여전히 국제 기준에 비해 낮은 것으로 나타났다. 따라서 국내 미세먼지 기준에 대한 문제점이 계속 지적됨에 따라, 교육부는 교실 내 공기질 관리 강화를 위하여 미세먼지 유지기준 항목에 초미세먼지($PM_{2.5}$)에 대한 기준을 추가하였다. 이에 따라, 2018년 3월 1일부터 모든 교실에 초미세먼지($PM_{2.5}$)를 70$\mu g/m^3$ 이하로 유지하도록 권고하고 있다. 또한 정부는 과학기술을 통해 미세먼지 문제에 대한 근본적, 혁신적 해결을 지원하기 위해 2018년에 총 126억 원의 범 부처(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 미세먼지 국가전략프로젝트 사업 시행 계획을 확정하고, 사업을 본격 추진한다고 밝혔다.

(2) 국내·외 연구현황

(가) 국내 연구현황

<table>
<tr><th colspan="3">기존 유사분야 연구과제</th><th colspan="2" rowspan="2">연구의 차별</th></tr>
<tr><th>선행연구</th><th>연구기간</th><th>연구내용</th></tr>
<tr><td rowspan="2">제로에너지 건물을 위한 ‘블라인드PV 연동 LED 조명시스템’ 통합 제어솔루션 개발</td><td rowspan="2">‘11.05 – ’14.04</td><td rowspan="2">• 주광유입량에 따른 태양광 블라인드 자동 제어 시스템 개발
• 주광량에 따라 인공조명의 광량을 조절하는 조광제어시스템 개발
• 주광의 활용과 태양광 발전에 의한 최적의 에너지 절감시스템 개발</td><td>선행연구</td><td>• 주광량에 따른 태양광 블라인드의 1축(상하) 제어를 통한 실내조도유지를 목적으로 함.
• 블라인드PV 연동 LED조명시스템 통합 제어솔루션 개발을 위한 기초연구에 해당함</td></tr>
<tr><td>본연구</td><td>• 위치·시간 및 태양광 발전량 기반 2축(상하/좌우) 추적 기술을 통한 태양광 블라인드의 발전량 극대화를 목적으로 함.
• 창호시스템 개발을 통한 기술실용화에 주안점을 둔 실용화 연구에 해당함.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">창호 거치형 태양광발전 루버시스템 개발</td><td rowspan="2">‘10.09 – ‘15.08</td><td rowspan="2">• 태양광발전 장치 설계기술 개발
• 루버형 태양광발전 시스템의 시공성 및 발전성능 평가
• 일사차단과 태양광 발전이 가능한 루버시스템에 대한 시작품 개발</td><td>선행연구</td><td>• 루버형 태양광발전 시스템의 상하제어를 통한 태양광 발전을 목적으로 함.
• 창호 외부에 설치하는 단순구조로, 태양광발전 시스템의 시공성 및 이동성에 주안점을 둔 연구임.</td></tr>
<tr><td>본연구</td><td>• 위치·시간 및 태양광발전량 기반 2축 태양광 추적 기술을 통해 발전량 향상을 목적으로 함.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">주거복지 구현을 위한 생활밀착형 공동주택 성능 향상 기술 개발</td><td rowspan="2">‘14.09 – ‘19.09</td><td rowspan="2">• 층간소음, 공기질, 결로, 누수 등 공동주택의 생활밀착형 문제 해결
• 실내공기 오염물질 발생원 제어 및 유해화학물질 흡착 제거기술 개발
• 생활문제 해결형 주택 환기기술 개발</td><td>선행연구</td><td>• 실내 온도, 습도 등 센싱에 의한 능동형 배기시스템 제어를 목적으로 함.
• 덕트형 환기 시스템인 공기청정유닛 개발에 주안점을 둔 연구임.</td></tr>
<tr><td>본연구</td><td>• 실내 환경의 능동형 제어시스템 개발은 물론, 자가발전 창호시스템을 통한 제품의 경제성 확보를 목적으로 함.
• 창호형 환기 시스템 도입을 통한, 최적 실내 공기질 환경 개선에 주안점을 둔 연구임.</td></tr>
</table>

기존 유사분야 연구과제			연구의 차별	
선행연구	연구 기간	연구내용		
실내환경의 유비쿼터스-실내 공기질(U-IAQ) 진단시스템과 통합관리시스템 개발 및 구축에 관한 연구	'07.04 - '10.03	• 설비시스템과 유비쿼터스의 결합을 통한 실내 환경 감시·진단·제어 시스템 개발 • 실내 환경 모니터링 장치 개발 • 실내 환경과 관련된 설비시스템 최적유지관리 시스템 개발	선행연구	• 실내 환경 정보를 이용한, 설비 시스템 개발을 목적으로 함. • 덕트형 환기 시스템을 통해, 실내 환경제어를 주안점으로 둔 연구임.
			본연구	• 실내 환경 및 태양광 발전량 모니터링을 통해, 최적 실내 공기질 및 최대 태양광 발전을 목적으로 함. • 창호형 환기 시스템 도입을 통한, 최적 실내 공기질 환경 개선에 주안점을 둔 연구임.

(나) 국외 연구현황

기존 유사분야 연구과제			연구의 차별성	
선행연구	게재년도	연구내용		
Evaluation of optimized PV power generation and electrical lighting energy savings from the PV blind-integrated daylight responsive dimming system using LED lighting	2014	• 광센서 조광제어시스템과 결합한 태양광 블라인드 시스템 개발 • 태양광 블라인드의 슬랫 각도에 따른 발전량 및 조명에너지 절약에 대한 분석	선행연구	• 주광량에 따른 태양광 블라인드의 1축 제어를 통한 태양광 발전량 및 실내조도 분석을 목적으로 함.
			본연구	• 위치·시간 및 태양광 발전량 기반 2축 태양광 추적 기술을 통한 태양광 블라인드의 발전량 극대화를 목적으로 함.
Theoretical analysis of the blinds integrated photovoltaic modules	2012	• 태양광 블라인드의 설계 변수에 따른 발전 효율 분석 • 태양광 블라인드가 위치한 이중창 내부의 환기를 통해 태양광 모듈의 온도 저감 효과 분석	선행연구	• 발전량에 영향을 미치는 설계변수(태양광 모듈 크기, 블라인드의 슬랫 각도 등) 도출에 주안점을 둔 연구임.
			본연구	• 위치·시간 및 태양광 발전량 기반 2축 태양광 추적 기술을 통한 태양광 블라인드의 발전량 극대화를 목적으로 함.
An integrated control of shading blinds, natural ventilation, and HVAC systems for energy saving and human comfort	2010	• 재실자의 만족도를 고려한 차양·조명·자연환기·HVAC 시스템의 통합 제어 전략 개발 • 실내 환경의 통합제어	선행연구	• 에너지 비용 및 실내 환경의 최적 제어 시스템 개발을 위한 기초연구에 해당함.
			본연	• 경제성 확보 및 실내 환경 제어가 가능한 다기능 창호 제품 개발을 위한

기존 유사분야 연구과제			연구의 차별성	
선행연구	게재년도	연구내용		
		와 개별제어에 따른 에너지 비용 절감 효과 비교·분석	구	실용화 연구에 해당함.
Optimization of ventilation system design and operation in office environment, Part I: Methodology	2009	• 재실자와 실내 공기질을 고려한 환기 시스템의 최적 설계 및 적용 방안 분석 • 전산 유체 역학 (CFD) 시뮬레이션에 기반하여 최적 환기 방안 검증	선행연구	• 최적 환기 시스템 설계를 위한 방법론을 검증하는 기초연구에 해당함.
			본연구	• 실시간 실내·외 공기질 모니터링 및 평가를 통해 최적 자동제어가 가능한 창호 시스템 개발을 위한 실용화 연구에 해당함.

(다) 소결

○ 본 연구의 최종성과물 「IoT 기반의 다기능 스마트 창호」 제품 개발은 기존 유사분야 연구과제와 비교하여, 다음의 3가지 차별성을 가진다.

○ 첫째, IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은, 창호형 자가발전 및 환기 제품으로서, 신·기축 건물에 모두 적용이 가능하다. 따라서 기존의 매립형(덕트형) 환기 시스템과는 차별화된 제품이다.

○ 둘째, IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은, 고효율(태양광 발전효율 14.5%, 2축(상하/좌우) 태양광 추적기술 및 최적 실내 공기질 제공) · 저비용(Unit 당 약 35만원) 태양광 블라인드를 통해, 최대 80% 이상 에너지 자립이 가능한 제품을 개발하고자 한다.

○ 셋째, IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은, IoT 기반의 최적 자동제어 기술이 결합된 제품으로서, 실내·외 공기질 모니터링 및 평가를 통한 재실자 맞춤형 자동제어를 수행한다. 즉, 기존의 사용자의 직접 제어에 의한, 수동형 환기 시스템과는 차별화된 제품이다.

○ 궁극적으로, 본 연구의 최종성과물은, 건물 에너지 절감 및 실내 공기질 개선을 통해, 365일 환기가 가능한 제로에너지빌딩을 구현하고자 한다.

(3) 국내·외 정책현황

(가) 국내 정책현황

○ 정부는 「신에너지 및 재생에너지 개발 · 이용 · 보급촉진법」을 수립하여 2035년까지 신·재생에너지 보급률을 11%까지 확대하고자 함. 이를 위해, 신·재생에너지 공급가능 잠재량을 고려한 기술개발 및 보급지원 정책을 적극 추진하고 있음. 특히, 보급 잠재량 및 산업적 파급효과가 높은 3대 핵심 분야(태양광, 수소·연료전지, 풍력) 중에서, 태양광 발전은 건물 분야 적용성이 우수한 것으로 평가되고 있음.

○ 실내 공기질을 위협하는 유해물질(미세먼지(PM 10, PM 2.5), 라돈(Rn), 휘발성유기화합물(VOC) 등)이 증가함에 따라, 쾌적한 실내 공기질에 대한 국민욕구가 증대하고 있음. 이에 따라, 정부는 「실내 공기질 관리 기본계획(5년)」을 수립하고, 2019년까지 10% 이상의 실내 공기 오염도 저감을 목표로 하고 있음(2014.3, 실내 공기질관리법).

○ 상기 정책의 수행을 위한, 신재생에너지 및 실내 공기질 관련 세부 정책 현황은 다음과 같음.

(나) 국내 정책현황

구분	정책	주요 특징
신·재생에너지	신·재생에너지 설치의무화 사업	• 공공기관이 신·개축 및 증축하는 연면적 1,000㎡이상의 건축물에 대하여, 예상 에너지 사용량의 공급 의무비율 이상(2016년 기준 18%)을 신·재생에너지로 공급토록 의무화하는 제도.
	신·재생에너지 그린홈 100만호보급 사업	• 신·재생에너지 보급사업의 일환으로, 산업통상자원부는 2020년까지 신·재생 에너지 100만호 보급을 목표로 하고 있음. • 태양광, 태양열, 지열, 소형풍력, 연료전지 등의 신·재생에너지원을 주택에 설치할 경우 설치비의 일부를 정부가 보조지원함. • 2015년 정부 보조 지원금: 총 46,758(백만원).
	태양광 대여사업	• 소비자의 초기투자비 부담 없이 대여사업자가 설치·운영·관리까지 책임지는 민간주도 보급 및 육성을 위한 사업. • 대여사업자가 주택 등에 태양광 발전설비를 직접 설치하고 일정기간 동안 설비의 유지·보수를 이행하는 조건으로 주택 등에게 대여료를 징수하는 사업.
실내 공기질	실내 공기질 관리법	• 국내 실내 공기질 실태파악 및 관리기준관리, 환기설비 및 공기정화설비 관리 등의 실내 공기질 개선을 목적으로, 5년 주기로 실내 공기질 개선을 위한 목표를 수립함. • 2015년과 비교하여, 2019년 실내 공기오염도의 10% 이상 저감을 목표로 수립. • 5년간(2015 - 2019) 실내 공기질 관리정책에 총 425억원 소요 전망.
	주택성능 표시제도	• 주택을 건설하여 공급하는 사업주체가 주택의 성능을 인정받아 입주자 모집 공고 시 표시토록 의무화한 제도로서, 1~4등급으로 구분하여 인증표시 • 평가항목: 소음, 환경 등 5개 분야 28개 항목, 이 중 실내 공기질과 관련하여 저방출 자재 적용 및 단위세대 환기성능 확보를 평가항목으로 설정하고 있으며, 2개 등급으로 나누어 평가
	친환경 건강도우미 컨설팅 사업	• 어린이 등 유해물질에 취약한 계층의 건강보호 목적으로 유해물질 측정 및 컨설팅 관련 일정교육을 이수한 건강도우미가 가정을 직접 방문하여, 가정 내 환경성질환 유발요인을 측정점검하고 환경개선사항을 컨설팅해주는 서비스 • 측정항목: 휘발성유기화합물(VOC), 미세먼지, 포름알데히드, 집먼지진드기 등

○ 미국, 독일, 일본 등 주요국들은 온실가스의 효과적인 감축을 목표로 **신·재생에너지의 보급을 확대하기 위한 다양한 정책을 채택**하고 있음.

○ 또한, **인체의 건강에 심각한 영향을 미치는 실내 공기오염에 대한 관심이 증가**함에 따라, 전 세계는 **건축물의 실내 공기질을 규제·개선을 위한 다양한 정책을 수립**하고 있음.

○ 상기 정책의 수행을 위한, 주요국의 **신·재생에너지 및 실내 공기질 관련 세부 정책 현황**은 다음과 같음.

구분	국가	주요 특징
신·재생에너지	미국	• 투자세액공제제도(Income Tax Credit): 자가발전용 태양광 발전설비의 투자세액을 공제해주는 제도로서, 태양광 발전 기술 적용 증가에 따른 분산형 태양광발전 시장을 확대시키고자 함. • 태양광발전 보조금 정책: 태양광 시스템 설치 시, 정부에서 사업체 및 사용자에게 보조금을 지급함. • 전력요금 상계거래제(Net-metering): 태양광발전으로 자가생산한 전기에 대해, 잉여 전기를 전력회사에 판매할 수 제도로서, 태양광발전 시장의 발전에 기여.
	독일	• 직접 마케팅: 사업자가 전력구매자를 직접 발굴해 태양광 전력을 판매하는 제도로서, 프리미엄 가격이 덧붙여져 기준 가격보다 전력판매가격이 높아짐. • 태양광 시스템 설치사업의 입찰경쟁제도 도입(2015): 개별적 태양광 발전 장려를 통한 분산형 태양광 발전 확대 및 태양광 시스템 설치 업체의 경쟁력 향상.
	일본	• 발전차액지원제도(Feed-In-Tariff): 신·재생에너지 발전으로 생산한 전력의 거래 가격과 정부 고시 가격간의 차액을 국가가 지원해 주는 제도로서, 2017년 이후 FIP(Feed in Premium)와 입찰경쟁체제로 개선되어 시행 될 예정임. • 전력소매업 자유화(2016년): 현재 약 750개 기업이 전력소매업체로 등록되어 있어, 다양한 태양광 사업투자유치를 활성화 시키고 있음.
실내 공기질	미국	• 환경보호청: 민간 차원의 실내 환기 및 공기질 가이드라인을 제시. • 주택도시개발부: 실내 유해물질 관리를 위하여, 건축 자재에 대한 오염물질 규제 및 친환경 인증제품 사용을 권장함. • 미국공조냉동공학회(ASHRAE): 주거용 건축물에 대한 최소 환기율과 실내 공기질에 대한 가이드라인 제시.
	독일	• 연방환경청: 실내 공기질에 영향을 미칠 수 있는 오염원이나 유해물질을 제한하는 법률 제정 및 실내 공기질에 대한 가이드라인을 제시. • 실내공기위생위원회: 실내 공기질에 대한 가이드라인(GV I와 GV II)을 제시하여, 실내 공기질을 개선하도록 유도함.
	일본	• 후생노동성: 건강하고 쾌적한 실내 공기질 확보를 목적으로, 실내 화학물질 농도에 관한 가이드라인 제시. • 국토교통성: 실내 공기환경 관련 정책에 대한 검토 및 기술 지원. • 문부과학성: 학교환경위생 및 실내 공기질 규제기준 제시.

(다) 소결

○ 우리나라를 포함한 세계의 주요 국가들은 기후변화와 실내·외 공기 오염에 대응하여, 신재생에너지를 활성화하고 실내 공기질을 개선 및 관리하기 위한 다양한 정책을 시행하고 있다.

○ 국내·외 신·재생에너지 관련 정책들은 태양광발전 시장을 활성화에 초점을 맞추어 시행되고 있다. 또한, 정부 주도형 정책에서 민간 주도형 정책(태양광대여사업, 입찰경쟁, 직접마케팅 등)으로 확대·개선됨에 따라, 신·재생에너지 산업의 산업적 파급효과는 점점 높아지고 있다.

○ 국내·외 실내 공기질 관련 정책들은 실내 공기질 개선(환기 및 실내 공기질 가이드라인 제시)을 통한, 쾌적한 실내 공기 환경을 유지에 초점을 맞추어 시행되고 있다.

○ 이러한 국내·외 정책 현황에 따라, 실질적으로 신재생에너지의 활성화에 기여하고 실내 공기질을 국가에서 제시하고 있는 기준을 기반으로 효과적으로 관리할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.

사. 연구개발의 최종목표

구분	내용
최종 목표	▪ 제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(IoT) 기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호 제품 개발 - 최종성과물의 기술성숙도: 8단계(실용화) - 최종성과물의 계획: '○○대학교에서 실제 현장 적용 평가 계획
세부 목표	1. IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산기술' 개발 ▪ 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 ▪ 환기 시스템 크기, 유량, 필터를 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발 ▪ '최적설계 및 생산기술별' 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가
	2. IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발 ▪ 실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가 기술' 개발 ▪ 실시간 실내 공기질 및 온·습도 '모니터링 및 평가 기술' 개발 ▪ 웹/스마트기기 기반 '모니터링 장치'의 개발 · 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가
	3. IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발 ▪ 전력생산 최대화를 위한, '태양광 추적 기술' 개발 ▪ 실내 공기질 최적화를 위한, '환기 자동 제어 기술' 개발 ▪ 웹/스마트기기 기반 '자동제어 장치'의 개발 · 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가

아. 연차별 연구개발 목표 및 내용

(1) 1차 연도 ([그림 1-8] 참조)

(가) 개발 목표

구분		연구 목표	연구기관
핵심성과 1	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)
핵심성과 2	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	▪ 실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가' 기술 개발	주관 (연세대)
핵심성과 3	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	▪ 전력생산 최대화를 위한, '태양광 추적' 기술 개발	주관 (연세대)

(나) 개발 내용 및 범위

연구목표		개발 내용 및 범위	연구기관
비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ 비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ 비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널 적용을 위한, 타당성 분석 (태양광 발전효율 및 경제적 측면 분석) ▪ 비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델 제작	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)
	▪ CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 생산 기술' 개발	▪ CIGS계 박막 태양광 패널 적용을 위한, 타당성 분석 태양광 발전효율 및 경제적 측면 분석) ▪ CIGS계 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델 제작	
실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가' 기술 개발	▪ 센서 네트워크 기술을 이용한, '실시간 태양광 발전량 모니터링' 기술 개발	▪ 태양광 발전량 모니터링 지표 수립 ▪ 실시간 태양광 발전량 모니터링을 위한, 센서 네트워크 알고리즘 개발	주관 (연세대)
	▪ 데이터 분석 기술을 이용한, '실시간 태양광 발전량 평가' 기술 개발	▪ 태양광 발전량 평가 지표 수립 ▪ 실시간 태양광 발전량 평가를 위한 알고리즘 개발	
전력생산 최대화를 위한, '태양광 추적' 기술 개발	▪ 기계학습을 이용한, 위치·시간/ 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) '태양광 추적' 기술 개발	▪ 지역별/일별 태양의 위치 DB와 기상조건별 태양광 발전량 분석 ▪ 기계학습을 이용한, 위치·시간/태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발	주관 (연세대)
	▪ 기계학습을 이용한, 하이브리드(위치·시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) '태양광 추적' 기술 개발	▪ 태양광 추적 방식에 따른, 태양광 발전량 특성 분석 및 최적 설계 ▪ 기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발	

(2) 2차 연도 ([그림 1-9] 참조)

(가) 개발 목표

구분		연구 목표	연구기관
핵심성과 1	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ 환기 시스템 크기, 유량, 필터를 고려한, '최적설계 및 생산 기술' 개발	주관(연세대) · 공동(핸즈온)
핵심성과 2	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	▪ 실시간 실내 공기질 및 온·습도 '모니터링 및 평가' 기술 개발	주관 (연세대)
핵심성과 3	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	▪ 실내 공기질 최적화를 위한, '환기 자동 제어' 기술 개발	주관 (연세대)

(나) 개발 내용 및 범위

연구목표		개발 내용 및 범위	연구기관
환기 시스템 크기, 유량, 필터를 고려한, '최적설계 및 생산 기술' 개발	▪ 환기 시스템 크기 및 유량을 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ 환기구 크기 및 유량별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석 (실내외 공기순환율, 실내 공기질 향상도, 경제적 측면 분석) ▪ 환기구 크기 및 유량별 프로토타입 모델 제작	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)
	▪ 공기청정 필터의 구성을 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ 공기청정 필터의 구성별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석 (실내외 공기순환율, 실내 공기질 향상도, 경제적 측면 분석) ▪ 공기청정 필터의 구성별 프로토타입 모델 제작	
실시간 실내 공기질 및 온·습도 '모니터링 및 평가' 기술 개발	▪ 센서 네트워크 기술을 이용한, '실시간 실내 공기질 및 온·습도 모니터링' 기술 개발	▪ 실내 공기질 및 온·습도 모니터링 지표 (CO_2, PM10, VOC, 온·습도 등) 수립 ▪ 실시간 실내 공기질 및 온/습도 모니터링을 위한, 센서 네트워크 알고리즘 수립	주관 (연세대)
	▪ 데이터 분석 기술을 이용한, '실시간 실내 공기질 및 온/습도 평가' 기술 개발	▪ 건물유형별/사용자 특성별 실내 공기질 및 온·습도 평가 지표 수립 ▪ 실내 공기질 및 온·습도 평가를 위한 알고리즘 개발	
실내 공기질 최적화를 위한, '환기 자동 제어' 기술 개발	▪ 기계학습을 이용한, 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 기술 개발	▪ 건물유형별/사용자 특성별 환기 특성/환기량/실내 온·습도 분석 ▪ 기계학습을 이용한, 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 알고리즘 개발	주관 (연세대)
	▪ 기계학습을 이용한, 하이브리드(환기량 & 실내 공기질) 기반의 '환기 자동제어 기술' 개발	▪ 환기 방식에 따른, 실내 공기질 및 온·습도 특성 분석 ▪ 기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 환기 자동제어 알고리즘 개발	

(3) 3차 연도 ([그림 1-10] 참조)

(가) 개발 목표

구분		연구 목표	연구기관
핵심성과 1	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	▪ '최적설계 및 생산기술별' 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가	주관 (연세대)
핵심성과 2	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	▪ 웹/스마트기기 기반 '모니터링' 장치의 개발 · 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)
핵심성과 3	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	▪ 웹/스마트기기 기반 '자동제어' 장치의 개발 · 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)

(나) 개발 내용 및 범위

연구목표		개발 내용 및 범위	연구기관
'최적설계 및 생산기술별' 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가	▪ '최적설계 및 생산기술별' 프로토타입 모델의 개발 및 성능/경제성 평가	▪ 박막태양광 패널(비결정질 실리콘계, 결정질계 & CIGS계)을 적용한 프로토타입 모델의 전력생산 성능/경제성 평가 ▪ 환기구 크기, 유량, 필터의 구성별 프로토타입 모델의 실내 환기 성능/경제성 분석	주관 (연세대)
	▪ '최적설계 및 생산기술별' 실제 현장 적용 평가	▪ 박막태양광 패널(비결정질 실리콘계, 결정질계 & CIGS계)을 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가 ▪ 환기구 크기, 유량, 필터의 구성별 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가	
웹/스마트기기 기반 '모니터링' 장치의 개발 · 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가	▪ 웹/스마트기기 기반 '모니터링' 장치의 개발 및 성능/경제성 평가	▪ 실시간 태양광 발전량 모니터링 장치 개발 및 성능/경제성 평가 ▪ 실시간 실내 공기질 모니터링 장치 개발 및 성능/경제성 평가	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)
	▪ 웹/스마트기기 기반 '모니터링' 장치의 실제 현장 적용 평가	▪ 실시간 태양광 발전량 모니터링 장치를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가 ▪ 실시간 실내 공기질 모니터링 장치를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가	
웹/스마트기기 기반 '자동제어' 장치의 개발 · 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가	▪ 웹/스마트기기 기반의 '자동제어' 장치의 개발 및 성능/경제성 평가	▪ 태양광 추적 장치(위치·시간/태양광 발전량/하이브리드 기반 양방향(2축)) 개발 및 성능/경제성 평가 ▪ 유/무선 네트워크 기술을 이용한, 환기 자동제어 장치 개발 및 성능/경제성 평가	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)
	▪ 웹/스마트기기 기반의 '자동제어' 장치의 실제 현장 적용 평가	▪ 태양광 추적 장치(위치·시간/태양광 발전량/하이브리드 기반 양방향(2축))를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가 ▪ 유/무선 네트워크 기술을 이용한, 환기 자동제어 장치를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가	

핵심성과 1 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발

주관-연세대 / 공동-핸즈온

비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발

비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널의 최적 설계 및 생산 기술 개발



비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널 적용을 위한, 타당성 (태양광 발전효율 및 경제적 측면) 분석



비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델 제작

CIGS계 박막 태양광 패널의 최적 설계 및 생산 기술 개발



CIGS계 박막 태양광 패널 적용을 위한, 타당성(태양광 발전효율 및 경제적 측면) 분석



CIGS계 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델 제작

핵심성과 2 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발

주관-연세대

실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가 기술' 개발

센서 네트워크 기술을 이용한, 실시간 태양광 발전량 모니터링 기술 개발



태양광 발전량 모니터링 지표 수립



실시간 태양광 발전량 모니터링을 위한, 센서 네트워크 알고리즘 개발

데이터 분석 기술을 이용한, 실시간 태양광 발전량 평가 기술 개발



태양광 발전량 평가 지표 수립



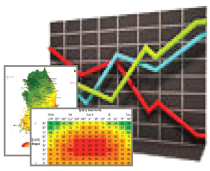
실시간 태양광 발전량 평가를 위한, 알고리즘 개발

핵심성과 3 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발

주관-연세대

전력생산 최대화를 위한 '태양광 추적 기술' 개발

기계학습을 이용한, 위치·시간/태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 기술 개발

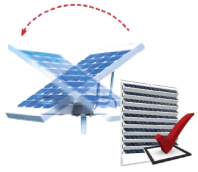


지역별/일별 태양의 위치 DB와 기상 조건별 태양광 발전량 분석



기계학습을 이용한, 위치·시간/ 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발

기계학습을 이용한, 하이브리드(위치·시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 기술 개발



태양광 추적 방식에 따른, 태양광 발전량 특성 분석 및 최적 설계



기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발

[그림 1-8] 1차 연도 연구내용

핵심성과 1 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발

주관-연세대 / 공동-핸즈온

환기 시스템의 크기, 유량, 필터를 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발

환기 시스템의 크기 및 유량을 고려한, 최적 설계 및 생산 기술 개발



환기구 크기 및 유량별 최종성과물 개발을 위한 타당성(실내·외 공기순환율, 실내 공기질 향상도, 경제적 측면) 분석

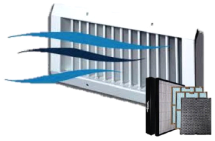


환기구 크기 및 유량별 프로토타입 모델 제작

공기청정 필터의 구성을 고려한, 최적 설계 및 생산 기술 개발



공기청정 필터의 구성별 최종성과물 개발을 위한 타당성(실내·외 공기순환율, 실내 공기질 향상도, 경제적 측면) 분석



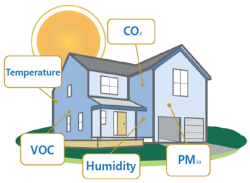
공기청정 필터의 구성별 프로토타입 모델 제작

핵심성과 2 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발

주관-연세대

실시간 실내 공기질 및 온·습도 '모니터링 및 평가 기술' 개발

센서 네트워크 기술을 이용한, 실시간 실내 공기질 및 온·습도 모니터링 기술 개발



실내 공기질(CO_2, PM_{10}, VOC 등) 및 온·습도 모니터링 지표 수립

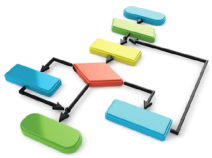


실시간 실내 공기질 및 온·습도 모니터링을 위한, 센서 네트워크 알고리즘 수립

데이터 분석 기술을 이용한, 실시간 실내 공기질 및 온·습도 평가 기술 개발



건물 유형별/사용자 특성별 실내 공기질 및 온·습도 평가 지표 수립



실내 공기질 및 온·습도 평가를 위한 알고리즘 개발

핵심성과 3 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발

주관-연세대

실내 공기질 최적화를 위한, '환기 자동 제어 기술' 개발

기계학습을 이용한, 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 기술 개발

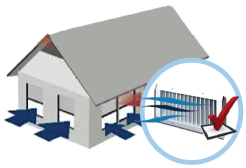


건물 유형별/사용자 특성별 환기 특성/환기량/실내 온·습도 분석



기계학습을 이용한, 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 알고리즘 개발

기계학습을 이용한, 하이브리드(환기량&실내 공기질) 기반의 환기 자동제어 기술 개발



환기 방식에 따른 실내 공기질 및 온·습도 특성 분석 및 최적 설계



기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 환기 자동제어 알고리즘 개발

[그림 1-9] 2차 연도 연구내용

핵심성과 1 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발

주관-연세대

'최적 설계 및 생산 기술별' 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가

최적 설계 및 생산 기술별 프로토타입 모델의 개발 및 성능/경제성 평가



박막태양광 패널(비결정질 실리콘계& CIGS계)을 적용한 프로토타입 모델의 전력생산 성능/경제성 평가



환기구 크기, 유량, 필터의 구성별 프로토타입 모델의 실내 환기 성능/경제성 평가

최적 설계 및 생산 기술별 실제 현장 적용 평가



박막태양광 패널(비결정질 실리콘계& CIGS계)을 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가



환기구 크기, 유량, 필터의 구성별 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가

핵심성과 2 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발

주관-연세대 공동-핸즈온

웹/스마트기기 기반 '모니터링 장치'의 개발·성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가

웹/스마트기기 기반 모니터링 장치의 개발 및 성능/경제성 평가



실시간 태양광 발전량 모니터링 장치 개발 및 성능/경제성 평가



실시간 실내 공기질 모니터링을 장치 개발 및 성능/경제성 평가

웹/스마트기기 기반 모니터링 장치의 실제 현장 적용 평가



실시간 태양광 발전량 모니터링 장치를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가



실시간 실내 공기질 모니터링 장치를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가

핵심성과 3 IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발

주관-연세대 공동-핸즈온

웹/스마트기기 기반 '자동 제어 장치'의 개발·성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가

웹/스마트기기 기반 자동제어 장치의 개발 및 성능/경제성 평가



태양광 추적 장치(위치·시간/태양광 발전량/하이브리드 기반 양방향(2축)) 개발 및 성능/경제성 평가



유/무선 네트워크 기술을 이용한, 환기 자동 제어 장치 개발 및 성능/경제성 평가

웹/스마트기기 기반 자동제어 장치의 실제 현장 적용 평가



태양광 추적 장치별 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가



유/무선 네트워크 기술을 이용한, 환기 자동 제어 장치를 적용한 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가

[그림 1-10] 3차 연도 연구내용

2. 연구 수행 내용 및 성과

가. 핵심성과 1: '최적 설계 및 생산 기술별' 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가

(1) 단위성과 1-1-① 박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 타당성 분석

(가) 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널 적용을 위한, 타당성 분석

본 연구에서는 태양광 블라인드에서의 태양광 발전량을 최대화하기 위하여, 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널에 따른 타당성 분석을 실시하였다. 타당성 분석은 크게 태양광 발전효율 및 경제성 측면에서 진행되었으며, 상-하 및 좌-우를 모두 추적할 수 있는 양방향(2축) 추적 시스템을 적용한 태양광 블라인드를 대상으로 수행되었다. 타당성 분석을 위한 프레임워크는 다음과 같이 3 단계로 구성된다.

① 1단계: 데이터 수집

본 연구에서는 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널에 따른 타당성 분석을 위하여, 다음과 같은 다양한 데이터를 수집하였다: ㉮ 대상 건축물(교육 시설물) 정보; ㉯ 박막 태양광 패널 정보; ㉰ 지역 정보. 먼저, 대상 건축물인 교육 시설물 중 초등학교 시설물의 물리적 정보(창 면적), 활용 정보(수업 일수, 학급 수, 전기 소비량), 지리적 정보(위도, 경도)를 수집하기 위하여, 본 연구에서는 한국의 16개 행정 구역에 위치한 총 6,249개의 초등학교 시설물에 대한 정보를 수집하였다. 구축된 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여, 시설물의 정보가 누락되거나 단위면적당 전기 에너지 사용량이 상위 5% 범위에 포함되는 데이터는 이상치로 판단하여 분석에서 제외하고, 총 5,418 개의 데이터를 분석에 사용하였다([표 2-1] 참조). 다음으로, 박막 태양광 패널 정보의 수집을 위하여, 기존 문헌 고찰 및 시장 조사를 통해 비결정질 실리콘계(a-Si) 패널과 CIGS계 박막 태양광 패널의 물리적 정보(전력 용량, 발전 효율, 손실량, 전지작동온도, 온도 계수)와 비용 정보(초기투자비용, 수리비용)를 수집하였다. 마지막으로, 지역 정보 수집을 위하여, 한국의 16개 행정 구역의 기상 정보(일 평균 일사량, 월 평균 기온)를 한국 에너지 기술 연구원 및 한국 기상청에서 수집하였다. 1단계에서 수집된 정보는 태양광 발전효율 측면 분석을 위한 에너지 시뮬레이션 및 경제성 측면 분석을 위한 생애주기비용(Life Cycle Cost; LCC) 분석 시 활용되었다.

[표 2-1] PV 블라인드 시스템의 타당성 분석을 위한 데이터 수집 항목 정의

구분			세부 내용
교육시설물	물리적 정보	창 면적	㎡
	활용 정보	학교 수	School
		학급 수	Class
		전기에너지 소비량	kWh
	지리적 정보	위도	°N
		경도	°E
박막 태양광 패널	물리적 정보	패널 종류	a-Si, CIGS
		전력 용량	W/㎡
		효율	%
		손실량	%
		전지작동온도	°C
		온도 계수	%
	비용 정보	초기 투자 비용	US$
		수리 비용	US$
지역	기상 정보	일 평균 일사량	kWh/㎡/day
		월 평균 기온	°C

② 2단계: 태양광 발전효율 측면 분석

태양광 발전효율 측면의 타당성 분석을 위하여, 본 연구에서는 박막 태양광 패널별 발전량을 분석 및 평가하였다. 박막 태양광 패널별 발전량을 계산하기 위하여, 단위 용량 당 평균 가격(a-Si: 2.39US$/W, CIGS: 2.53US$/W)을 기준으로 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널을 선정하였다[14]. [표 2-2]에서 보는 것과 같이, 각 박막 태양광 패널의 단위 용량 당 평균 가격의 약 89%에 해당하는 XRS18-158 (2.13US$/W)와 SF160-S (2.27 US$/W)를 분석대상 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널로 각각 선정하였다. 다음으로, 수집된 박막 태양광 패널 데이터를 활용하여, 신재생에너지 시뮬레이션 프로그램인 RETScreen을 사용하여 박막 태양광 패널별 발전량을 계산하였다. RETScreen을 사용하여 박막 태양광 패널별 발전량을 계산하기 위하여, 다음과 같은 가정사항을 설정하였다: ㉮ 태양광 블라인드를 설치 할 수 있는 창 면적 산정(설치 가능한 총 창 면적은 교실 수에 단위 교실 당 표준 창면적(18.9㎡)을 곱하여 산정); ㉯ 태양광 발전량에 영향을 주는 패널의 방위각과 기울기 산정 (RETScreen을 사용하여 태양광 블라인드가 설치된 지역 및 시간에 따른 최적의 방위각과 기울기 적용).

[표 2-2] 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널 정보

구분		박막 태양광 패널 종류	
		a-Si	CIGS
모델명		XRS18-158	SF160-S
물리적 정보	전력 용량 (W/㎡)	63.56	117.08
	효율 (%)	7.44	13.03
	손실량 (%)	5	5
	전지작동온도(℃)	51.7	47
	온도 계수 (%)	0.23	0.31
	유닛 사이즈 (㎡)	2.36	0.94
	저하율 (%/년)	0.8	0.8
비용 정보	초기투자비 (US$/W)	2.13	2.27

③ 3단계: 태양광 경제성 측면 분석

태양광 경제성 측면의 타당성 분석을 위하여, 본 연구에서는 박막 태양광 패널별 생애주기비용을 분석 및 평가하였다. 박막 태양광 패널별 생애주기비용을 계산하기 위하여, 다음과 같이 4가지 가정 사항을 설정하였다([표 2-3] 참조).

[표 2-3] 생애주기비용분석을 위한 가정 사항

분류		세부 내용	
분석 방법		현가법	
분석 시작점		2015	
분석 기간		25년	
실질 할인율	물가 상승률	3.30%	
	전기요금 상승률	0.66%	
	CO_2 배출권 거래 가격 상승률	2.66%	
비용 항목	박막 태양광 패널 종류	a-Si	CIGS
	초기투자비	135.60 US$/㎡	266.10 US$/㎡
	수선비용	초기투자비의 0.5%	초기투자비의 0.5%
이익 항목	이용 타입	독립형(자체 소비)	계통연계형
	정부 보조금	초기투자비의 50%	-
	전기요금 절감	0.047 US$/kWh(봄/가을) 0.079 US$/kWh(여름) 0.067 US$/kWh(겨울)	-
	계통한계비용	-	0.12 US$/kWh(제주특별자치도) 0.09 US$/kWh(나머지 지역)
	신재생에너지 공급인증서	-	77.81 US$/SREC
	탄소 배출권 거래제	9.04 US$/$tCO_{2eq}$	9.04 US$/$tCO_{2eq}$

분석 방법: 현재가치방법과 연관된 지표들이 사용된 본 연구는 다음을 고려하였다: ① 순현재가치(Net Present Value; NPV); ② 투자대비수익률(Saving-to-Investment Ratio; SIR); ③ 손익분기점(Break Even Point; BEP). 만약 "NPV≥0" 또는 "SIR≥1"면, 경제적 타

당성이 확보되는 것으로 평가할 수 있으며, BEP가 달성될 수 있다는 것을 의미한다 ([식 2-1]-[식 2-4] 참조).

$$NPV_n = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad \text{----------(식 2-1)}$$

$$SIR_n = \left(\sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} \right) / \left(\sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t} \right) \quad \text{----------(식 2-2)}$$

$$B_t = GS + EG_t + ET_t \quad \text{----------(식 2-3)}$$

$$C_t = IIC + RC_t \quad \text{----------(식 2-4)}$$

NPV_n : n년 후의 순현재가치
SIR_n : n년 후의 투자대비 절감비율
B_t : t년도에서의 이익
C_t : t년도에서의 비용
r : 실질 할인율
n : 분석 기간
GS : 정부의 보조금
EG_t : t년도에 생산된 발전량에 따른 이익
ET_t : t년도에 생산된 발전량으로 인한 탄소배출 감축 이익
IIC : 태양광 시스템의 초기투자비용
RC_t : t년도에 발생한 태양광 시스템의 수선 비용

분석 기간: 분석시점은 2015년으로 설정하였으며, 분석 기간은 태양광 패널 제조회사에서 제공하는 보증서에 명시된 제품의 성능보증 기간에 근거하여 25년으로 설정하였다.

실질 할인율: 한국은행 경제통계시스템과 한국전력공사의 전기요금표 등을 참고하여, 물가 상승률(3.30 %), 전기요금 상승률(0.66%), 탄소 배출권 거래가격 상승률(2.66%)에 대한 실질할인율을 산정하였다.

비용 항목: 각 박막 태양광 패널의 초기투자비는 국내 태양광 설치 업체의 견적 프로그램을 이용하여 산정하였다[15]. a-Si의 경우 135.60US$/㎡, CIGS의 경우 226.10US$/㎡를 초기투자비로 산정하였다. 또한, 수선비용은 기존 연구를 참고하여 매년 초기투자비의 0.5%가 발생하는 것으로 가정하였다.

이익 항목: 태양광 발전량으로 인한 이익은 생산된 전력을 자체적으로 소비함으로써 발생하는 이익(독립형: 정부 보조금, 전기 요금 절감)과 생산된 전력을 한전에 판매함으로써 발생하는 이익(계통연계형: 계통한계비용(Systme Marginal Price; SMP) 및 태양광 신재생에너지 공급인증서(Solar Renewable Energy Certificate; SREC), 탄소배출량 감축을 통한 환경적 이익(한국 탄소 배출권, KCER)이 발생할 수 있다. 독립형에서는 정부 보조금으로 초기투자비의 50%를 제공받을 수 있으며, 전기 요금은 봄/가을에는 0.047US$/kWh, 여름에는 0.079 US$/kWh, 겨울에는 0.067US$/kWh 만큼 절감할 수 있다. 이 경우, 탄소 배출권 가격은 9.04 US$/tCO2eq로 적용하였다. 한편, 계통연계형의 경우, 계통한계비용은 제주 지역(0.12 US$/kWh)을 제외한 나머지 지역은 0.09US$/kWh로 적용하였으며, 태양광 신재생에너지 공급인증서 가격은 77.81US$/SREC로 적용하였다. 이 경우, 탄소 배출권 가격은 9.04

US$/tCO2eq로 독립형과 동일하게 적용되었다.

(나) 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널 적용을 위한, 타당성 분석 결과

① 태양광 발전 효율 측면

태양광 발전 효율 측면에 대한 타당성 분석을 위하여, 2가지 박막 태양광 패널(a-Si, CIGS)에 따른 태양광 블라인드의 창 면적 당 발전량을 신재생에너지 시뮬레이션(RETScreen)을 통해 분석하였다([표 2-4] 및 [그림 2-1] 참조). CIGS를 적용한 태양광 블라인드의 창 면적당 발전량(187.50kWh/㎡)은 a-Si을 적용한 태양광 블라인드의 창 면적당 발전량(101.79kWh/㎡)보다 1.84배 우수한 것으로 나타났다. 이는 CIGS계 박막 태양광 패널의 전력 용량(117.08W/㎡)이 a-Si 박막 태양광 패널의 전력 용량(63.56W/㎡)보다 우수하기 때문인 것으로 분석되었다. 결과적으로, 전력 용량이 큰 CIGS계 박막 태양광 패널을 활용한다면, 태양광 블라인드의 태양광 발전량을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

② 태양광 경제성 측면

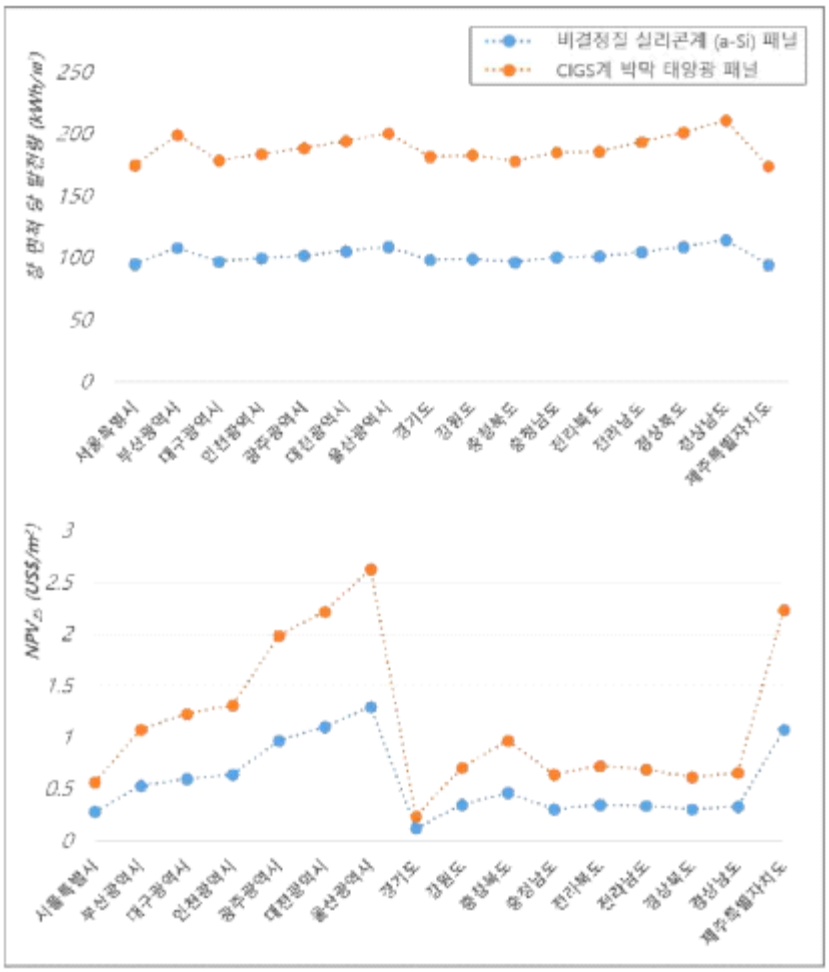
태양광 경제성 및 환경성 측면에 대한 타당성 분석을 위하여, 2가지 박막 태양광 패널(a-Si, CIGS)에 따른 태양광 블라인드의 생애주기비용분석 결과를 절대적 투자가치 지표인 NPV와, 상대적 투자가치 지표인 SIR 및 BEP로 제시하였다([표 2-5] 및 [그림 2-1] 참조). 25년의 분석기간으로 전생애주기비용을 분석한 결과, CIGS를 적용한 태양광 블라인드의 NPV(1.16US$/㎡)는 a-Si를 적용한 태양광 블라인드의 NPV(0.56US$/㎡)보다 2.07-2.10배 높은 것으로 나타났다. 마찬가지로, CIGS를 적용한 태양광 블라인드의 SIR(1.97) 및 BEP(7.6년)가 a-Si을 적용한 태양광 블라인드의 SIR(1.73) 및 BEP(9.1년)보다 우수한 것으로 분석되어, CIGS를 적용한 태양광 블라인드의 투자가치가 더 높은 것으로 평가되었다. 이는, CIGS를 적용한 태양광 블라인드의 초기투자비(2.27US$/W)가 다소 높더라도, 전생애주기비용 측면에서는 CIGS계 박막 태양광 패널을 사용하는 것이 더 큰 이익을 가져올 수 있는 것으로 분석되었다.

[표 2-4] 박막 태양광 패널별 창 면적 당 발전량 분석 결과 (태양광 발전 효율 측면)

번호	지역	창 면적 당 발전량 (kWh/㎡)	
		a-Si	CIGS
1	서울특별시	95.05	175.08
2	부산광역시	108.11	199.13
3	대구광역시	97.36	179.34
4	인천광역시	99.76	183.77
5	광주광역시	102.38	188.59
6	대전광역시	105.64	194.59
7	울산광역시	108.86	200.52
8	경기도	98.89	182.15
9	강원도	99.33	182.98
10	충청북도	96.63	178.00
11	충청남도	100.68	185.45
12	전라북도	101.14	186.30
13	전라남도	105.26	193.88
14	경상북도	109.43	201.57
15	경상남도	114.76	211.40
16	제주특별자치도	94.71	174.45
평균		101.79	187.50

[표 2-5] 박막 태양광 패널별 생애주기비용 분석 결과 (태양광 경제성 측면)

번호	지 역	a-Si			CIGS		
		NPV (US$/㎡)	SIR	BEP (년)	NPV_{25} (US$/㎡)	SIR	BEP (년)
1	서울특별시	0.28	1.67	10.0	0.57	1.88	8.0
2	부산광역시	0.53	1.84	8.1	1.08	2.08	7.0
3	대구광역시	0.60	1.70	9.1	1.23	1.91	8.0
4	인천광역시	0.64	1.71	9.2	1.31	1.94	8.0
5	광주광역시	0.97	1.75	9.0	1.98	1.98	7.3
6	대전광역시	1.10	1.80	8.9	2.22	2.03	7.0
7	울산광역시	1.30	1.84	8.2	2.63	2.08	7.0
8	경기도	0.12	1.70	9.2	0.24	1.92	8.0
9	강원도	0.35	1.67	9.7	0.71	1.91	8.0
10	충청북도	0.47	1.65	9.7	0.97	1.87	8.0
11	충청남도	0.31	1.69	9.4	0.64	1.93	8.0
12	전라북도	0.35	1.70	9.4	0.73	1.93	8.0
13	전라남도	0.34	1.74	9.1	0.69	1.98	7.4
14	경상북도	0.31	1.81	8.6	0.62	2.06	7.0
15	경상남도	0.33	1.89	8.0	0.66	2.15	7.0
16	제주특별자치도	1.08	1.62	10.2	2.24	1.84	8.1
평균		0.56	1.73	9.1	1.16	1.97	7.6



[그림 2-1] 박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 타당성 분석 결과

(다) 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널 적용을 위한, 타당성 분석

본 연구진은 지난 1차 연도에 효율은 좋지만 무겁고 유연성이 없으며 음영효과가 높은 1세대 태양광 패널의 단점을 보완하기 위하여, 1세대 태양광 패널보다 가볍고 유연하며, 음영효과가 낮은 2세대 태양광 패널을 7차 프로토타입에 적용하고자 하였다. 2세대 태양광 패널 중 CIGS계 박막 태양광 패널의 경우 관련 업계의 불황으로 제품 생산에 한계가 있었으며, 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 경우에는 본 연구의 목적에 맞게 블라인드 형태로 주문 제작이 가능하였다. 이에 따라, 지난 1차, 2차 연도에서는 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 활용하여 프로토타입 모델을 개발하였다. 하지만, 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널은 박막형 태양전지를 유리 기판 사이에 주입하는 방식으로 제작되며, 낮은 효율과 불안정성 때문에 상용화되지 못해 가격이 매우 비싼 것으로 나타났다. 나아가 비결정질 실리콘계(a-Si)를 기반으로, 프로토타입 모델을 제작하기에는 제품의 단가가 매우 높아져, 본 연구에서는 가격 대비 기술적 성능이 좋은 태양광 패널에 대한 연구를 추가적으로 수행하고자 하였다.

최근, 1세대 태양광 패널은 단가의 하락과 정부의 보조정책으로 그 시장이 매년 계속해서 성장함에 따라, 뛰어난 가성비의 제품이 많이 생산되고 있다. 또한, 좁은 면적에 높은 출력

을 내야하는 태양광 블라인드 제품은 가성비가 좋은 1세대 태양광 패널의 적용이 효과적일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1세대 태양광 패널 중 가벼우면서도 면적당 효율은 높고, 가격도 비교적 저렴한 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 7차 프로토타입 모델에 적용하여 제품의 기술적 성능 실험을 수행하고자 하였다. 또한, 지난 1차 연도에 제작하였던 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 7차 프로토타입 모델에 적용하고 실험을 통해 제품의 기술적 성능을 비교함으로써, 7차 프로토타입 모델에 적합한 태양광 패널을 선정하고자 하였다. 수행된 실험은 비결정질 실리콘계(a-Si)과 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 동일한 조건으로 프로토타입 모델에 각각 적용하여, 2018년 3월 16일부터 25일까지 총 7일간 서울시 서대문구에 위치한 연세대학교 공학원(위도: 37.33°, 경도: 126.56°)에서 아래의 [표 2-6]와 같이 수행하였다 ([표 2-7] 참조).

[표 2-6] 실험의 개요

구분	세부사항
실험 시간	10:00 - 16:00(6 hours)
설치 방향	남(180°)
추적 범위	-6° to +6 (좌-우), 0° to 60°(상-하)
추적 방식	위치 • 시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식
추적 주기	4분

[표 2-7]에서 보여주고 있는 실험결과를 살펴보면, 7일간의 누적 발전량은 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널보다 1.3배 더 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 일 발전량의 경우에는 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널보다 최대 2배, 평균 1.3배 더 높게 나타났다. 또한, 7일 중 맑은 날(3월16일, 22일, 23일, 25일)보다 흐린 날(3월18일, 21일) 두 패널의 발전량의 차이가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 맑은 날(3월22일)의 경우에는 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 발전량이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 발전량보다 1.2배 더 높았으며, 흐린 날(3월18일)의 경우에는 1.5배 더 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

[표 2-7] 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 일 발전량

날짜	3/16	3/17	3/18	3/19	3/20	3/21	3/22	누적 발전량(Wh)
날씨	맑음	흐림	흐림	맑음	맑음	구름 조금	맑음	-
결정질 실리콘계 태양광 패널의 발전량 (Wh)	12.65	3.15	4.76	10.28	9.66	7.73	8.7	56.93
비결정질 실리콘계 태양광 패널의 발전량 (Wh)	14.11	6.37	6.14	12.85	12.97	10.52	10.59	73.55

또한, 본 연구에서는 패널 종류에 따라 2가지 관점의 비교분석을 진행하였다: ① 기술적 성능; ② 경제적 성능. 먼저, 기술적 성능 관점에서 분석한 결과, 7일 중 운량이 0% 인 맑

은 날(3월 16일)에 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 일 발전량(14.11Wh)이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 일 발전량(12.65Wh)보다 1.1배 더 높게 나타났다. 또한, 시간에 따라 패널 종류별로 생산 발전량의 패턴이 크게 두 구간으로 나뉘는 것으로 분석되었다. 첫째, [그림 2-2]의 'A'구간은 태양이 제품의 동쪽에 위치하는 오전 10시에서 오전 11시 18분까지의 시간과 태양이 제품의 서쪽에 위치하는 오후 1시 52분에서 오후 4시까지의 시간을 나타낸다. 이 구간은 태양이 동쪽이나 서쪽에 있어, 태양광 블라인드 슬랫이 태양광을 추적할 때 제품 자체의 프레임으로 인한 음영효과가 많이 발생한다. 따라서 음영효과에 의한 생산 효율 저하가 적은 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 발전량이 음영효과에 의한 효율 저하가 큰 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 발전량보다 더 높게 나타났다. 둘째, [그림 2-2]의 'B'구간은 태양이 남중고도에 가깝게 위치하는 오전 11시 18분에서 오후 1시 52분까지를 나타낸다. 태양의 남중고도에 가깝게 위치하는 'B'구간은 음영효과가 비교적 적게 발생하기 때문에, 일반적으로 면적 당 발전 효율이 더 높은 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 발전량이 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 발전량보다 더 높게 나타났다 ([그림 2-2], [표 2-7], [표 2-8] 참조).

다음으로, 경제적 성능 관점에서 분석한 결과, 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 단가가 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 단가보다 더 비싼 것으로 분석되었다. 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널은 박막형 태양 전지를 유리 기판 사이에 주입하여 제작하기 때문에 유리비용이 추가적으로 들어갈 뿐만 아니라, 일반 태양광 패널과는 다른 얇은 블라인드 형태로 제작하기 위해서는 비용이 많이 든다. 반면, 오랜 기간 동안 가장 많이 사용된 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널은 현재까지도 태양광 시장의 주를 이루고 있기 때문에, 수요의 증가와 관련 시장의 증가로 제조기술은 더욱 발전하였으며 단가는 하락하였다. 이에 따라, 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널은 가성비 좋은 제품들이 많이 개발되었다. 결국, 6차 프로토타입 모델에서 패널이 차지하는 면적($0.3m^2$)당 단가를 계산하였을 때, 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 면적당 단가(180,000 원/$0.3m^2$)가 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 면적당 단가(1,435,760 원/$0.3m^2$)보다 7.9배 비싼 것으로 분석되었다 ([그림 2-2], [표 2-8], [표 2-9] 참조).

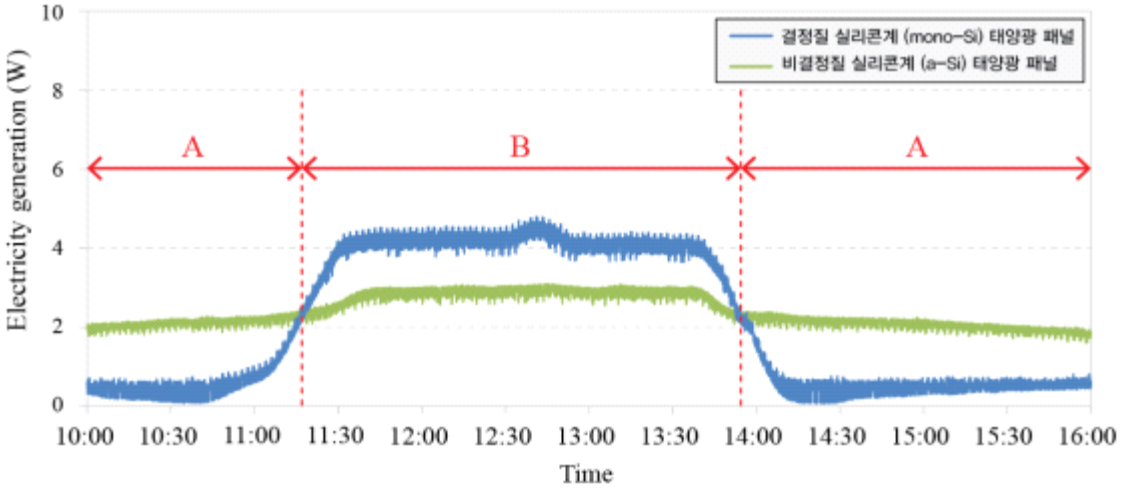
결과를 종합해보면, 두 가지 태양광 패널 중 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 전력 생산 성능이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널보다 1.1배 더 좋지만, 제품의 단가는 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널보다 7.9배 더 비싼 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 7차 프로토타입 모델의 단가를 낮추기 위해, 가성비가 좋은 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 제품에 적용하기로 결정하였다.

[표 2-8] 태양광 패널 종류에 따른 특성

구분	1세대 태양광 패널	2세대 태양광 패널
	결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널	비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널
패널의 효율(%)	고효율(14.5 %)	저효율(5.8 %)
그림자에 의한 음영효과	높음	낮음
패널면적당 단가(원/$0.3m^2$)	낮음(180,000 원/$0.3m^2$)	높음(1,435,760 원/$0.3m^2$)

[표 2-9] 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 시간별 발전량(3월16일)

시간(시)	10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00
결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 발전량(Wh)	0.49	3.15	4.26	3.69	0.54	0.51
비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 발전량(Wh)	2.04	2.51	2.86	2.69	2.10	1.91



[그림 2-2] 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 시간별 발전량(3월16일)

(2) 단위성과 1-1-② 박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 프로토타입 모델 개발

(가) 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델 개발

본 연구에서는 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델을 제작하기 위하여, 박막 태양광 패널의 종류, 발전 효율성, 시공성 등 다양한 요소들을 고려하였다. 박막 태양광 패널의 종류는 세대별로 크게 3가지로 구분 할 수 있다[16)17)18)19)20)]: ① 1세대 태양광 기술(단결정 실리콘계(mono-si), 다결정 실리콘계(poly-Si)); ② 2세대 태양광 기술(비결정질 실리콘계(a-Si), CIGS계, 카드뮴 텔루리드(CdTe) 박막계); ③ 3세대 태양광 기술 (염료 감응형 태양 전지(DSSP), 유기 태양광(OPV) 패널, 나노 태양광 패널). 이 중 3세대 태양광 기술은 현재 실험단계이기 때문에, 본 연구에서는 3세대 태양광 기술을 제외한 1세대와 2세대 태양광 패널 및 기술을 비교하여 적용하고자 하였다.

먼저, 세대 별 태양광 패널의 사용성 및 시공성을 고려하여 제품에 적용하기에 가장 적합한 태양광 패널을 결정하였다. 첫째, 태양광 패널의 효율은 일사량을 전기로 변환하는 광전효과에 의해 결정되는 요소로서, 태양전지의 광전 효과가 클수록, 태양광 패널의 효율도 증가한다. [표 2-10]에서 알 수 있듯이, 2세대 태양광 패널의 효율(a-Si: 5.8%, CIGS: 10.5%,

CdTe: 9.9%)보다 1세대 태양광 패널의 효율(mono-si: 14.5%, poly-si: 14.0%)이 1.33~2.50배 우수하다. 그러나, 1세대 태양광 패널과 달리 2세대 태양광 패널은 박막 태양광 기술이 활용되어 적용가능성이 우수하다. 둘째, 태양광 패널의 음영 효과는 태양광 패널의 발전 성능에 큰 영향을 미치는 요소로서, 태양광 패널의 종류별로 그 민감도에 차이가 있다. 2세대 태양광 패널(a-Si, CIGS, CdTe)은 1세대 태양광 패널(mono-Si, poly-Si)보다 음영 효과가 우수하다. 따라서, 태양광 패널의 적용가능성 및 음영 효과와 관련하여 2세대 태양광 패널은 태양광 블라인드에 적용 가능한 태양광 기술로 선정되었다. 셋째, 태양광 패널의 유해성은 독성자재의 사용여부에 따라 결정되는 요소이다. 한국의 '신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행규칙'에 따라, 카드뮴이나 텔루르와 같은 독성 자재를 사용하여 제조된 CdTe 박막 태양광 패널은 고려대상에서 제외되었다.

[표 2-10] 세대 별 태양광 패널의 사용성 및 시공성 비교

구분			1세대 태양광 패널		2세대 태양광 패널		
			Mono-Si	Poly-Si	a-Si	CIGS	CdTe
사용성	효율		14.5%	14.0%	5.8%	10.5%	9.9%
	음영 효과		높음	높음	낮음	낮음	낮음
	유해성		X	X	X	X	○
시공성	크기	폭	63mm	44mm	60mm	주문제작	주문제작
		길이	125mm	60mm	205mm	주문제작	주문제작
		두께	3mm	3mm	1mm	1mm	1mm
	무게		5.1kg/m2	4.17kg/㎡	1.95kg/㎡	0.31kg/㎡	0.24kg/㎡

다음으로, 제품의 시공성을 고려하여 태양광 블라인드의 슬랫 크기(폭, 길이, 두께)와 무게를 결정하였다. 블라인드에서 슬랫은 상-하 또는 좌-우 회전 각도의 조절을 통해 차양 기능을 수행하기 때문에, 이에 영향을 미치는 슬랫의 크기와 무게는 중요한 요소이다. 이와 같이, 본 연구에서 개발하고자 하는 '7차 프로토타입 모델'의 태양광 블라인드 부분에서는 태양광 패널이 블라인드의 슬랫 역할을 하기 때문에, 태양광 패널의 크기와 무게도 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 따라서, 본 연구는 기존의 다양한 블라인드 시스템 중에서, 크기와 무게 측면에서 다른 블라인드에 비해 우세한 우드 베네시안 블라인드의 크기와 무게를 기준으로 태양광 블라인드에 적용 가능한 박막 태양광 패널을 결정하였다([표 2-10] - [표 2-11] 참조). 첫째, 크기 측면에서 1세대와 2세대 태양광 패널은 베네시안 블라인드의 사양(폭: 63.5mm 이하, 길이: 2,438mm 이하, 두께: 3mm 이하)을 만족한다. 둘째, 무게 측면에서, 1세대 태양광 패널(mono-Si: 5.1kg/㎡, poly-Si: 4.17kg/㎡)은 베네시안 블라인드의 사양(무게: 3kg/㎡)을 만족하지 못하는 반면, 2세대 태양광 패널(a-Si: 1.95kg/㎡, CIGS: 0.31kg/㎡)은 만족한다. 결과적으로, 위의 요소들을 고려하였을 때, 2세대 태양광 패널이 태양광 블라인드에 적용 가능한 것으로 결정되었다. 따라서, 2세대 태양광 패널 중 독성물질을 포함하고 있는 CdTd 박막 태양광 패널을 제외하고, 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널을 대상으로 타당성 분석 및 프로토타입 모델 제작을 진행하였다.

[표 2-11] 우드 베네시안 블라인드와 2세대 태양광 패널의 사양 비교

구분		우드 베네시안 블라인드	2세대 태양광 패널	
			비결정질 실리콘계 (a-Si) 패널	CIGS계 박막 태양광 패널
크기	폭	25.4mm, 50.8mm, 63.5mm	60mm	주문제작
	길이	최대: 2,438mm	60mm	주문제작
	두께	3mm	1mm	1mm
무게		3kg/㎡	1.95kg/㎡	0.31kg/㎡

한편, 태양광 블라인드의 발전량을 최대화하기 위하여, 본 연구에서는 최적의 태양광 패널 크기(폭, 길이, 두께)을 결정해야한다. 이를 위해, 본 연구에서는 세 가지 요인을 고려하였다: ① 태양광 패널의 폭; ② 태양광 패널의 길이; ③ 제품의 중심선과 외부 창 사이의 거리. 첫째, 기존 연구에 따르면, 태양광 패널의 길이는 단위면적당 발전량에 미치는 영향이 작다. 하지만, 태양광 패널의 길이는 태양광 추적의 범위에 영향을 미치는 요소로서 고려되어야 한다. 둘째, 기존 연구에 따르면, 태양광 패널의 폭은 단위면적당 발전량에 큰 영향을 미치는 요인이다. 이는, 태양광 패널의 폭을 증가시킬수록, 상부 슬랫으로 인한 음영효과가 증가하기 때문이다. 그러므로, 태양광 발전량을 최대화하기 위하여, 최적의 태양광 패널의 폭을 결정하는 것이 필요하다. 셋째, 기존 연구에 따르면, 다기능 스마트 창호의 중심선과 외부 창 사이의 거리는 단위면적당 발전량에 영향을 미치는 요인이다. 이는, 다기능 스마트 창호와 외부 창 사이의 거리가 멀어질수록, 일사량이 줄어들어, 발전량이 줄어들기 때문이다.

(나) 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 프로토타입 모델 개발성과

본 연구에서는 제품의 사용성, 시공성, 발전효율성의 세 가지 요인을 고려하여 프로토타입 모델을 개발하였다. 본 연구의 성과로 최종 제작된 5차 프로토타입 모델에 앞서, 1 - 4차 프로토타입 모델이 기 제작되었다([그림 2-3] 참조). 먼저, 1차 프로토타입 모델의 경우, Lego 제품을 기반으로, CIGS계 박막 태양광 패널을 사용하여 최종성과물의 핵심기술요소의 구현가능성을 검토하였다. 다음으로, 2차 프로토타입 모델의 경우, a-Si 박막 태양광 패널과 양방향(2축) 태양광 추적방식을 사용하여, 최종성과물의 핵심기술요소의 통합 및 성능검증을 수행하였다. 3차 프로토타입 모델의 경우, 마찬가지로 a-Si 박막 태양광 패널과 양방향(2축) 태양광 추적방식을 사용하여, 기본적인 성능 시험 평가가 진행되었다. 마지막으로, 4차 프로토타입 모델의 경우, 마찬가지로 a-Si 박막 태양광 패널과 양방향(2축) 태양광 추적방식을 사용하여, 실제 환경에서의 성능 시험을 수행하였다. 앞서 제작된 1 - 4차 프로토타입 모델을 살펴보면, 1차 프로토타입 모델을 제외한 2 - 4차 프로토타입 모델의 경우, 모두 a-Si 박막 태양광 패널을 사용하여 제작되었다. 위의 [표 2-10]에서 보여주는 것과 같이, a-Si 박막 태양광 패널의 효율과 비교하였을 때, CIGS 박막 태양광 패널의 효율이 더 우수하다. 그럼에도 불구하고, 4차 프로토타입 모델은 a-Si 박막 태양광 패널을 사용하였다.

이는, a-Si 박막 태양광 패널과는 달리, CIGS 박막 태양광 패널은 블라인드 슬랫에 적용 가능한 작은 크기의 제품으로 생산되지 않고 있기 때문이다. 1차 프로토타입 모델의 경우, [표 2-12]에서도 볼 수 있듯이, 수급 가능한 대형 CIGS 박막 태양광 패널(크기: 398mm×2197mm×2mm)을 활용하여, 자체적으로 알맞은 크기로 제작하였으나, 이로 인해 발전효율 및 미관성이 다소 떨어지는 결과를 초래하였다. 따라서, 2 - 4차 프로토타입 모델에서는 시작품 제작을 위한 부품의 수급과 전력 측정결과의 안정성 및 신뢰성, 그리고 미관성을 고려하여, a-Si 박막 태양광 패널을 이용하였다.

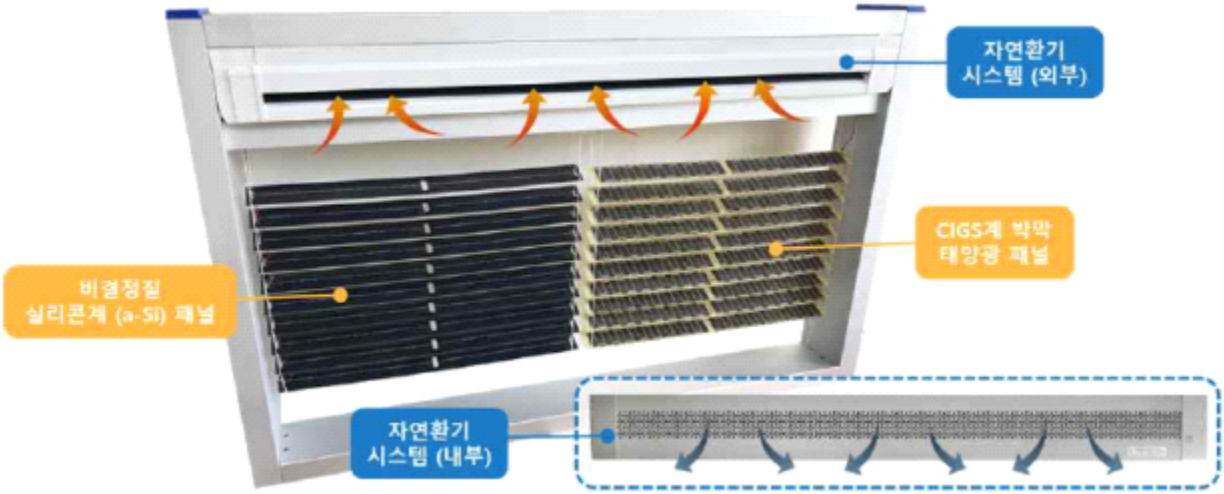


[그림 2-3] 1-4차 프로토타입 모델

최종 프로토타입 모델인 5차 프로토타입 모델 제작에 앞서 마지막으로 개발된 4차 프로토타입 모델을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 4차 프로토타입 모델은 '502500-16V'의 a-Si 박막 태양광 패널을 사용하여, 각 패널이 병렬로 연결되도록 제작하였다. 더불어, 4차 프로토타입 모델은 1열당 10개의 블라인드 슬랫으로 구성하여, 총 4열(총 40개의 블라인드 슬랫)로 제작되었다. 둘째, 본 연구에서 개발하고자 하는 제품의 길이는 설치하게 될 환경과 사용자의 결정에 따라, 조절할 수 있다. 그러나 시작품 제작을 위한 부품의 수급과 전력량 측정결과의 안정성 및 신뢰성을 고려하여, 4차 프로토타입 모델의 길이는 기존의 태양광 패널의 사이즈를 기준으로 결정하였다. 따라서, 패널의 길이는 '502500-16V'의 a-Si 박막 태양광 패널을 기준으로, 250mm로 결정되었다. 셋째, 패널의 폭은 블라인드 종류(베네시안 블라인드, 플리티드 블라인드)에 따라 제품에 적용되는 태양광 패널의 폭을 결정할 수 있다. 본 연구는 표준 베네시안 블라인드의 사이즈를 기준으로, 태양광 패널의 폭을 50mm로 결정하였다. 또한, 제품의 중심선과 외부 창 사이의 거리가 멀어질수록, 발전성능이 저하되기 때문에, 제품의 중심선과 외부 창 사이의 거리는 25mm로 결정하였다([표 2-12] 참조).

본 연구에서는 기 제작된 1 - 4차 프로토타입 모델을 바탕으로, 5차 프로토타입 모델을 제작하였다([그림 2-4] 참조). 첫째, 2세대 태양광 패널에 따른, 즉 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 효율에 따른 발전량을 서로 비교하기 위하여, 5차 프로토타입 모델에서는 비결정질 실리콘계 (a-Si)와 CIGS계 박막 태양광 패널을 모두 적용하여 각 1열씩 총 2열로 제작하였다. a-Si 박막 태양광 패널의 경우, 아래의 [표 2-12]에서 볼 수 있듯이 4차 프로토타입 모델 제작 시 사용했던 태양전지를 활용하여 주문제작 하였으며, CIGS계 박막 태양광 패널은 앞서 설명했듯이, 국내 구입이 어려워, Solopower에서 제작한 태양전지를 사용하여 직접 제작하였다. 제작 시, 전력 충전 및 사용이 가능하게 하

는 최대전압 조건(최소 12V 이상)을 만족하기 위하여, 셀을 15mm 간격으로 직접 커팅하여 직렬로 연결하여 1개의 블라인드 슬랫을 제작하였다. 또한, 각 비결정질 실리콘계 (a-Si)와 CIGS계 박막 태양광 패널은 4차 프로토타입과 동일하게 1열 당 10개의 블라인드 슬랫을 병렬로 연결하였다.



[그림 2-4] 5차 프로토타입 모델

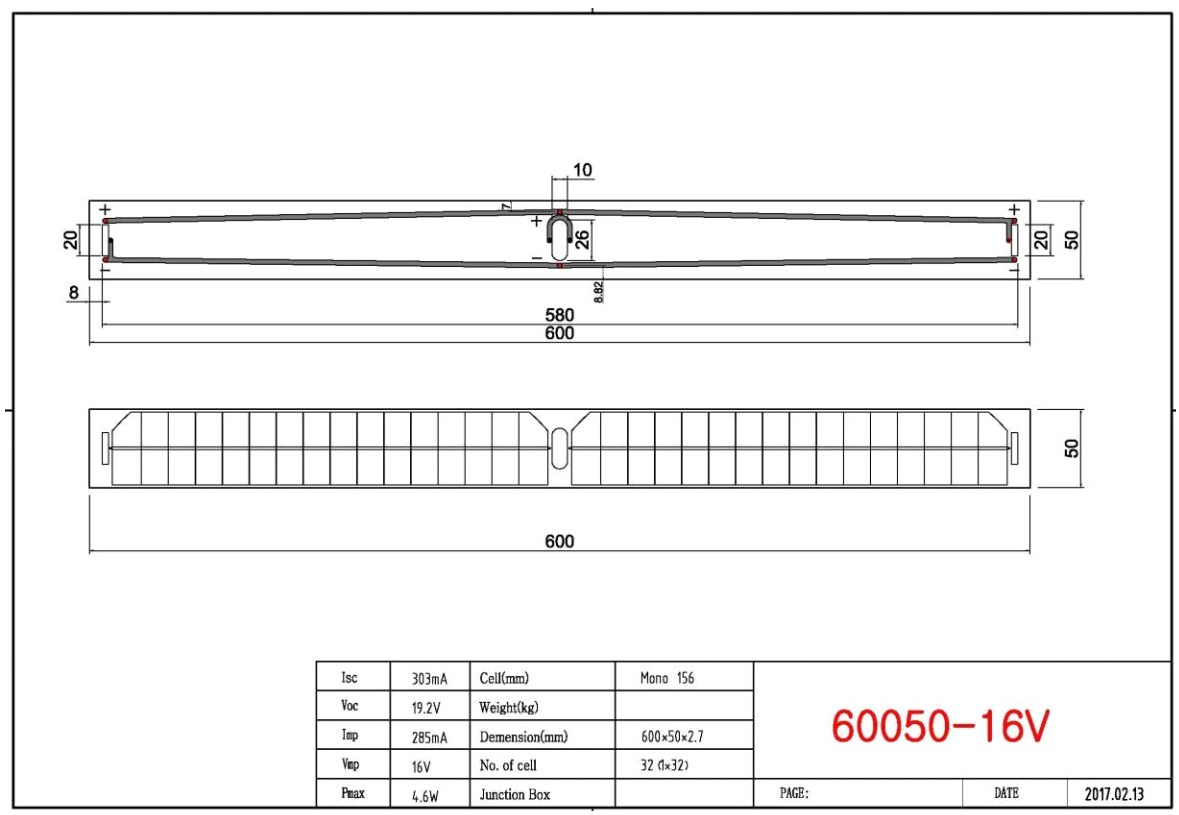
둘째, 5차 프로토타입 모델에 사용될 태양광 블라인드의 슬랫 길이를 결정하였다. 4차 프로토타입 모델에 사용된 태양광 블라인드의 슬랫 크기(300mm×50mm×2mm)는 일반적으로 사용되는 블라인드의 슬랫 크기와 큰 차이를 보였으며, 발전량도 작아 태양광 발전량 모니터링 및 추적에 어려움이 많았다. 따라서, 5차 프로토타입 모델에서는 태양광 블라인드의 슬랫 길이를 600mm로 늘려, 크기에 따른 한계를 극복하고자 하였다. 하지만, 블라인드 슬랫이 길어지면 발전량의 크기는 증가하지만, 좌-우 추적을 위한 회전 반경이 넓어짐에 따른 문제점(프로토타입 모델의 크기(두께) 증가, 음영 효과 등)이 발생할 수 있기 때문에 태양광 추적 시 단점으로 작용될 수 있다.

[표 2-12] 프로토타입 모델별 PV 패널의 사양

구분	1차 모델	2차 모델	3차 모델	4차 모델	5차 모델	
	CIGS	a-Si	a-Si	a-Si	a-Si	CIGS
모델명	SP1-75	502500-16V (주문제작)	502500-16V (주문제작)	502500-16V (주문제작)	60050-16V (주문제작)	SL1-75
제조사	Solopower	Solar Center	Solar Center	Solar Center	Solar Center	Solopower
패널 크기 (mm)	398×2197×2	250×50×2	250×50×2	250×50×2	600×50×2	369×38×0.3
최대 전력 (Pmax)	75W	1.5W	1.5W	1.5W	4.6W	1.25W
최대 전압 (Vmp)	21.8V	16V	16V	16V	16V	0.5V
최적 구동 전류 (Imp)	3.4A	95mA	95mA	95mA	285mA	-
단락 전류 (Isc)	4.3A	99mA	99mA	99mA	303mA	-
개방 회로 전압 (Voc)	30.6V	19.4V	19.4V	19.4V	19.2V	-

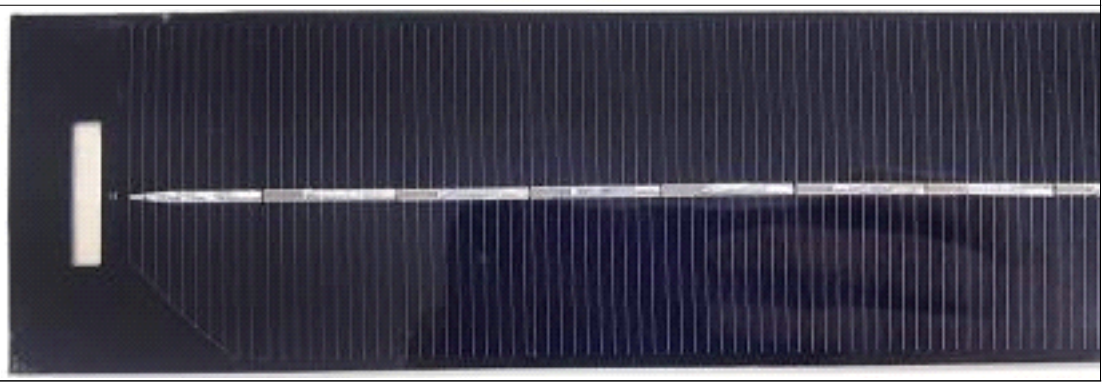
둘째, 5차 프로토타입 모델에 사용될 태양광 블라인드의 슬랫 길이를 결정하였다. 4차 프로토타입 모델에 사용된 태양광 블라인드의 슬랫 크기(300mm×50mm×2mm)는 일반적으로 사용되는 블라인드의 슬랫 크기와 큰 차이를 보였으며, 발전량도 작아 태양광 발전량 모니터링 및 추적에 어려움이 많았다. 따라서, 5차 프로토타입 모델에서는 태양광 블라인드의 슬랫 길이를 600mm로 늘려, 크기에 따른 한계를 극복하고자 하였다. 하지만, 블라인드 슬랫이 길어지면 발전량의 크기는 증가하지만, 좌-우 추적을 위한 회전 반경이 넓어짐에 따른 문제점(프로토타입 모델의 크기(두께) 증가, 음영 효과 등)이 발생할 수 있기 때문에 태양광 추적 시 단점으로 작용될 수 있다.

셋째, 5차 프로토타입 모델에 사용될 태양광 블라인드의 슬랫 폭은 4차 프로토타입과 동일하게 표준 베네시안 블라인드의 사이즈를 기준으로, 50mm로 결정하였다 ([표 2-12] 참조). 따라서, 5차 프로토타입에 적용된 태양광 블라인드는 길이 600mm, 폭 50mm, 두께 2mm의 a-Si 박막 태양광 블라인드 슬랫 10개를 연결한 1열과, 같은 사이즈의 CIGS계 박막 태양광 블라인드 슬랫 10개를 연결한 1열, 총 2열로 제작하였으며, 이에 따른 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제작한 비결정질 실리콘계(a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 PCB는 아래의 [그림 2-5], [표 2-13], [표 2-14]에서 자세히 보여주고 있다.

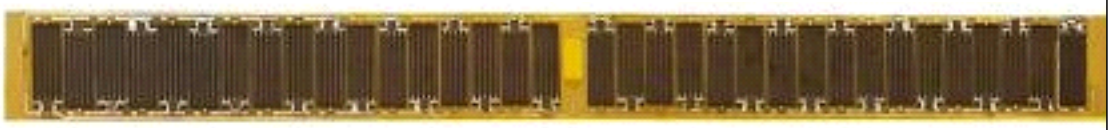
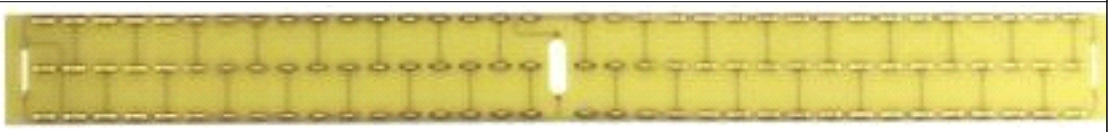
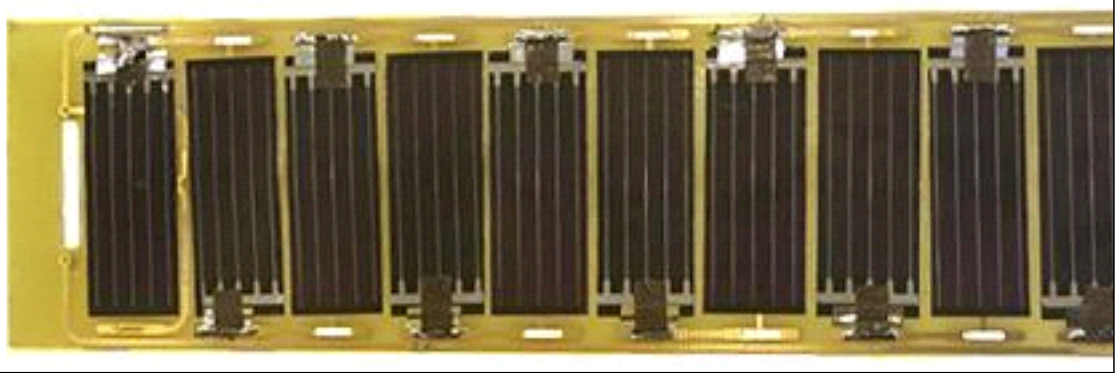


[그림 2-5] 비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널의 PCB 설계 도면

[표 2-13] 비결정질 실리콘계(a-Si) 박막 태양광 패널의 실제 PCB 사진

구분	비결정질 실리콘계 (a-Si) 패널
앞면	
뒷면	
세부 사진	

[표 2-14] CIGS계 박막 태양광 패널의 실제 PCB 사진

구분	CIGS계 박막 태양광 패널
앞면	
뒷면	
세부 사진	

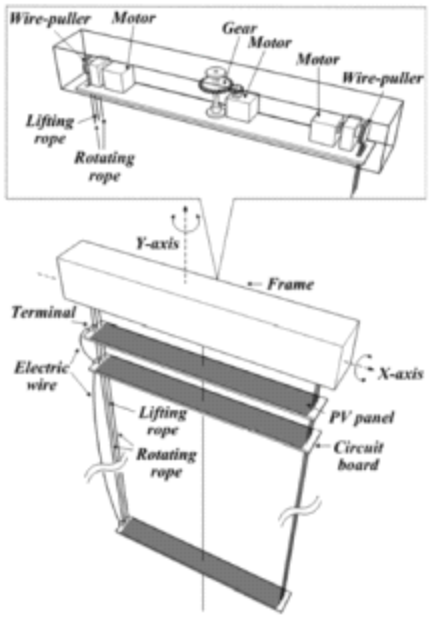
결정된 태양광 블라인드 슬랫의 크기에 따라 프로토타입 모델의 크기를 결정하였다. 600mm 길이의 비결정질 실리콘계 (a-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널을 2열로 적용함에 따라, 프로토타입 모델의 너비는 1,345mm로 결정하였다. 프로토타입 모델의 높이는 환기시스템의 높이와 10개의 태양광 블라인드 슬랫 높이를 고려하여 780mm로 결정하였다. 제품

의 두께는 창호의 두께에 따라 결정될 수 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 블라인드 슬랫이 길어지면서 좌-우 추적을 위한 회전 반경이 넓어져 프로토타입 모델의 두께의 증가를 야기하였다. 즉, 5차 프로토타입 모델의 두께는 4차 프로토타입 모델의 두께(100mm)와 비교하여, 50mm 증가한 150mm로 결정하였다([표 2-15] 참조).

[표 2-15] 프로토타입 모델별 사양

구분	1차 모델	2차 모델	3차 모델	4차 모델	5차 모델
사용 패널 종류	CIGS	a-Si	a-Si	a-Si	a-Si, CIGS
태양광 블라인드 슬랫 크기 (mm)	200×50×2	300×50×2	300×50×2	300×50×2	600×50×2
추적 방식	단방향(1축)	양방향(2축)	양방향(2축)	양방향(2축)	양방향(2축)
	태양광 발전량	태양광 발전량	태양광 발전량	태양광 발전량	시간·위치 태양광 발전량
모델 크기 (mm)	300×648 ×50	700×648 ×100	1,310×648 ×104	1,310×648 ×104	1,345×780 ×150

[그림 2-6]은 5차 프로토타입 모델의 구성 다이어그램을 보여주고 있다. 5차 프로토타입 모델에 사용된 태양광 블라인드는 박막 태양광 패널(a-Si, CIGS)로 구성되어 있어, 블라인드의 본래 기능(태양열을 차단하여 실내 냉방부하를 감소시킴)과 태양광 시스템의 기능(태양광 패널로부터 전력생산)을 동시에 가질 수 있다. 또한, 본 5차 프로토타입 모델은 다량의 블라인드 슬랫, 태양광 추적 장치, 회로 기판 및 구동 장치를 포함 하고 있다. 특히, 태양광 블라인드 슬랫 각도를 제어할 수 있도록 구성된 회전 로프와 각 블라인드 슬랫을 roll-up 시키는 리프팅 로프, 전기 신호를 전송하도록 구성된 회로 보드와 블라인드 슬랫의 발전량을 제어할 수 있도록 구성된 구동 유닛을 포함하고 있다.

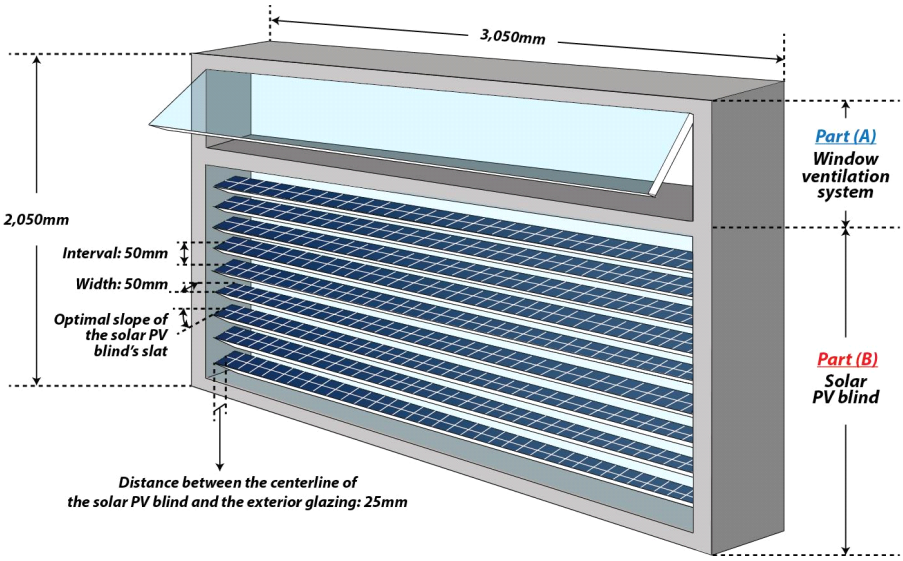


[그림 2-6] 5차 프로토타입 모델의 구성 다이어그램

(3) 단위성과 1-2-① 환기 시스템의 타당성 분석

(가) 환기구 크기 및 유량별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석

① 환기 시스템의 크기 및 유량을 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발



[그림 2-7] 프로토타입 모델의 규격 및 제원

본 연구진은 환기구의 크기와 유량을 고려한 다기능 창호 제품의 최적 설계안을 도출하기 위해, 기술적·환경적·경제적 성능 관점의 타당성 분석을 수행하였다. 이는 다음의 4단계의 프레임워크에 따라 진행되었다: Ⅰ) 설계 변수 정의; Ⅱ) 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용한 기술적 성능 분석; Ⅲ) 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용한 환경적 성능 분석; Ⅳ) 생애주기비용분석 기반의 경제적 성능 분석.

Ⅰ) 설계 변수 정의

본 연구에서는 다기능 창호 제품의 기술적·환경적·경제적 성능에 영향을 미치는 설계변수를 다음의 3가지 관점에서 정의하였다: ① 건축적 설계변수; ② 창호 설계변수; ③ 태양광 블라인드 설계변수 ([표 2-16] 참조). 첫째, 건축적 설계변수 관점에서, 지역(서울, 부산), 건물의 향(총 8개의 방위), 교실 크기(67.5m^2)를 정의하였다[21)22)23)]. 이 중, 교실 크기의 경우, '80년도 표준 교사설계도를 토대로 결정하였다. 둘째, 창호 설계변수 관점에서, 한국에 유통되는 13 종류의 표준 창호와, '80년도 표준 학교 교실의 창 면적(12.505m^2), 다기능 창호 제품의 환기구 크기, 표준 창호 성능을 고려한 가시광선 투과율을 설계변수로서 선정하였다[24)25)26)27)28)]. 마지막으로, 태양광 블라인드 설계변수로서 태양광 패널의 효율을 고려하였다[14)].

[표 2-16] 설계변수 정의

구분	세부내용	
건축적 설계변수	지역	서울, 부산
	방위	남향, 남동향, 동향, 북동향, 북향, 북서향, 서향, 남서향
	교실크기	'80년도 표준 교사설계도 고려: 67.5m^2 (9m*7.5m))
창호 설계변수	창호종류	한국에 유통되는 13 종류의 표준 창호 (예:(Clr5+Air6+Clr5)+(Clr5+Air6+Clr5))
	창 면적	표준 교사설계도상의 창 면적 고려: 12.505m^2 (3.05m*2.05m*2EA))
	환기구 크기	0~100% (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%)
	가시광선 투과율	표준 창호 종류에 따른 성능 고려: 59.4%, 60.1%, 62.3%, 63.9%)
태양광 블라인드 설계변수	태양광 패널 효율	현재 기술수준 고려: 최대 21.5%

Ⅱ) 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용한 기술적 성능 분석

환기구의 크기 및 유량에 따른 다기능 창호 제품의 기술적 성능 분석을 위해, 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용하여, 창호형 환기 제품의 크기(표준 교실 창호의 0 - 100%, 간격: 10%)에 따른 냉·난방 부하와 태양광 발전량을 분석하였다. 창호형 환기 제품의 크기에 따른 표준교실의 냉·난방 부하의 경우, 'EnergyPlus v8.5' 에너지 시뮬레이션 프로그램을 기반으로 [표 2-16]의 설계변수와 [표 2-17]의 기술적·환경적 평가를 위한 가정사항을 고려하여 분석되었다. 또한, 다기능 창호 제품에 부착되어 있는 태양광 블라인드의 발전량의 경우, [표 2-16]의 설계변수를 고려하여, 'Autodesk Ecotect Analysis' 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 분석하였다.

Ⅲ) 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용한 환경적 성능 분석

다기능 창호 제품의 환기구 크기 및 유량에 따른 다기능 창호 제품의 환경적 성능을 분석하기 위해, 창호형 환기 제품의 크기 (표준 교실 창호의 0~100%, 간격: 10%)에 따른 표준 교실의 이산화탄소 농도와 예상 불만족도(PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied)를 평가하였다. 이는 'EnergyPlus v8.5' 에너지 시뮬레이션 프로그램을 기반으로, 1단계 (설계 변수 정의)에서 선정된 설계 변수와 [표 2-17]의 가정사항(학교 운영 스케줄 등)을 고려하여 분석되었다.

Ⅳ) 생애주기비용분석 기반의 경제적 성능 분석

본 연구진은 다기능 창호 제품의 환기구 크기 및 유량에 따른 경제성 분석을 위해, 생애주기비용분석을 수행하였으며, 이를 위한 가정 사항은 [표 2-18]과 같다. 더불어, 생애주기비용분석 결과를 다음의 3가지 관점의 지표로서 제시하였다: ① 순현재가치 (NPV, Net Present Value); ② 투자대비수익률 (SIR, Saving-to-Investment Ratio); ③ 손익분기점 (BEP, Break Even Point) ([식 2-5] - [식 2-8] 참조).

[표 2-17] 기술적·환경적 성능 분석을 위한 에너지 시뮬레이션 프로그램의 가정 사항

구분	세부정보
연평균 CO_2 농도	409.9ppm (안면도 측정소 기준)
학급당 학생수	22.9명
착의량	겨울 : 1.0, 여름 : 0.5 (미국공조냉동공학회(ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning 기준)
활동량	1.2 (미국공조냉동공학회(ASHRAE) 기준)
점유시간	1년(365일) 기준 191일, 일일 최대 6시간(대한민국 초등학교 평균 운영 스케줄 고려)
냉·난방 설정온도	난방 설정온도: 18℃, 냉방 설정온도: 26℃

[표 2-18] 생애주기비용분석을 위한 가정 사항

분류		세부내용
분석 방법		현가법
분석 시작점		2018
분석 기간		25년
실질 할인율	물가 상승률	3.30%
	전기가격 상승률	0.66%
	이산화탄소 배출권 거래가격 상승률	2.66%
비용 항목	초기 투자비	- 국내에 유통되는 표준창호의 단위면적당 가격 고려 (예: (Clr5+Air6+Clr5)&(Clr5+Air6+Clr5): 48.11US$/$m^2$) - 태양광 패널 단가: 279.99US$/m^2
	수선비용	초기 투자비의 0.50%
이익 항목	전기요금 절감	0.051US$/kWh (봄, 가을), 0.084US$/kWh (여름), 0.071US$/kWh (겨울)
	탄소 배출권 거래제	9.62US$/$tCO_2eq$

$$NPV_n = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$ ----------(식 2-5)

$$SIR_n = (\sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t}) / (\sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t})$$ ----------(식 2-6)

$$B_t = EG_t + ET_t$$ ----------(식 2-7)

$$C_t = IIC + RC_t$$ ----------(식 2-8)

NPV_n : n년 후의 순현재가치
SIR_n : n년 후의 투자 대비 절감 비율
B_t : t년도에서의 이익
C_t : t년도에서의 비용
r : 실질할인율
n : 분석기간
EG_t : t년도에 생산된 발전량에 따른 이익
ET_t : t년도에 생산된 발전량으로 인한 탄소배출 감축 이익
IIC: 초기투자비용
RC_t : t년도에 발생한 태양광 시스템의 수리 비용

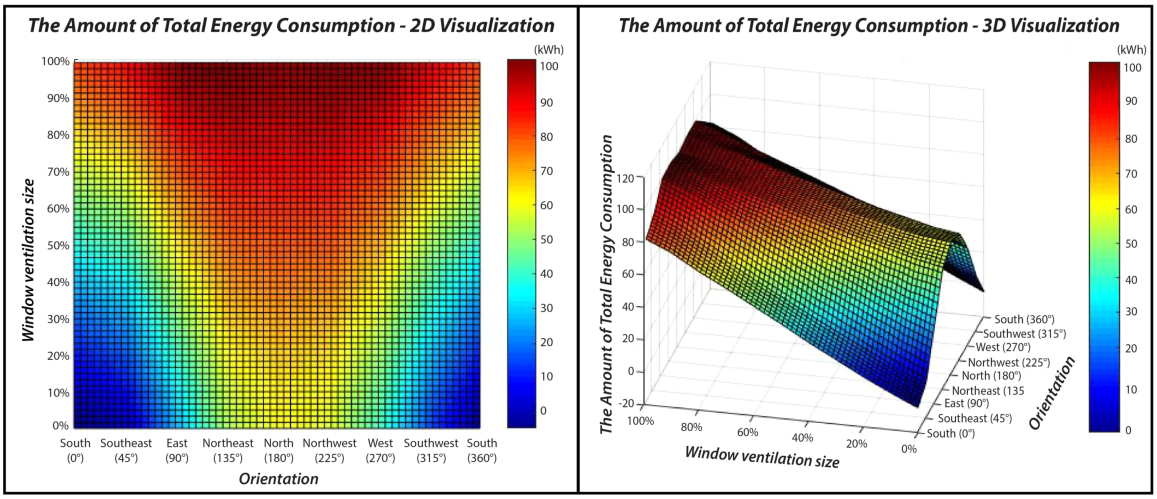
② 환기구 크기에 따른 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가

Ⅰ) 환기구 크기 및 유량별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석 결과

다기능 창호 제품의 환기구 크기 및 유량 관점에서의 타당성 분석을 위해, 에너지 시뮬레이션 프로그램 및 생애주기비용분석을 기반으로 기술적·환경적·경제적 성능 분석을 진행하였다. 창호형 환기 제품의 크기에 따른, 타당성 분석 결과는 다음과 같다.

Ⅱ) 환기 시스템 크기에 따른 다기능 창호 제품의 기술적 성능 분석 결과

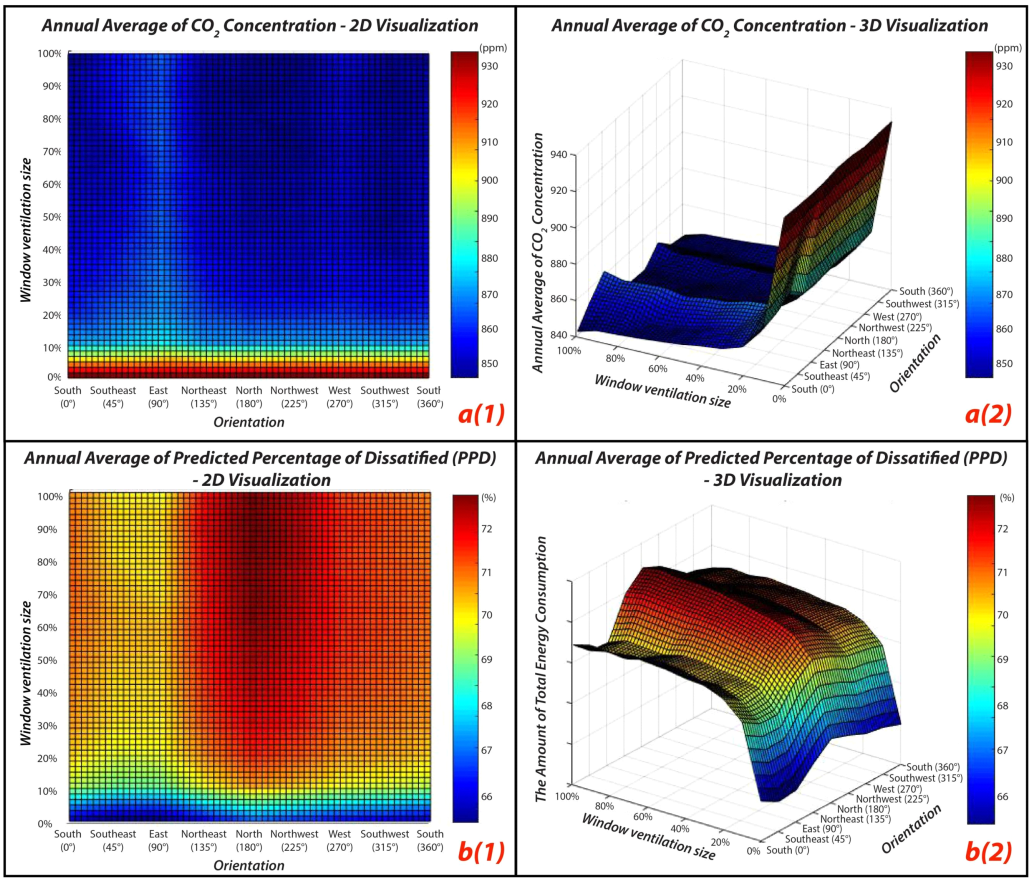
기술적 관점에서, 창호형 환기 제품 크기에 따른 다기능 창호 제품의 성능은 총 에너지 소비량 (냉·난방 부하 - 태양광 블라인드의 발전량)을 기반으로 다음의 두 관점에서 평가할 수 있다: ① 창호형 환기 제품의 크기; ② 건물의 향 ([그림 2-8] 참조). 첫째, 창호형 환기 제품의 크기 관점에서, 총 에너지 소비량은 환기구의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 창호형 환기 제품의 크기가 커짐에 따라, 냉·난방 부하는 점차적으로 감소하지만, 태양광 블라인드의 설치 면적이 줄어들어 발전량이 급격하게 줄어들기 때문이다. 둘째, 북향에서 남향으로 갈수록 에너지 소비량은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 건물의 냉·난방 부하는 남향으로 갈수록 줄어드는 반면, 태양광 블라인드의 발전량을 증가하기 때문이다.



[그림 2-8] 기술적 성능 분석 결과(총 에너지 소비량)

Ⅲ) 환기 시스템 크기에 따른 다기능 창호 제품의 환경적 성능 분석 결과

환경적 관점에서 다기능 창호 제품의 성능은 이산화탄소(CO_2) 농도와 예상 불만족도(PPD) 분석을 통해 평가하였으며, 이를 환기 시스템의 크기와 건물의 향 관점에서 분석하였다. 첫째, 환기 시스템의 크기 관점에서, 이산화탄소(CO_2) 농도는 환기구 크기가 커질수록 감소하는 양상을 나타내나, 환기 시스템의 크기가 창 면적의 20% 이상 차지할 경우, 이산화탄소(CO_2) 농도 감소의 효과는 미비한 것으로 나타났다 ([그림 2-9]의 a(1), a(2) 참조). 예상 불만족도(PPD)의 경우, 환기 시스템의 크기가 증가할수록 유입되는 기류량이 과다하게 증가하기 때문에, 예상 불만족도(PPD)가 높아지는 것으로 나타났다 ([그림 2-9]의 b(1), b(2) 참조). 둘째, 건물의 향 관점에서, 동·서향에서 남·북향보다 이산화탄소의(CO_2) 농도는 높게, 예상 불만족도(PPD)는 낮게 나타났다. 이는 동·서향에서의 환기량이 남·북향보다 상대적으로 적기 때문이다.



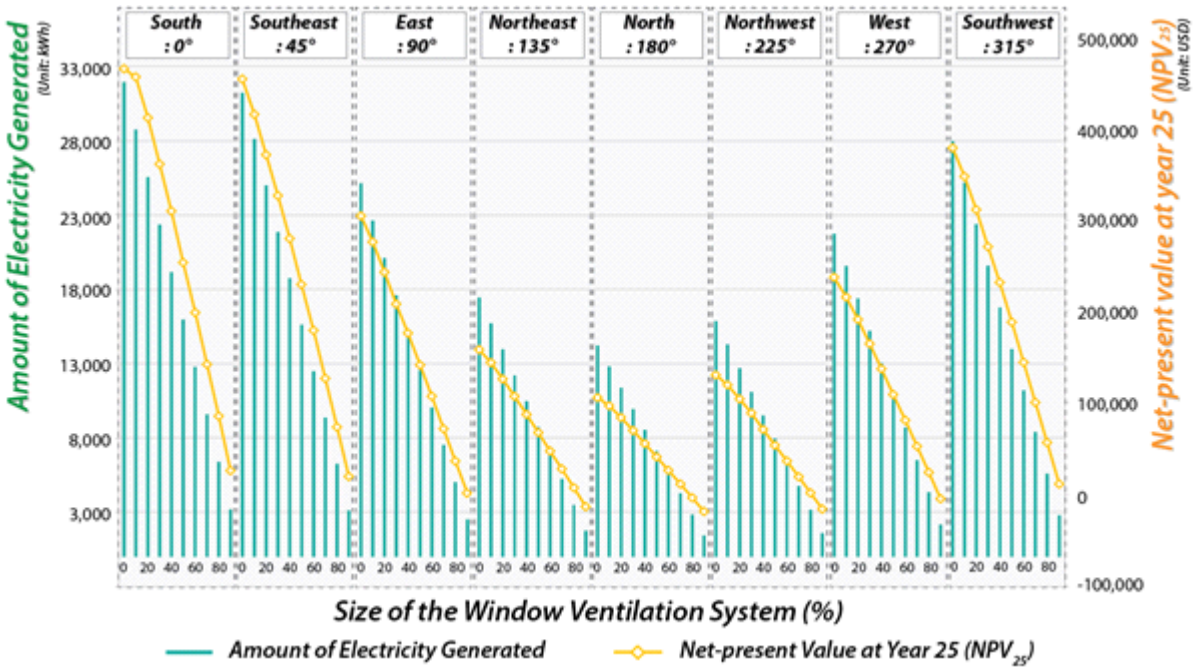
[그림 2-9] 환경적 성능 분석 결과(CO_2 농도, PPD)

Ⅳ) 환기 시스템 크기에 따른 다기능 창호 제품의 경제적 성능 분석 결과

경제적 관점의 다기능 창호 제품의 성능평가 결과를 순현재가치(NPV), 투자대비수익률(SIR), 손익분기점(BEP)의 3가지 지표로 나타내었으며, 이를 환기 시스템의 크기와 건물의 향 관점에서 분석하였다 ([그림 2-10], [그림 2-11] 참조). 첫째, 환기 시스템의 크기가 증가함에 따라 전반적으로 NPV와 SIR 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 예를 들어, 남향에서 환기 시스템의 크기가 0%일 때 NPV와 SIR은 US$ 465,133, 3.97이고, 환기 시스템의 크기가 100%일 때는 US$ 26,453, 1.58까지 감소하는 것으로 나타났다([표 2-19] 참조). 둘째, 동일한 크기를 가지는 환기 시스템이 적용된 경우, 북향에서 남향으로 갈수록 NPV와 SIR이 증가하는 것으로 나타났다. 예를 들어, 환기 시스템의 크기가 10%일 때, 남향에서의 NPV, SIR은 US$ 455,874, 4.16이었으나, 북향에서의 NPV와 SIR은 US$ 97,035, 1.67으로 감소하였다. 이는 건물의 향에 따라 소요되는 비용은 일정하나, 태양광 블라인드 시스템을 통해 발생하는 발전 이익이 감소하기 때문이다.

[표 2-19] 환기 시스템의 크기에 따른 생애주기비용 분석결과 (**남향**)

분류	환기 시스템 크기 (%)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
NPV (USD)	465,133	455,874	411,619	361,122	309,673	253,682	198,803	142,594	85,979	26,453
SIR	3.97	4.16	4.12	4.02	3.89	3.67	3.41	3.03	2.48	1.58
BEP (year)	6	5	5	6	6	6	7	7	9	15



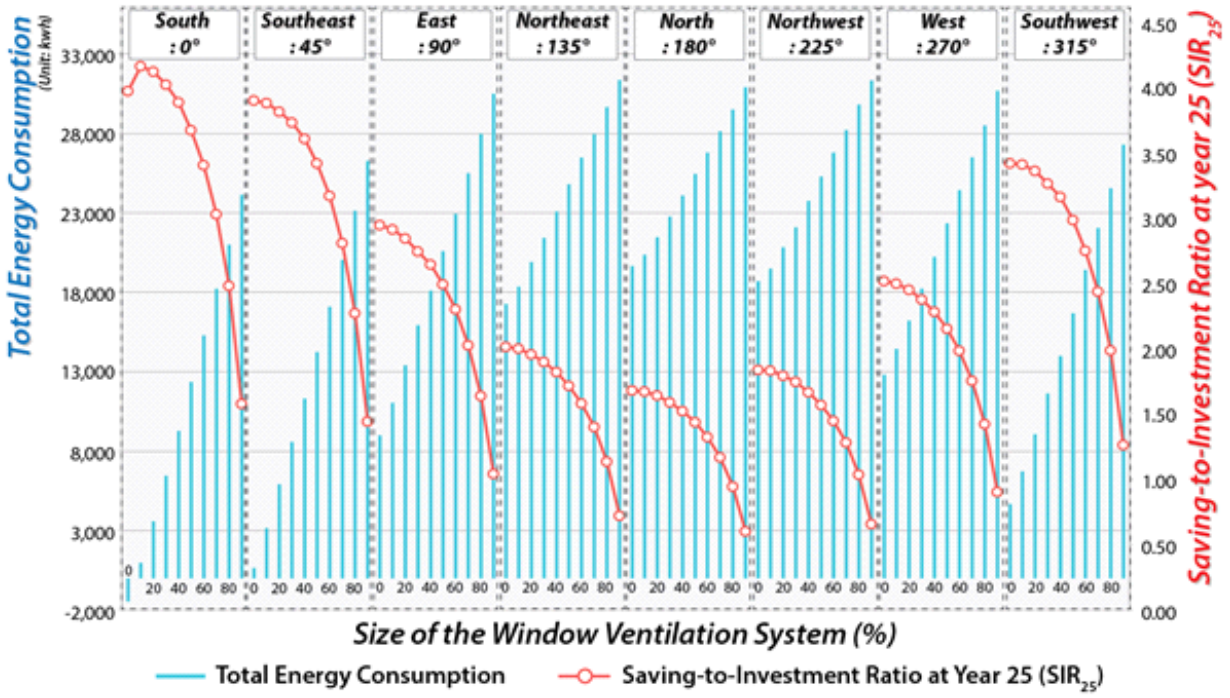
[그림 2-10] 경제적 성능 분석 결과(NPV)

V) 환기구 크기 및 유량별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석 결과 종합

환기 시스템이 창에서 차지하는 면적이 과도하게 큰 경우, 다기능 창호 제품의 기술적·환경적·경제적 성능이 전반적으로 하락하는 것으로 분석되었다. 먼저 기술적 측면에서, 환기 시스템의 크기가 증가함에 따라 냉·난방 부하는 미비하게 감소하였으나, 태양광 블라인드의 발전량이 면적에 비례하여 감소하기 때문에, 총 에너지 소비량(냉·난방 부하 - 태양광 블라인드의 발전량)은 증가하는 것으로 나타났다. 다음으로 환경적 측면에서, 환기 시스템의 크기가 증가할수록 예상 불만족도(PPD)는 증가하나, 이산화탄소(CO_2) 농도는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 마지막으로, 경제적 측면에서, 환기 시스템 크기의 증가에 따라, 순현재가치(NPV)와 투자대비수익률(SIR)은 감소하였고, 손익분기점(BEP)은 증가하는

것으로 나타났다.

또한, 최적화 지표들 간의 최적화 목표가 다르기 때문에, 5가지 최적화 지표들 간에 상충관계 분석을 수행하여야한다. 이를 위해, 본 연구에서는 피어슨 상관관계 분석을 수행하여 트레이드 오프 분석을 하였다([표 2-20] 참조). 먼저 총 에너지 소비량은 실내 이산화탄소(CO2) 농도(-0.798), NPV(-0.986), SIR(-0.501)과 강한 음의 상관관계가 있지만, PPD(0.688)



[그림 2-11] 경제적 성능 분석 결과(SIR)

와는 강한 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 앞서 기술적, 환경적 성능 분석 결과에서 언급하였듯이 환기구 크기가 증가할수록 환기량과 기류효과가 증가하는 반면, 발전량이 감소하기 때문이다. 따라서, 환기 시스템의 최적 크기를 도출하기 위해서는 5가지 최적화 지표 간의 상충관계를 고려하여 결정하여야 한다.

[표 2-20] 최적화 목표 간의 피어슨 상관관계 분석 결과

분류		총 에너지 소비량	이산화탄소 농도	PPD	NPV	SIR
총 에너지 소비량	상관계수	1	-.798**	.688**	-.986**	-.501*
	유의확률 (2-tailed)	-	.000	.000	.000	.011
	표본 수	25	25	25	25	25
실내 이산화탄소 농도	상관계수	-.798**	1	-.983**	.689**	-.119
	유의확률 (2-tailed)	.000	-	.000	.000	.571
	표본 수	25	25	25	25	25
PPD	상관계수	.688**	-.983**	1	-.559**	.280

	유의확률 (2-tailed)	.000	.000	-	.004	.175
	표본 수	25	25	25	25	25
NPV	상관계수	-.986**	.689**	-.559**	1	.637**
	유의확률 (2-tailed)	.000	.000	.004	-	.001
	표본 수	25	25	25	25	25
SIR	상관계수	-.501*	-.119	.280**	.637**	1
	유의확률 (2-tailed)	.011	.571	.175	.001	-
	표본 수	25	25	25	25	25

결과를 종합해보면, 환기 시스템의 크기 증가에 따라, 대부분의 평가 결과(기술적, 환경적(예상 불만족도 (PPD)), 경제적 성능)가 악화되는 것으로 나타났고, 이산화탄소(CO_2) 농도만 향상되는 것으로 나타났다. 이산화탄소(CO_2) 농도의 경우, 환기 시스템의 크기가 증가함에 따라 점차적으로 감소하지만, 창 면적의 20% 이상으로 환기 시스템을 적용할 경우, 이산화탄소(CO_2) 농도의 감소효과가 매우 미비하기 때문에, 기술적·환경적·경제적 관점에서 최적의 환기 시스템을 설치하기 위해서는 창 면적의 20% 내로 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

(나) 공기청정 필터의 구성별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석

① 공기청정 필터의 구성을 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발

본 연구진은 창호형 환기 시스템의 필터의 구성에 따른 타당성 분석을 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 환경적인 관점과 경제적인 관점에서 진행하였으며, 이는 다음의 3단계에 따라 진행되었다: Ⅰ) 실험 설계; Ⅱ) 필터 종류에 따른 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 환경적 관계 분석; Ⅲ) 필터 종류에 따른 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 경제적 관계 분석.

Ⅰ) 실험 설계

다기능 창호 제품 내의 환기 시스템의 공기청정 필터 구성에 따른 타당성 분석을 위해, 다음과 같은 절차로 실험을 설계하였다: ① 실험 기본사항 설계; ② 센서 설치; ③ 재실자 모니터링; ④ 에너지 모니터링. 첫째, 실험은 동일한 구조와 유사한 실내·외 환경의 2개의 사무실을 대상으로 진행하였다. 재실자는 두 사무실 모두 4명씩 있으며, 한 사무실의 창문에는 부직포 필터를, 또 다른 사무실의 창문에는 정전식 필터를 설치하여 환기 성능과 그에 따른 1일 당 지출을 비교분석하였다([표 2-21] 참조). 둘째, 실내·외 오염물질 측정을 위해 외기와 면하는 창문의 바깥쪽, 안쪽, 실의 중앙에 1개씩 측정센서를 설치하였다. 이 센서는 실내·외 오염물질(미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5), 이산화탄소(CO_2)과 실내 기후요소(온도, 습도)를 모니터링하며, 모니터링 된 정보는 실내 공기질과 재실자의 열 쾌적을 평가하기 위해 활용된다. 셋째, 10분 단위로 재실자의 재실여부를 확인하고, 활동에 관한 정보

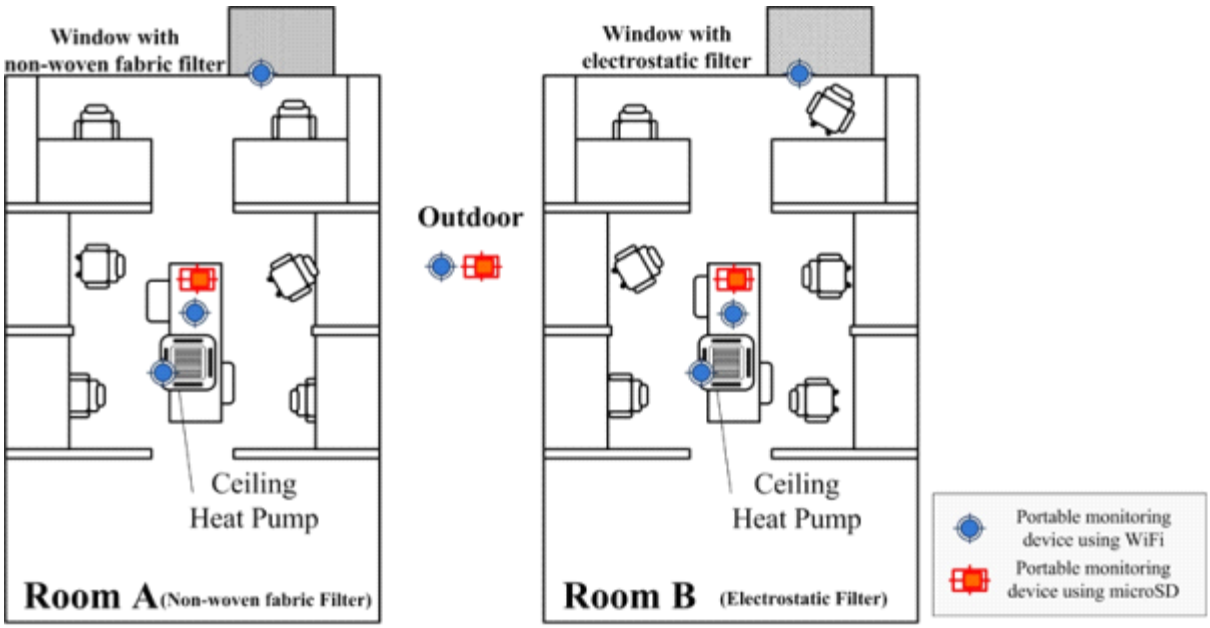
(보행, 착석, 청소)를 수집하여, 실내 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5) 농도와 재실자와의 관계를 분석하고자 하였다 ([그림 2-12] 참조). 마지막으로 필터의 설치로 변화하는 환경을 쾌적 범위 안으로 유지하기 위해 발생하는 비용을 계산하기 위해 천장형 에어컨의 운용 시간 정보를 수집하여 전기 에너지 사용량을 모니터링 하였다.

[표 2-21] 실험에 적용된 필터의 성능

구분	부직포 필터 (A room)	정전식 필터 (B room)
방식	여과식	흡착식
유동저항	0.9 - 1.1 inches	0.08 - 0.15 inches
여과율	70 - 80%	60 - 80%
가격	m^2 당 4,000원	m^2 당 90,000원
교체주기	2개월/1회	6개월/1회
1일 당 지출	67원	500원

Ⅱ) 필터 종류에 따른 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 환경적 관계 분석

본 연구에서는 필터의 종류 (부직포 필터, 정전식 필터)와 재실자의 행동을 고려하여, 실내·외의 오염물질 농도를 다음과 같이 3가지 관점으로 구분하여 분석하였다: ① 재실자의 수를 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석; ② 기류를 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석; ③ 재실자의 행동을 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석. 각각의 요소 (재실자 수, 기류, 재실자 행동 등)와 실내·외 오염물질 농도 사이의 관계는 피어슨 상관관계 분석을 통해 수행되었다.



[그림 2-12] 실험 조건

Ⅲ) 필터 종류에 따른 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 경제적 관계 분석

본 연구에서는 경제적 관계를 분석하기 위해 열 쾌적을 유지하기 위해 설치된 천장형 에어컨의 구동시간을 분석하고자 하였다. 두 오피스에 설치된 천장형 에어컨의 경우, 실별 제어가 가능하며, 천장형 에어컨 구동 시, 변화하는 실내 기후요소 (온도, 습도) 관측데이터를 기반으로, 구동여부를 모니터링 하였다. 에너지 모니터링을 기반으로 각 필터별로 소비되는 에너지 비용과 필터 자체적인 비용을 통해 경제적 관계를 분석하였다.

② 공기청정 필터의 구성별 최종성과물 개발을 위한 타당성 분석 결과

본 연구진은 공기청정 필터의 구성 관점에서, 필터 종류에 따른 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 환경적 관점 및 경제적 관점에서 타당성 분석을 진행하였다.

㉮ 필터 종류에 따른, 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 환경적 관계 분석

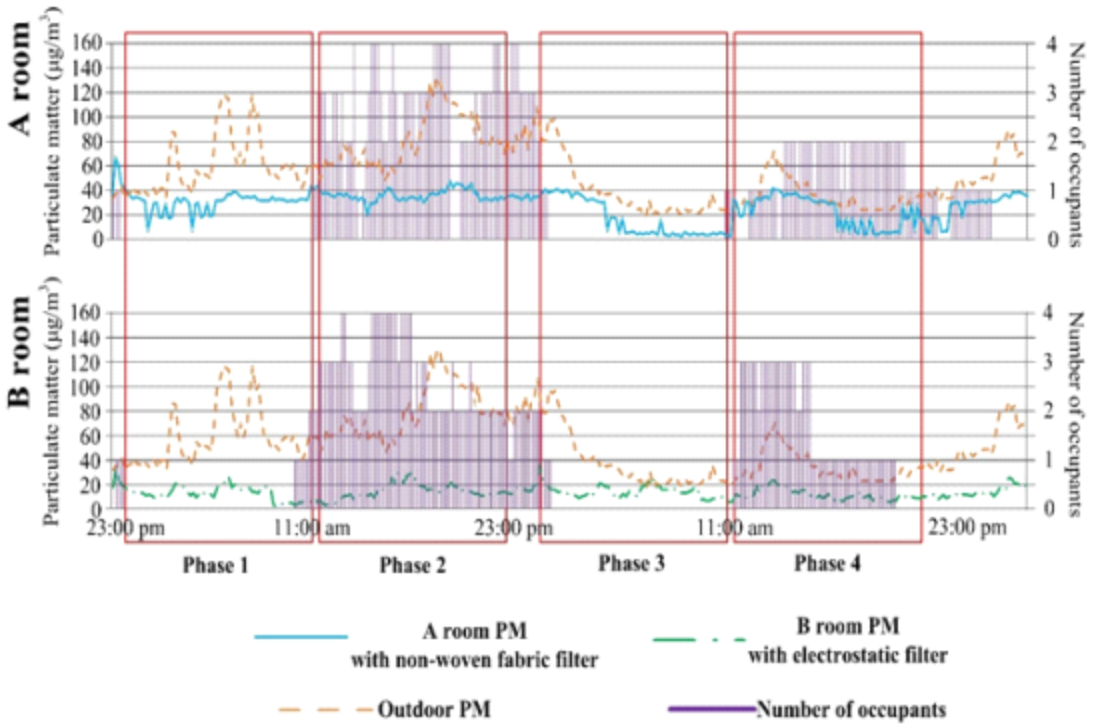
필터별 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 관계 분석은 다음의 3가지 관점에서 이루어졌다: Ⅰ) 재실자 수를 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석; Ⅱ) 기류를 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석; Ⅲ) 재실자의 행동을 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석.

Ⅰ) 재실자 수를 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석

실내의 오염물질 농도를 최소화하기 위해서는 외부에서 들어오는 오염물질을 차단하는 동시에 내부에서 발생하는 오염물질을 배출해야 한다. [그림 2-13]을 확인하면 오염물질을 여과하여 차단하는 개념의 부직포 필터는 전체적인 자연 환기량을 낮추어 기본적으로 재실자의 숫자가 적을 경우 효과적인 것을 확인되었다. 하지만 이 경우 재실자로 인해 발생하는 오염물질을 밖으로 배출하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 오염물질을 흡착시키는 정전식 필터의 경우 자연 환기량은 거의 유지하여 재실자의 숫자가 많을 경우 내부에서 발생한 오염물질을 밖으로 배출하는 것을 확인할 수 있다. 더욱 세밀하게 오염물질의 유입과 배출을 확인하기 위해 기류의 방향에 따른 오염물질의 상관관계를 분석하였다.

Ⅱ) 기류를 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석

본 연구에서는 기류의 방향을 크게 '유출 또는 환기가 되지 않음'(즉 실내에서 실외로 공기 이동 혹은 공기 이동 없음)과 '유입' (즉 실외에서 실내로 공기 이동) 으로 분류 하였다. 기류의 방향을 고려한, 실내·외 오염물질 농도 분석 결과는 [표 2-22]와 같다. 유동저항이 높은 부직포 필터가 설치된 A실에서는, 환기 자체가 잘 일어나지 않아 기류 방향과 관계없이 재실자 수가 증가하면 이산화탄소(CO_2) 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 유동저



[그림 2-13] 필터 종류를 고려한, 실내·외 오염물질 농도와 재실자 정보

항이 낮은 정전식 필터가 설치된 B실에서는, 환기가 기류의 방향에 관계없이 재실자 수와 이산화탄소(CO_2) 농도 사이에 유의미한 연관성을 보이지 않았다. 현재의 결과를 보면 재실자의 숫자가 많아지는 경우, 가격이 약 7.5배 더 비싼 정전식 필터를 설치한 경우에만 이산화탄소(CO_2) 농도를 기준치인 1000 ppm 이하로 낮출 수 있었다.

[표 2-22] 필터 종류와 기류 방향에 따른 재실자 수와 실내 오염물질간의 피어슨 상관관계 분석 결과

필터 종류	기류 방향	구분		실내 CO_2 농도	실내 PM_{10} 농도	창문 안쪽 CO_2 농도	창문 안쪽 PM_{10} 농도
A room (부직포 필터)	유출 또는 환기가 되지 않음	재실자 수	Pearson	**.760****	-.036	**.757****	.060
			Sig.	**.000**	.582	**.000**	.362
			N	**234**	234	**234**	234
	유입	재실자 수	Pearson	**.539****	.109	**.514****	.042
			Sig.	**.000**	.097	**.000**	.524
			N	**235**	235	**235**	235
B room (정전식 필터)	유출 또는 환기가 되지 않음	재실자 수	Pearson	.350**	.104	.323**	-.118
			Sig.	.000	.300	.001	.239
			N	102	102	102	102
	유입	재실자 수	Pearson	.448**	.018	.259**	-.252**
			Sig.	.000	.750	.000	.000
			N	323	323	323	323

Ⅲ) 재실자의 행동을 고려한, 필터 종류에 따른 실내·외 오염물질 농도 분석

정전식 필터에 비해 비교적 경제적인 부직포 필터를 통해서도 실내 공기질을 쾌적하게 유지할 수 있는 경우를 확인하기 위해 동일한 조건에서 실험을 진행하였다. 재실자의 행동을 고려한, 실내·외 오염물질의 농도는 다음과 같이 분석되었다 ([표 2-23] 참조). 재실자의 수는 절대적으로 실내 이산화탄소(CO_2) 농도에 영향을 주었다. 그에 반해, 재실자의 행동은 실내의 미세먼지(PM10)에 영향을 미치며, 재실자 수가 많아도 움직임을 동반한 행동이 적으면 미세먼지 농도가 낮은 것을 확인하였다. 단, 해당 실험은 재실자가 실내 공기질에 미치는 영향을 극대화하기 위해 기류가 실내에서 실외로 유출되는 상태를 고려하였기 때문에 실내에서 발생한 미세먼지(PM10)가 바깥쪽으로 이동하여 실의 중심에 설치된 센서에서 상관관계가 나오지 않은 것으로 분석된다.

[표 2-23] 재실자 수, 행동과 실내 오염물질간의 피어슨 상관관계 분석(부직포 필터가 적용된 A room)

구분		실내 CO_2 농도	실내 PM_{10} 농도	창문 안쪽 CO_2 농도	창문 안쪽 PM_{10} 농도
재실자 수	Pearson	.492**	.168	.440**	.087
	Sig.	.002	.301	.006	.594
	N	38	38	38	38
재실자의 행동	Pearson	-.106	.169	-.147	.371*
	Sig.	.525	.298	.380	.018
	N	38	38	38	38

㉣ 필터 종류에 따른, 재실자와 실내·외 오염물질 농도간의 경제적 관계 분석

부직포 필터와 정전식 필터는 대략 7.5배에 달하는 가격 차이를 보였다. 모든 경우에 정전식 필터를 사용한다면 오염물질의 측면에서는 최고의 '효과'를 누릴 수 있는 선택이나 필터 가격뿐만이 아닌 열 쾌적에서 발생하는 비용을 고려한다면 경제적인 관점에서 최선의 선택이 될 수 없다. 경제적 관계를 분석하기 위해 필터 종류별 에너지 소비량을 분석하였다. 총 5일간 (120시간)의 실험기간 동안 재실자 수는 두 실 모두 평균 2.2명으로 동일하였고, 부직포 필터가 설치된 A실의 점유시간은 61시간 30분, 정전식 필터가 부착된 B실의 점유시간은 73시간 40분으로 분석되었다. 더불어, 천장형 에어컨의 가동시간을 살펴보면, A실의 경우 10시간 30분(점유시간: 61시간 30분)으로 나타났고, B실은 15시간 40분(점유시간: 73시간 40분)으로 나타났다. 천장형 에어컨의 시간당 전력 사용량을 4 kW로, 1kW 당 전기세를 187.9원으로 계산할 시 A실은 5일 동안 42 kWh를 사용하여 전기세로 7,892원을 지출한 것에 반해 B실은 5일 동안 62.7 kWh를 사용하여 전기세로 11,775원을 지출하였다. 결과를 종합해보면, 정전식 필터를 5일 동안 부착할 경우 발생하는 비용은 14,275원, 부직포 필터를 5일 동안 부착할 경우 발생하는 비용은 8,227원으로 거의 1.7배 이상 지출하게 되었다. 정전식 필터가 부직포 필터에 비해 자연 환기가 더 많았기 때문에 실내의 열 쾌적을 유지하기가 어려워 천장형 에어컨을 길게 사용하게 되었다. 열 쾌적을 유지하기 위해 발생하는 비용을 고려한 경우, 부직포 필터를 최대한 활용하여 실내 공기질과 열 쾌적을 유지하기 위해서

는 재실자의 수와 행동을 고려한 필터 조합이 필요하다.

㉱ 공기청정 필터의 구성에 따른 환경적, 경제적 타당성 분석 결과 종합

최고의 실내 공기질과 열 쾌적을 유지하기 위해서는 상대적으로 비싼 정전식 필터를 사용하고 천장형 에어컨을 더 오래 사용해야 한다. 하지만 실내·외 모니터링을 통해 실내 이산화탄소(CO_2) 농도와 실내의 미세먼지(PM10)가 기준치 이하로 내려갈 수 있는 특정 기간, 즉 1. 실외 미세먼지 수치가 낮은 기간 혹은 2. 실내 재실자의 행동이 많지 않은 기간에는 부직포 필터로 교체하여 필터 비용과 전력 사용량을 감축시켜 환경적으로도 쾌적하며 경제적으로도 타당한 해결점을 찾을 수 있다.

(4) 단위성과 1-2-② 환기구 시스템의 프로토타입 모델 개발

(가) 환기구 크기 및 유량별 프로토타입 모델 개발

환기구의 크기와 유량을 고려한 프로토타입 모델을 제작하기 위해, 본 연구진은 두 가지 관점을 고려하였다: ① 환기 시스템의 규격; ② 기계환기를 위한 모터 적용.

① 환기 시스템의 규격

7차 프로토타입 모델에 적용되는 환기 시스템의 규격을 결정하기 앞서, 사전적으로 국내에 유통되는 창호형 환기 시스템의 규격을 조사하였다. 국내 업체에서 생산하고 있는 창호형 환기 시스템의 규격을 살펴보면, 대부분 가로 길이는 설계 조건에 따라 결정되며, 세로 길이는 11 - 22cm 사이인 것으로 나타났다 ([표 2-24] 참조). 이와 더불어, 본 연구진이 앞서 환기 시스템의 크기 및 유량을 고려한 최종성과물 개발을 위해 수행한 타당성 분석 결과를 살펴보면 표준 교실 창호의 20% 이하 즉, 높이 41cm 이하로 환기 시스템을 적용하는 것이 기술적·환경적·경제적 관점에서 타당한 것으로 나타났다.

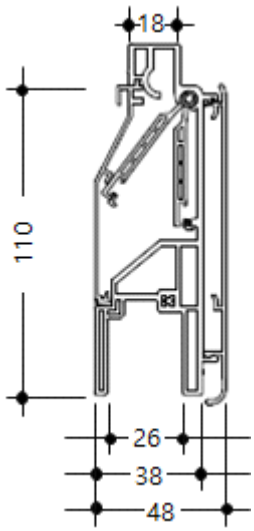
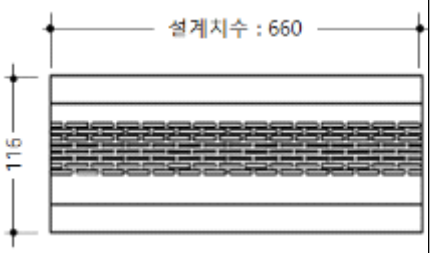
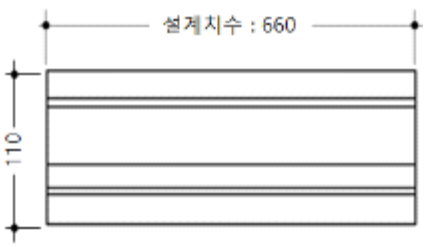
[표 2-24] 국내에 유통되는 창호형 환기 시스템의 규격

구분	규격(mm)	비고
주휼 엔지니어링	반창형(H×W×D): 1,100×130×232 전창형(H×W×D): 2,150×130×232	기계환기
㈜한성윈도우	x(W)×110(H)	하이브리드 환기(자연환기&기계환기), 가로길이(W)의 경우, 창문 크기에 따라 규격 조정 가능
금호석유화학	1220(W)×220(H)×280(D)	하이브리드 환기(자연환기&기계환기)
브라운테크	x(W)×110	자연환기

또한 본 연구진은 3차 연도에 진행하는 창호형 환기 시스템의 개발을 차질 없이 진행하기

위해, 국내 창호형 환기 시스템 업체인 ㈜브라운테크와 협업 관계를 통해 기술 노하우 공유를 지속해왔다. 따라서 제품 제작의 용이성, 기술적·환경적·경제적 관점의 타당성 분석 결과, 그리고 시장조사 결과를 고려하여, ㈜브라운테크가 제작하는 창호형 환기 시스템의 규격(x(W)×110(H))에 따라 7차 프로토타입의 환기 시스템의 규격을 결정하였다 ([표 2-25] 참고). 환기 프로토타입 모델의 가로길이(W)는 지난 1차 연도에 제작한 태양광 블라인드 시스템의 규격을 고려하여 660mm로 결정하였다.

[표 2-25] 환기 프로토타입 모델의 규격

환기 프로토타입 모델의 규격(mm)		
단면도	실내측	실외측
		

② 기계환기를 위한 모터 적용

건물에서의 자연환기는 주로 다음의 두 가지 원리에 따라 이뤄진다: ㉮ 온도차에 의한 환기; ㉯ 풍압차에 의한 환기. 그러나 자연환기의 경우, 건물 내·외부에 온도 차가 없거나 바람이 불지 않을 경우, 환기가 충분히 발생하지 않기 때문에, 환기량이 부족할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 자연환기와 더불어, 환기량이 부족할 경우를 대비하기 위해, 7차 프로토타입 모델의 환기 시스템에 모터를 적용하여, 기계환기와 자연환기를 함께 구현하고자 한다. 본 연구진이 7차 프로토타입 모델의 환기 시스템의 적용한 모터 사양은 [표 2-26]와 같다.

[표 2-26] 환기 프로토타입 모델에 적용된 모터사양

모델명	규격 (mm)	풍량 (CFM)	풍압 (Pa)	모터 속도 (RPM)	전압 (V)	무게 (g)	수명 (hr)	사진
DA04010B 12H	40×40×10	4.39~7.50	14.32 ~ 36.87	5,000 ~ 7,000	5	16	30,000 ~ 70,000	

(나) 공기청정 필터의 구성별 프로토타입 모델 개발

본 연구에서는 7차 프로토타입 모델의 환기 프로토타입 모델 제작 시, 실외에서 유입되는 대기오염물질(미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5) 등)을 차단하기 위해 환기시스템에 공기청정 필터를 도입하고자 하였다. 본 연구진은 공기청정 필터의 성능에 따라, 2 종류의 공기청정 필터(필터 Ⅰ, 필터 Ⅱ)를 고려하였으며, 필터의 성능분석 결과는 다음과 같다.

먼저, 필터 종류에 따른 성능 평가는 미국냉동공조학회(ASHRAE) standard 52.2에 따라서 진행되었다 ([표 2-27] 참조). 또한 공기청정필터의 성능 분석 결과는 다음의 2가지 지표로 나타냈다: ① 중량법 효율(Gravimetry efficiency); ② 분진 포집 용량(Dust holding capacity). 첫 번째, 중량법 효율이란, 시험필터의 정격풍량으로 풍량을 조정하고, 시험필터 상류에 표준량의 분진을 투입하였을 때, 시험필터가 포집한 분진의 양을 비교하여 효율을 표시하는 방법(공급한 표준 분진의 양(g) - 필터가 포집한 분진의 양(g)/공급한 표준 분진의 양(g)) * 100%) 이다. 둘째, 분진 포집 용량이란, 필터의 수명주기 동안 포집할 수 있는 미세먼지의 양을 나타낸다.

성능평가 결과를 살펴보면, 필터Ⅰ보다 필터Ⅱ가 중량법 효율 및 분진 포집 용량 관점에서 더 우수한 것으로 나타났다 ([표 2-28] 참조). 본 연구에서 개발하고자 하는 IoT 기반의 다기능 창호 제품의 환기시스템의 경우, 자연환기 뿐만 아니라 모터를 기반으로 기계환기도 함께 수행하기 때문에, 필터로 인한 환기량 부족의 문제를 어느 정도 방지할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 7차 프로토타입 모델의 환기 프로토타입 모델 제작 시, 고사양의 필터Ⅱ를 적용하기로 결정하였다.

[표 2-27] 공기청정 필터 성능 평가 방법

필터 I		필터 II	
시험기기	Medium Filter 평가시스템	시험기기	Medium Filter 평가시스템
시험방법	ASHRAE standard 52.2	시험방법	ASHRAE standard 52.2
필터 사이즈	610mm * 610mm * 2mm	필터 사이즈	610mm * 610mm * 3mm
유량	0.23m^3/s	유량	0.23m^3/s
최종 압력 강하	150Pa	최종 압력 강하	350Pa
시험용 분진	ASHRAE dust	시험용 분진	ASHRAE dust

[표 2-28] 공기청정 필터의 성능 평가 결과

필터 I		필터 II	
시험항목	결과	시험항목	결과
중량법 효율 (Gravimetry efficiency)	71.80%	중량법 효율 (Gravimetry efficiency)	90.20%
분진 포집 용량 (Dust holding capacity)	52.9g	분진 포집 용량 (Dust holding capacity)	123.2g

(5) 단위성과 1-3-① 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

(가) 태양광 패널을 적용한 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

① 태양광 패널 유형을 고려한 기술적·금전적 성능 분석

본 연구에서는 태양광 패널 유형을 고려한 실험 결과를 기반으로 비용 대비 이익을 계산하여 7차 프로토타입 모델에 대한 최적 태양광 패널 유형을 결정할 수 있다. 기술적 측면에서 성능은 발전량 (결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 발전량 및 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 발전량)을 비교하여 계산할 수 있다. 본 연구의 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위해 기상청 자료를 바탕으로 기상 조건 (맑은 날씨, 부분적으로 흐린 날씨, 매우 흐린 날씨, 흐린 날씨)에 따른 각 태양광 패널 유형의 평균 발전량을 비교 하였다. 경제적 측면에서 태양광 패널 유형을 고려한 성능은 7차 프로토타입 모델의 비용(결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널의 생산단가 및 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널의 생산단가)을 비교하여 계산할 수

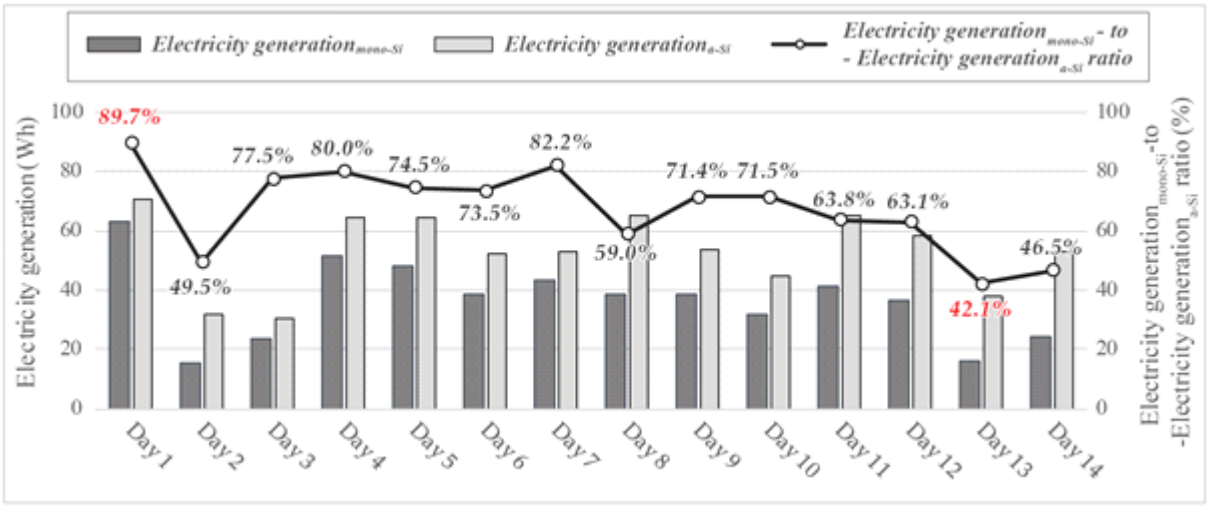
있다. 7차 프로토타입 모델의 비용에는 태양광 패널 그리고 강철 프레임, 센서 및 장치와 같은 부속 요소에 대한 비용도 포함된다. 기술적·금전적 측면에서, 성능은 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 비용 대비 이익과 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널를 적용한 모델의 비용 대비 이익을 비교함으로써 계산할 수 있다. 7차 프로토타입 모델의 기술적 성능과 경제적 성능을 평가하기 위한 지표로는 균등화 발전비용이 사용되었다. 균등화 발전비용 가치가 낮을수록 초기 투자비용에 비해 발전량이 높다. 반면에, 균등화 발전비용이 낮을수록, 높은 기술적·금전적 성과를 나타내는 것으로 분석되었다. 이 연구에서 비용 대비 이익은 7차 프로토타입 모델의 단가를 전체 실험 동안의 총 발전량으로 나눈 값으로 계산된다([식 2-9] 참조).

$$\text{비용 대비 이익}(\$/Wh) = \frac{\text{단위 가격}(\$)}{\text{총 전력 생산량}(Wh)} \quad \text{(식 2-9)}$$

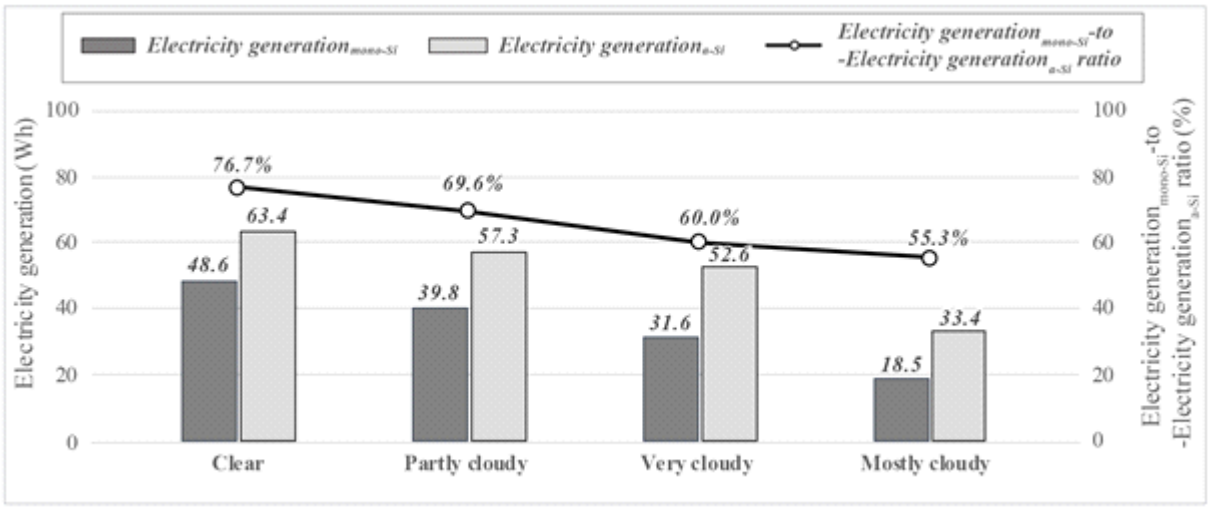
② 태양광 패널 유형을 고려한 기술적·금전적 성능분석결과

Ⅰ) 태양광 패널 유형을 고려한 기술적 성능 분석결과

본 연구에서는 태양광 패널 유형을 고려하여 7차 프로토타입 모델의 기술적 성능을 분석하였다. [그림 2-14]은 태양광 패널 유형에 의한 발전량 결과를 보여준다. 또한, [그림 2-15]은 기상조건에 따른 태양광 패널 유형별 발전량을 보여준다. 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량은 실험 기간 내내, 결정질계(mono-Si)태양광 패널을 적용한 모델의 발전량보다 더 높은 수치를 보였다. 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량 대비 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량은 최소 42.1% (13일)에서 최대 89.7% (1일)로 나타났다 ([그림 2-14] 참고). 게다가, 기상조건에 관계없이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량이 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량보다 평균적으로 컸으며 기상조건이 맑음(clear)에서 흐림(most cloudy)로 갈수록 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량 대비 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 발전량은 76.7%에서 55.3%로 감소하였다 ([그림 2-15] 참고). 결과적으로, 태양광 블라인드 슬랫에 의한 그림자 발생이 빈번한 7차 프로토타입 모델에서는 상대적으로 음영효과가 적어 발전량이 더 높은 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델을 적용하는 것이 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델을 적용하는 것보다 기술적 성능 분석결과 우수한 것으로 나타났다.



[그림 2-14] 태양광 패널 유형에 의한 발전량 결과



[그림 2-15] 기상 조건에 따른 태양광 패널 유형별 발전량

Ⅱ) 태양광 패널 유형을 고려한 금전적 성능 분석결과

본 연구에서는 태양광 패널 유형을 고려하여 7차 프로토타입 모델의 금전적 성능을 분석하였다. [표 2-29]는 프로토타입 모델의 각 구성요소 (태양광 패널, 강철 프레임, 센서, 유리)의 단가를 보여준다. 이 단가정보를 바탕으로 태양광 패널 유형에 따른 7차 프로토타입 모델의 총 단가를 알 수 있다. 그 결과, 전체 생산 단가가 1,584,544원인 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델이 243,869원인 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델보다 약 6.5배 비싼 것으로 나타났다. 따라서 상용화되어 상대적으로 가격이 낮은 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델을 적용하는 것이 금전적 측면에서 우수한 것으로 분석되었다.

[표 2-29] 프로토타입 모델의 각 구성요소 단가

구성요소	명칭	생산단가(원)
태양광 패널	mono-Si 태양광 패널	192,240
	a-Si 태양광 패널	1,533,044
프레임	강철 프레임	37,234
센서	모니터링 센서	11,896
장비	구동장치	2,974
프로토타입 모델 생산단가	mono-Si을 적용한 모델	244,344
	a-Si을 적용한 모델	1,585,148

Ⅲ) 태양광 패널 유형을 고려한 기술적·금전적 성능 종합분석결과

본 연구에서는 태양광 패널 유형을 고려하여 7차 프로토타입 모델의 기술적·금전적 성능을 종합적으로 분석하였다. 각 태양광 패널이 적용된 프로토타입 모델의 실험기간동안의 총 전기에너지 발전량과 생산단가를 활용하여 비용 대비 이익을 계산하였다. 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 비용 대비 이익(475원/Wh)은, 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 비용 대비 이익(2,141원/Wh)의 22.4%로 나타났다. 따라서, 7차 프로토타입 모델에 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널보다 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용하는 것이 가격 대비 발전량 측면에서 유리한 것으로 분석되었다. [표 2-30 참고]

[표 2-30] 프로토타입 모델의 기술적·금전적 성능 종합분석결과

	mono-Si을 적용한 모델	a-Si을 적용한 모델
총 전기에너지 발전량 (Wh)	512.15	745.1
생산단가 (원)	243,969	1,582,710
비용 대비 이익 (원/Wh)	475	2,141

결과적으로, 기술적 성능측면에서, 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널이 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널보다 효율이 더 높음에도 불구하고 음영효과가 적은 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용하는 경우에, 7차 프로토타입 모델의 발전량을 더 향상시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 금전적인 측면에서는, 모델의 생산단가가 비싼 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널보다 저렴한 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용하는 것이 7차 프로토타입 모델의 금전적 효율을 증대시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이를 종합한 기술적·금전적 측면에서는, 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델의 비용 대비 이익이 비결정질 실리콘계(a-Si) 태양광 패널을 적용한 모델보다 낮아, 동일한 생산단가로 더 많은 발전량을 생산할 수 있는 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 모델이 기술적·금전적 성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

③ 홍콩과 한국의 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적장치

본 연구진은 7차 프로토타입 모델의 완성도를 높이고 국내뿐만 아니라 해외에서의 적용가

능성을 검토하기 위하여, 홍콩에서의 태양광 발전량 생산 성능을 분석하고자 하였다. 홍콩은 건물의 밀도가 높고 초고층 빌딩이 밀집해 있기 때문에, 지붕형 태양광 시스템을 설치할 수 있는 옥상면적이 부족하다. 하지만, 대부분 고층으로 이루어진 홍콩의 빌딩은 빌딩의 외피의 면적이 넓어, 창호일체형 제품인 7차 프로토타입 모델을 설치할 경우 제품의 장점이 극대화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 홍콩과 한국에 동일한 조건으로 프로토타입 모델을 설치하여, 지역별로 생산된 태양광 발전량을 비교분석하였다. 실험은 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널을 적용한 프로토타입 모델을 홍콩(위도: 22.41°, 경도: 114.12°)과 한국(위도: 37.33°, 경도: 126.56°)에 설치하여, 2018년 3월 16일부터 25일까지 총 7일간 [표 2-31]와 같이 설정하여 수행하였다.

실험을 수행하기에 앞서, 위도가 다른 홍콩과 한국의 일반적으로 기후(기온, 습도, 운량, 일조시간, 일사량)변화에 대해 분석하였다. 1980년부터 2016년 동안의 날씨 데이터를 분석한 결과, 비교적 적도에 가까운 저위도에 위치한 홍콩의 연평균 기온(22℃ - 23℃)이 중위도에 위치한 한국의 연평균 기온(12.5℃ - 13.6℃)보다 높은 것으로 분석되었다. 또한, 습도는 아열대 기후인 홍콩(연평균 77%)이 한국(연평균 68%)보다 높다. 운량의 경우, 홍콩의 평균 운량 변동폭(최저 28%, 최대 86%)이 한국의 평균 운량 변동폭(최저 29%, 최대 55%)보다 큰 것으로 분석되었다. 일조시간은 홍콩은 경우 여름이 가장 길지만, 한국은 봄과 가을의 일조시간이 가장 길게 나타났다. 마지막으로 일사는 적도에 가까운 저위도에 위치한 홍콩의 연평균 일사량(4.0 - 5.6kWh/㎡)이 계절적 변화가 큰 한국의 연평균 일사량(1.4 - 1.7kWh/㎡)보다 많은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 3월의 봄에 실험을 수행하였기 때문에, 기온과 습도, 일사량은 홍콩이 한국보다 높게 나타났다. 또한, 햇볕의 양과 세기에 직접적인 영향을 미치는 기후요소인 운량과 일조시간, 일사량의 변화에 따라 생산되는 태양광 발전량도 변화함을 확인할 수 있다 ([표 2-31], [그림 2-16] 참조).

7일간의 실험결과를 일별로 분석한 결과, 홍콩과 한국 모두 맑았던 3월16일(일 평균 운량: 0%, 평균 일조시간: 60분)에는 홍콩의 일 발전량(21.67Wh)이 한국의 일 발전량(12.65Wh)보다 1.7배 더 높았다. 또한, 홍콩과 한국 모두 구름이 많은 흐린 날씨였던 3월18일(일 평균 운량: 100%, 일 평균 일조시간: 0분)에는 맑은 날에 비해 발전량은 적게 생산되었지만, 일사량이 높은 홍콩의 일 발전량(10.97Wh)이 한국의 일 발전량(3.15Wh)보다 3.48배 더 높은 것으로 분석되었다. 마지막으로, 홍콩은 맑은 날(일 평균 운량: 0%, 평균 일조시간: 60분)이지만, 한국(일 평균 운량: 100%, 평균 일조시간: 0분)은 흐린 날씨였던 3월21일에는 맑은 날씨에 일사량이 많은 홍콩의 일 발전량(13.70Wh)이 많은 운량으로 인해 일사량이 적은 한국의 일 발전량(4.76Wh)보다 2.9배 더 높은 것으로 분석되었다 ([표 2-31] 참조).

또한, 홍콩의 일 발전량(11.20Wh)이 한국의 일 발전량(7.73Wh)보다 1.4배 더 높게 나타났던 3월 24일 (홍콩의 일 평균 운량: 10%, 한국 일 평균 운량: 35%)을 시간별로 분석한 결과, 홍콩의 발전량이 한국의 발전량 보다 시간당 최대 2.5배, 평균 1.76배 더 높은 것으로 분석되었다. 태양광 발전량 생산에 영향을 미칠 수 있는 시간별 기후정보를 분석한 결과, 3월 24일의 습도와 일사량은 홍콩과 한국 모두 비슷하였으며, 기온은 홍콩이 항상 더 높았으며, 운량 차이로 인한 일조시간의 차이가 있었다. 홍콩은 운량이 10%로 구름이 조금인 날씨를 보이는 반면, 한국은 운량이 100%로 아주 흐렸던, 오전 10시에서 오전 11시까지는 홍콩이 한국보다 발전량을 더 많이 생산하는 것을 알 수 있다. 오전 11시 이후에 한국은 운량이 적어지면서 일사량이 높아져 발전량이 많이 생산되었으나, 일사량이 더 높은 홍콩보다는 적

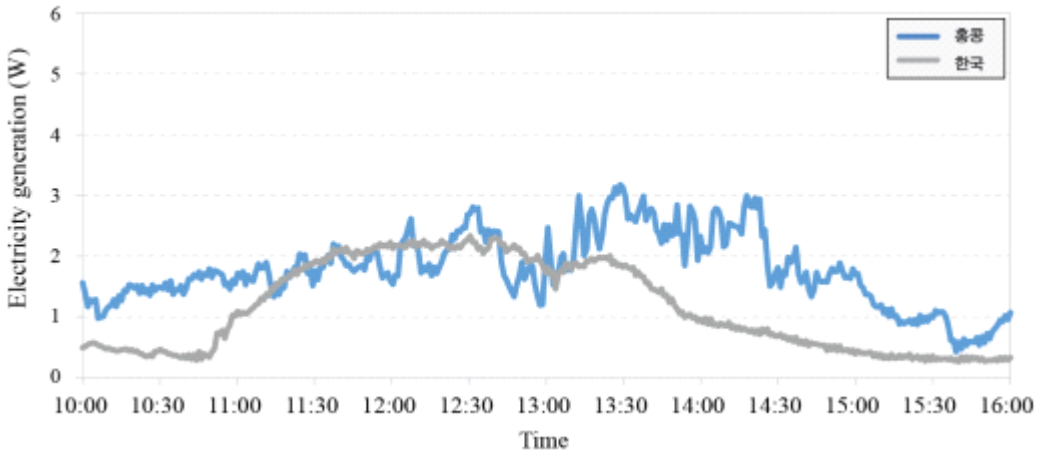
은 양을 생산하였다. 또한, 운량 변동폭이 한국(최저 29%, 최대 55%)보다 큰 홍콩(최저 28%, 최대 86%)이 발전량 생산 변동도 큰 것으로 분석되었다 ([표 2-32], [그림 2-16] 참조).

[표 2-31] 한국과 홍콩의 일일 누적 발전량과 일 평균 기후정보

구분			3월16일	3월18일	3월21일	3월22일	3월23일	3월24일	3월25일
일일 누적 발전량 (Wh)		홍콩	21.67	10.97	13.70	16.51	13.54	11.20	11.15
		한국	12.65	3.15	4.76	10.28	9.65	7.73	8.70
기후요소	기온 (℃)	홍콩	26.5	23.0	21.4	21.9	23.4	23.8	23.6
		한국	8.1	9.3	3.8	8.8	9.2	11.6	12.4
	습도 (%)	홍콩	56.3	76.8	33.7	44.7	45.5	62.7	65.0
		한국	45.5	49.5	54.8	39.5	51.2	67.2	62.2
	운량 (%)	홍콩	0	100	0	0	0	10	20
		한국	0	100	100	0	1	31	0
	일조시간 (분)	홍콩	60	0	60	60	60	53	47
		한국	60	0	0	60	59	38	60
	일사량 (W/m^2)	홍콩	793.0	536.2	836.3	821.2	829.3	644.8	551.4
		한국	705.9	276.9	303.0	735.6	734.3	617.1	731.3

[표 2-32] 한국과 홍콩의 시간별 발전량과 기후정보(3월24일)

구분			10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00
발전량 (Wh)		홍콩	1.56	1.87	2.09	2.50	2.11	1.07
		한국	0.64	1.85	2.20	1.70	0.83	0.50
기후요소	기온 (℃)	홍콩	23.4	22.5	24.3	24.4	24.3	24.0
		한국	9.2	10.2	11.9	12.6	12.9	13.0
	습도 (%)	홍콩	65	68	60	60	60	63
		한국	74	72	66	64	63	64
	운량 (%)	홍콩	10	15	10	10	10	10
		한국	100	80	10	0	0	0
	일조시간 (분)	홍콩	54	50	54	54	54	54
		한국	0	0	54	60	60	60
	일사량 (W/m^2)	홍콩	423.64	463.69	611.43	859.74	829.48	680.85
		한국	340.87	369.35	698.65	767.18	801.00	725.35



[그림 2-16] 홍콩과 한국의 시간별 발전량과 기후정보 (3월 24일)

(나) 환기구 크기, 유량, 필터의 구성별 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

① 환기구 크기 및 유량에 따른 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

㉮ 환기구 크기 및 유량에 따른 프로토타입 모델의 성능평가

환기구를 통하여 출입하는 기류를 분석하기 위해서 ANSYS FLUENT® 소프트웨어를 통해 전산유체해석을 진행하였다. [식 2-10]을 통해 환기구 표면 및 출입경계의 기류속도를 기준으로 실내 또는 실외로 공급되는 유량을 계산하였다[29]. 환기 시스템의 영역은 환기 시스템의 적용 위치에 따른 세 가지 시나리오의 모델링을 통해 얻었으며, 입구 경계의 공기 속도는 전산유체해석을 수행하기 위한 경계 조건을 고려하도록 계산되었다 ([식 2-11] 참고).

$$Q=\sum_{i=0}^{n} v_i \times A_i \quad \text{----------(식 2-10)}$$

$$U(h)=\frac{U_0}{k}\times \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad \text{----------(식 2-11)}$$

Q : 환기량
i : 매쉬 요소
v_i : 출입경계의 i의 기류속도
A_i : 출입경계의 i의 면적
h : 지면으로부터의 거리(m)
k : 폰 카르만 상수 0.41
U_0 : $1.068 m/s$
h_0 : $0.005m$

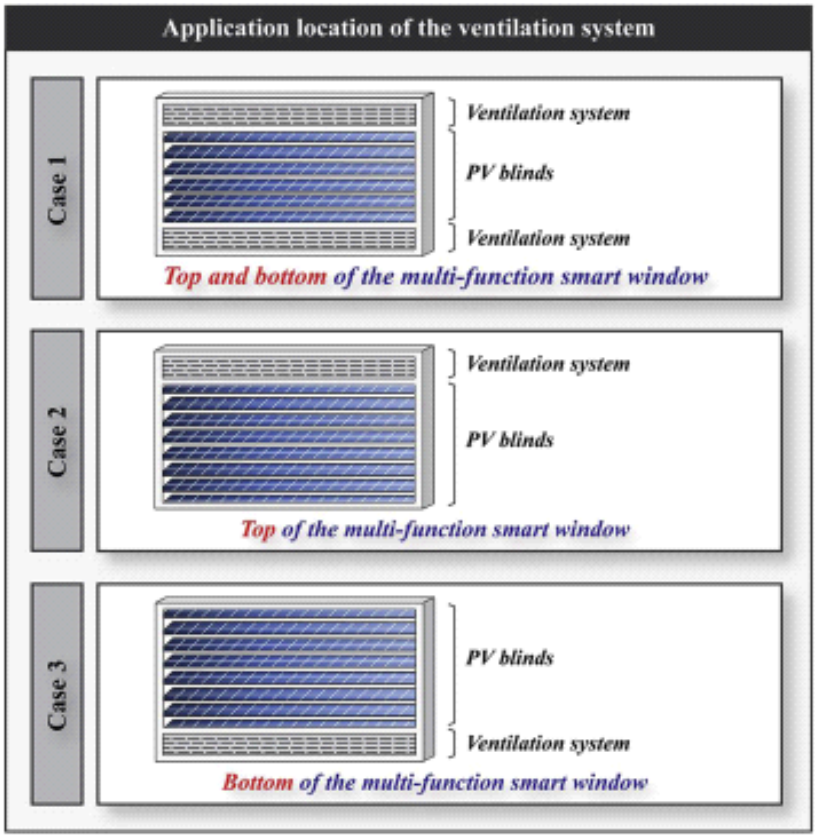
환기구 크기 및 위치에 따라 [그림 2-17]처럼 프로토타입 모델을 3가지 케이스로 분류하고, 각 케이스마다 환기량(m^3/s)을 산정하였다. 그리고 Autodesk Ecotech Analysis®을 이용하여 각 케이스에 따른 기술성평가와 경제성평가를 병행하였다.

[표 2-33] 다기능 스마트 창호 기술성-경제성 평가 결과

태양광 패널의 종류	케이스		기술성 평가		경제성 평가		
			전력 생산량(kWh)	환기량(m^3/s)	순현재가치($)	투자대비 절감비율	손익분기점
1세대 태양광 패널	mono-Si	1	65,083	20,044	122,649	2,509	9
		2	68,995	11,057	136,984	2,730	8
		3	68,995	8,987	136,984	2,730	8
	poly-Si	1	53,382	20,044	90,411	2,176	10
		2	56,591	11,057	102,807	2,380	9
		3	56,591	8,987	102,807	2,380	9

케이스 1과 같이 환기구의 크기가 커지는 경우 전체 면적 대비 태양광 패널 면적이 감소하므로, 결정질 실리콘계(mono-Si) 태양광 패널과 poly-Si 모두 전력 생산량은 감소하고

환기량은 증가함을 확인할 수 있다. 이 경우의 환기량은 20,044m^3/s, 전력 생산량은 65,083kWh이다. 이와 비교하여 케이스 2, 3의 경우 전력 생산량은 68,995kWh로 동일하나, 환기 시스템을 상단부에 적용한 케이스 2의 환기량은 11,057m^3/s로 환기 시스템을 하단부에 적용한 3번 케이스의 환기량 8,987m^3/s에 비해 1.2배 높게 나타났다. 경제성 평가 측면에서는 태양광 패널과 환기구 크기 비율이 동일한 케이스 2와 케이스 3은 순현재가치 $136,984, 투자대비절감비율 2,730, 손익분기점 8년으로 동일한 지표를 나타내며, 이는 1번 케이스의 순현재가치 $122,649, 투자대비절감비율 2,509, 손익분기점 9년과 비교하여 1.1배 경제적이다.([표 2-33] 참조)



[그림 2-17] 프로토타입 모델의 3가지 케이스 분류

㉰ 환기구 유량에 따른 프로토타입 모델의 실제 현장 적용 평가

7차 프로토타입 모델의 현장 적용 평가를 위해 환기구의 유량을 측정하였으며, 기밀성이 높은 인공기후변화챔버에 이산화탄소(CO_2)를 분사하여 시간에 따른 농도 변화를 측정하고 이를 토대로 환기구의 유량을 계산하였다.



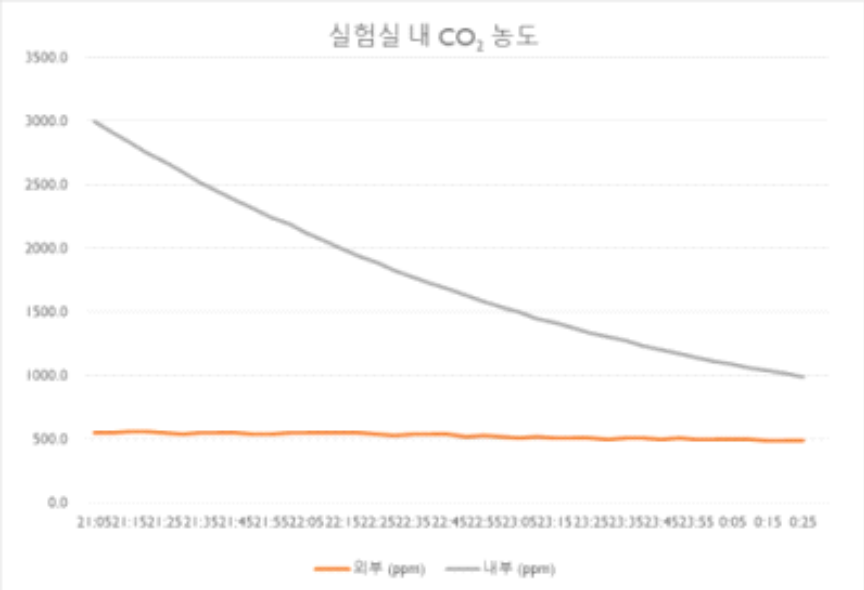
[그림 2-18] 챔버 내 이산화탄소 농도 조절장치

인공기후변화챔버 내 이산화탄소(CO_2)의 농도 변화를 실시간으로 측정하기 위해, 모니터링 센서(Amphenol T6703; 측정범위: 0-5000 ppm, 오차범위: 75 ppm or 10%)를 사용하였고, 1000-3000 ppm의 범위 내에서 측정을 실시하였다. 그리고, 5분 단위로 모니터링을 수행하며 챔버 내부 및 외부의 농도 변화를 관측하였다. 유량의 계산에는 Decay method를 사용하였다[30]. Decay method는 재실자의 점유율이 점차적으로 감소하거나, 점유율이 없는 경우에 적용 가능한 방법으로, [식 2-12], [식 2-13]을 통해 5분 단위로 기록된 이산화탄소(CO_2) 농도 정보를 토대로 실내 또는 실외로 공급되는 유량을 산출하였다.

$$A_D = \frac{1}{\Delta t} ln\left\{\frac{(C_1 - C_R)}{(C_0 - C_R)}\right\} \text{----------(식 2-12)}$$

$$\ln(C_t - C_R) = -A_D t + \ln(C_s - C_R) \text{----------(식 2-13)}$$

A_D : 유량
Δt : 측정지점간의 시간 변화량
C_0, C_1 : 측정 지점의 이산화탄소 농도(감소구간에서 측정)
C_R : 평형 상태의 이산화탄소 농도 ($400ppm$)



[그림 2-19] 시간에 따른 챔버 내부 및 외부의 CO_2 농도 변화



[그림 2-20] 시간에 따른 챔버 내부의 유량 변화

시간에 따른 유량의 변화를 확인해보면, 챔버 외부 및 내부의 이산화탄소(CO_2)농도 차이에 구배하여 챔버 내부에서 외부로 기류가 발생하였다. 챔버 내의 이산화탄소(CO_2)농도가 3000ppm에서 1000ppm으로 감소하는데 약 200분이 소요되었으며 ([그림 2-19] 참고), 이때의 공기교환율(1/hour)의 평균은 0.4399이다. 챔버 내부의 공기 조성은 유체의 특성상 각각의 단위면적 내에서 동일하지 않으므로 [그림 2-20]과 같은 패턴을 유지하며 점차적으로 평형을 이루게 된다.

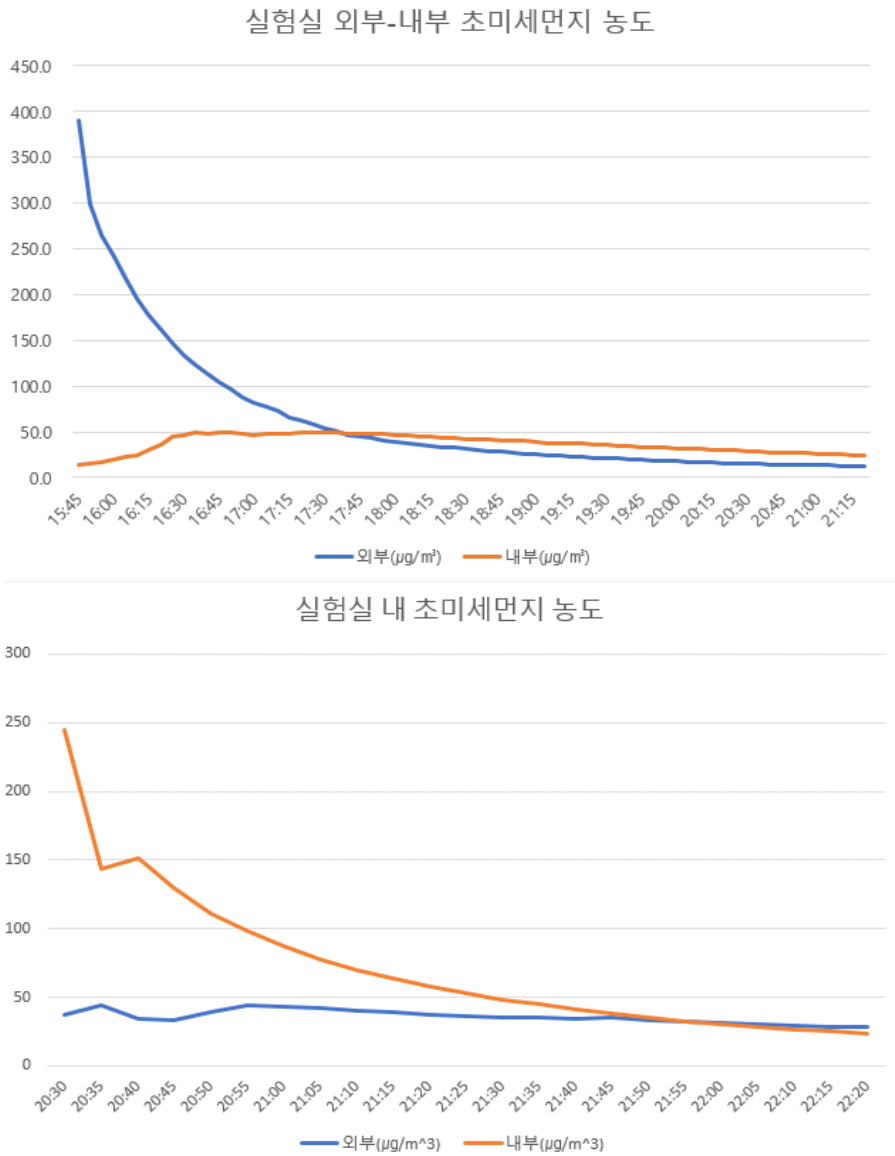
② 공기청정 필터의 구성별 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

7차 프로토타입 모델의 현장 적용 평가를 위해 환기구의 필터성능을 검증했다. 기밀성이 높은 인공기후변화챔버 내부로 초미세먼지(PM2.5)입자를 분사하여 챔버 외부 및 내부의 초미세먼지(PM2.5) 농도 감소 추이를 계산하였다. 초미세먼지(PM2.5)에 대한 필터 성능을 검증하기 위해 챔버 안에서 일정한 압력을 유지하며 입자 발생기를 통해 Kcl 수용액(증류수 1L, Kcl 300g)을 에어로졸 형태로 분사했다. 시간이 지날수록, 초미세먼지(PM2.5)의 침전되는 경향을 고려하여 기밀된 상태에서 인공기후변화챔버 내의 휀을 가동시켜 실내공기를 부유시키고 초미세먼지(PM2.5)와 접촉하는 시간당 필터의 면적을 일정한 수준으로 유지했다. 초미세먼지(PM2.5)의 농도 변화를 실시간으로 측정하기 위해 모니터링 센서(SEN0177; 측정범위: 0-500$\mu g/m^3$; 오차범위: ±15$\mu g/m^3$)를 사용하였다. 5분 단위로 모니터링을 수행하며 시간에 따른 챔버 외부 및 내부의 초미세먼지(PM2.5)농도 변화를 관측하였다.

실험에 사용할 필터를 결정하기 위해 성능 평가 비교를 수행하였으며 ([표 2-27], [표 2-28] 참고), 성능 평가 결과를 토대로 필터Ⅱ를 적용한 챔버 내부의 초미세먼지(PM2.5)의 농도변화를 관측하였다.

모니터링을 시작한 시점의 챔버 내 최초 수준 초미세먼지(PM2.5)농도의 측정값인 244.5$\mu g/m^3$를 기준으로, 초미세먼지(PM2.5)농도 수준이 초기 수치의 절반만큼 감소하는데 17.5분이 소요되었다. 또한 초미세먼지(PM2.5)농도가 실내환경 권고치 수준인 25$\mu g/m^3$에 도달하는데 소요된 시간은 95분이다. 결과적으로, 실험에 적용한 필터Ⅱ의 단일 성능은 26.2m^3의 챔버를 기준으로 이산화탄소(CO_2)의 환기 성능 및 초미세먼지(PM 2.5)의 환기 성능 면에서 적용 가능한 수준을 유지하고 있다. 이는 다수의 유닛을 통합하여 운용하는 것을 목표로 하는 본 연구의 특성상 7차 프로토타입 모델에 적용되는 필터의 성능적 측면 및 경제성 또한 유의미한 수준까지 도달했음을 알 수 있다.

반대로 초미세먼지(PM2.5)를 챔버 외부에 분사하여, 필터의 성능을 검증했다. [그림 2-21]에 따르면, 실외의 초미세먼지(PM2.5)농도가 400$\mu g/m^3$이었음에도 불구하고, 실내 초미세먼지(PM2.5)농도는 최대 55$\mu g/m^3$까지 밖에 상승하지 않았다.



[그림 2-21] 시간에 따른 챔버 내부 및 외부의 초미세먼지(PM2.5)농도 변화

나. 핵심성과 2: 웹/스마트기기 기반 '모니터링 장치'의 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용평가

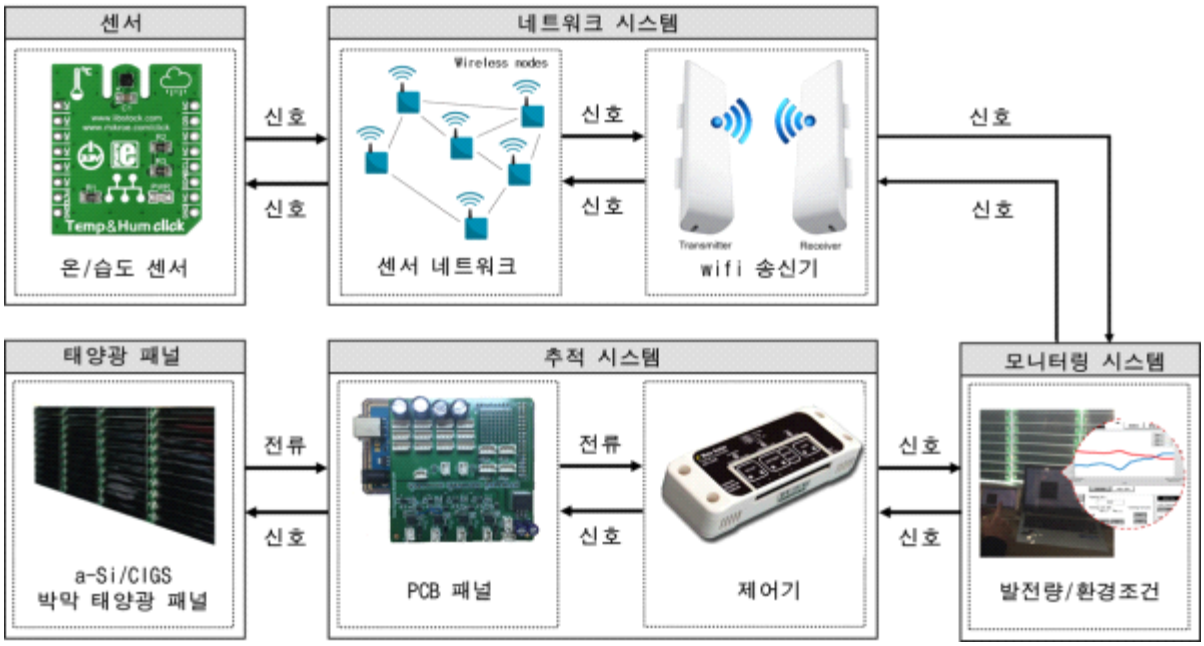
(1) 단위성과 2-1-① 태양광 발전량 모니터링 지표 수립

(가) 태양광 발전량 모니터링 지표 수립

본 연구에서는 센서 네트워크 기술을 이용한 실시간 태양광 발전량 모니터링 기술을 개발하기 위하여, 태양광 패널, 온·습도 센서, 추적 시스템, 네트워크 시스템, 모니터링 시스템의 5가지 속성을 고려하여 센서 네트워크 알고리즘을 개발하였다([그림 2-22] 참조).

첫째, 최대 전력을 생산할 수 있는 블라인드의 위치를 설정하기 위하여, 태양광 패널에서 생산되는 전압, 전류, 전력을 측정하였다. 태양광 패널은 태양 에너지를 받아 전력을 생산한다. 생산된 전력에 대하여, 태양광 패널에서 측정된 전압, 전류, 전력은 인쇄 회로 기판(PCB)과 제어기(Controller)를 통해 측정 및 조절할 수 있다. 실시간 모니터링 시스템에서는 측정된 전압, 전류, 전력 데이터는 DB로 구축되어, 전력을 최대로 생산할 수 있는 블라인드의 최적 슬랫 각도 및 방위각을 평가하는데 사용된다. 이러한 평가 결과를 기반으로, 태양광 블라인드에서 생산되는 발전량이 최대로 유지될 수 있도록, 제어기(Controller)를 통해 태양광 블라인드의 최적 슬랫 각도 및 방위각을 실시간으로 조절한다. 이러한 알고리즘을 기반으로, 태양광 블라인드의 발전 효율을 극대화 할 수 있도록 하였다.

둘째, 최대 전력을 생산할 수 있는 환경조건을 만들어 주기 위하여, 온·습도 센서를 활용하여, 온도 및 습도를 측정하였다. 온도 및 습도는 유선 및 무선(wifi) 통신을 활용하여, 실시간으로 모니터링될 수 있다. 각 센서(센서노드)와 본체(중계기)로 구성되는 센서 네트워크 시스템을 개발하여, 각 센서를 통해 수집된 온도 및 습도 데이터가 본체를 경유하여 서버 및 PC 등에 신호를 송신할 수 있도록 하였다. 실시간 모니터링 시스템에서는 측정된 환경조건을 DB로 구축하여, 최대 전력을 생산할 수 있는 환경조건을 위한 온도 및 습도를 평가한다. 이러한 평가 결과를 기반으로, 2차 연도의 연구 목표인 능동형 환기시스템 개발과 연동되어 환경조건을 조절 및 통제 할 수 있도록 하였다.



[그림 2-22] 실시간 태양광 발전량 모니터링을 위한 센서 네트워크 알고리즘

(나) 태양광 발전량 평가 지표 수립

본 연구에서는 태양광 블라인드의 최대 전력생산을 위하여, 실시간 태양광 발전량 모니터링을 통해 수집된 데이터를 분석하여 태양광 발전량 평가 지표를 수립하고자 하였다. 태양광 발전량을 평가하기 위해서는 태양광 블라인드에서 생산한 발전량을 산정해야 한다. 태양광 발전량을 산정하는 방법으로는 크게 두 가지로 구분할 수 있다: ① 광센서의 활용; ② 태양광 발전량 계산.

첫째, 일반적으로 태양광 발전효율을 높이기 위한 태양광 추적 기술에 가장 많이 사용되는 방식은 광센서를 태양광 패널에 부착하여 측정된 실제 조도를 기반으로 추적하는 방식이다. 광센서 기반 태양광 추적 방식은 광센서의 출력값에 따라, 블라인드를 제어한다. 이 방식은 간편하게 활용될 수 있지만, 센서 및 인버터의 부착으로 인해 가격이 비싼 단점이 있다. 따라서, 광센서를 이용한 태양광 추적 방식은 광센서 및 그 외 추가적인 장치를 설치하여 발생하는 비용 대비 추적 효과가 높지 않다는 한계점이 있다. 첫째, 비용적인 측면에서, 광센서 기반의 태양광 추적 방식에는 태양광 발전량 기반의 추적 방식과 비교하여, 광센서와 콘트롤러 등의 추가적인 장치가 필요하다. 또한, 대부분의 광센서는 1축 추미만 가능하기 때문에 2축 추미를 위해서는 2배의 비용을 소요된다. 따라서, 비용 대비 효과 측면에서 불리하다. 또한, 광센서는 주기적인 관리가 필요하기 때문에, 별도의 유지관리 비용과 노력이 필요하다. 둘째, 추미 효과 측면에서, 광센서가 감지하는 파장영역은 태양광 패널에서 발전을 위해 사용하는 파장영역과 일치하지 않는다. 이에 따라, 광센서에서 감지한 방위각과 입사각으로 태양광 추적을 하더라도 태양광 발전량이 최대 발전량이 아니라는 한계가 있다. 또한, 광센서는 흐린 날씨 등 직접적인 태양광이 없을 경우에 오작동 할 수 있기 때문에, 태양광 시스템이 정확하게 태양을 추적하는 데 한계가 있다.

둘째, 실시간 모니터링을 통해 측정 및 수집된 전류와 전압 데이터를 활용하여 태양광 발

전량을 계산하는 방식이 있다. 이 방식은 별도의 시스템 설치 없이도 정확한 발전량을 산정할 수 있어 정확성, 신뢰성, 경제성 측면에서 우수하다. 실시간 모니터링을 통해 전류와 전압 데이터를 측정할 수 있는 경우, [식 2-14]을 활용하여 발전량을 계산할 수 있다. [식 2-14]을 활용하여, 전기회로에 의해 단위 시간당 전달되는 전기에너지를 나타내는 전력(단위: W)을 구할 수 있으며, 도선을 통해 공급되는 전기에너지의 양인 전력량(단위: kWh)을 나타내기 위해서는 단위 시간을 곱해 환산하여야 한다([식 2-15] 참조). 따라서, [식 2-14], [식 2-15]을 활용하여, 태양광 블라인드에서 생산하는 태양광 발전량을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 실시간 태양광 발전량 모니터링을 통해 수집된 데이터(전류, 전압)를 바탕으로 계산된 태양광 발전량을 평가하여, 최대 발전량을 얻을 수 있는 태양광 블라인드의 최적 슬랫 각도를 추정하였다.

$$P = V \times I \quad \text{----------(식 2-14)}$$

$$W = P \times H \quad \text{----------(식 2-15)}$$

P : 전력 (W)
V : 전압 (V)
I : 전류 (A)
W: 발전량 (Wh)
H : 시간 (h)

(2) 단위성과 2-1-② 태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘 개발

(가) 실시간 태양광 발전량 모니터링을 위한 센서 네트워크 알고리즘 개발

본 연구에서 개발한 5차 프로토타입 모델에서는 센서 네트워크 기술 및 데이터 분석 기술을 활용하여 실시간 태양광 발전량을 모니터링 및 평가할 수 있도록 하였다. 실시간 모니터링 및 평가의 목적은, 프로토타입 모델의 기술적 성능(예: 태양광 발전량)을 평가하고, 제품을 지속적으로 점검, 보수하며 유지관리하기 위함이다. 이를 위하여, 본 연구에서는 프로토타입 모델의 태양광 발전량과 환경조건을 모니터링하고 평가하기 위한 지표를 수립하였다([표 2-34] 참조).

첫째, 프로토타입 모델의 기술적 성능을 모니터링 및 평가하기 위하여, 태양광 블라인드로부터 측정할 수 있는 전압, 전류, 전력을 태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표로 수립하였다[31)32)33)]. 태양광 블라인드의 전압, 전류, 전력을 태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표로 수립함으로써, 측정된 전압, 전류, 전력 데이터를 이용하여 태양광 발전량을 계산하여 태양광 발전량에 대한 정보를 제공할 수 있으며, 제공된 태양광 발전량 정보를 평가하여 태양광 발전량 기반의 태양광 추적 방식을 적용할 수 있다. 둘째, 프로토타입 모델의 외부적 요인에 의한 영향을 최소화하기 위하여, 외기 환경조건인 온도 및 습도를 태양광 발전량 모니터링 및 평가를 위한 환경조건 지표로 수립하였다. 본 연구에서 개발한 프로토타입 모델은 여러 가지 IoT 기술들을 복합적으로 적용하고 있기 때문에, 다양한 외기 요인에 영향을 받는다. 특히, 외기 환경조건(예: 온도, 습도)은 제품의 성능에 큰 영향을 미치는 요소이다. 따라

서, 본 연구에서 개발한 프로토타입 모델의 성능을 극대화하고, 효과적으로 유지관리하기 위하여, 다양한 환경조건을 모니터링 및 평가 지표로 수립하였다[37)38)39)].

[표 2-34] 태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표 수립

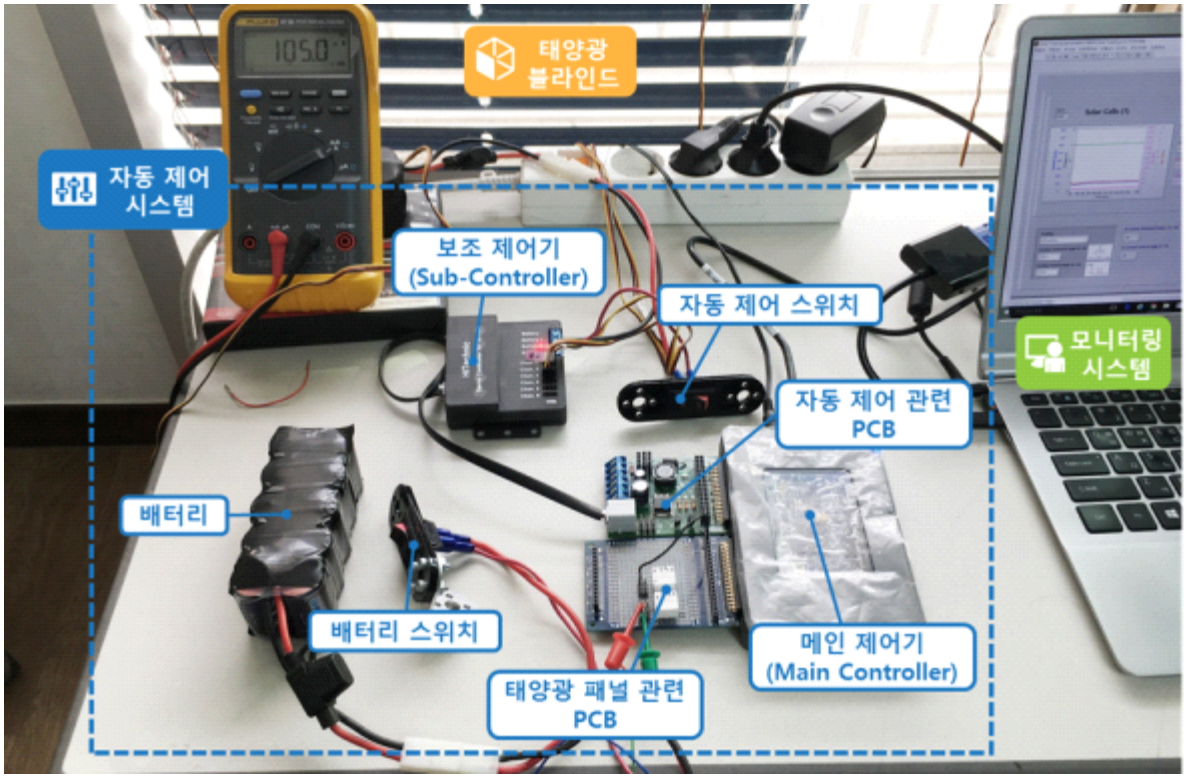
모니터링 및 평가 지표			1차 모델	2차 모델	3차 모델	4차 모델	5차 모델
박막 태양광 패널	a-Si		×	○	○	○	○
	CIGS		○	×	×	×	○
태양광 추적 시스템	트래커 타입	1축	○	○	○	○	○
		2축	×	○	○	○	○
	추적 방식	위치·시간	○	○	○	○	○
		발전량	×	×	×	×	○
모니터링 시스템	발전량	전압	×	○	○	○	○
		전류	○	○	○	○	○
		전력	×	○	○	○	○
	환경 조건	온도	×	×	○	○	○
		습도	×	×	○	○	○

(나) 실시간 태양광 발전량 평가를 위한 알고리즘 개발

본 연구의 최종 성과물인 7차 프로토타입 모델의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발을 위한 태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다: ① 태양광 발전량 모니터링; ② 태양광 발전량 평가를 통한 추적 방식 적용.

첫째, 실시간 태양광 발전량 모니터링 기술을 개발하기 위하여, 센서 네트워크 알고리즘을 개발하였다([그림 2-23] 참조). 먼저, 태양광 블라인드의 최대 전력을 생산하기 위하여, 프로토타입 모델의 태양광 발전량 정보는 태양광 패널 관련 인쇄 회로 기판(PCB)으로 전달된다. 태양광 블라인드의 태양광 추적 기술 구현을 위하여, 태양광 발전량 추적 정보는 자동제어 관련 PCB 및 보조 제어기(Sub-Controller)에서 프로토타입 모델의 모터로 전달된다. 위의 태양광 발전량 및 태양광 발전량 추적 정보는 주 제어기(Main Controller)를 통해 태양광 발전량 모니터링 시스템과 실시간으로 연동된다.

위와 같이 개발된 실시간 태양광 발전량 모니터링 시스템에서는, 프로토타입 모델의 태양광 패널에서 측정된 전압, 전류, 전력 데이터를 이용하여 박막 태양광 패널에 따른 태양광 발전량 정보를 제공한다. 제공된 데이터를 바탕으로 태양광 발전량을 평가하여 태양광 발전량 기반의 태양광 추적 방식을 적용할 수 있다. 또한, 실시간 태양광 발전량 모니터링 시스템에서는, 프로토타입 모델의 외부적 요인에 의한 영향을 최소화하기 위하여, 외기 환경조건인 온도 및 습도 정보를 제공한다. 기후 모니터링 에 대한 정보는 제품의 성능에 큰 영향을 미치는 요소인 외부온도, 내부온도, 습도 데이터를 실시간으로 측정하여, 프로토타입 모델의 성능을 극대화할 수 있도록 하였다.



[그림 2-23] 실시간 태양광 발전량 모니터링을 위한 센서 네트워크 알고리즘 개발

둘째, 최대 전력을 생산할 수 있는 블라인드의 슬랫 각도를 설정하기 위하여, 측정한 태양광 발전량 모니터링 DB를 평가하여, 전력을 최대로 생산할 수 있는 블라인드의 최적 슬랫 각도 및 방위각을 산정한다. 이와 같이, 태양광 발전량 평가 과정을 반복하여, 태양광 블라인드에서 생산되는 발전량이 최대로 유지될 수 있도록, 태양광 블라인드의 최적 슬랫 각도 및 방위각을 실시간으로 조절할 수 있다. 이때, 태양광 추적 조건은 박막 태양광 패널의 타입별로 시스템에서 자동입력되거나 사용자가 직접 입력할 수 있다. 태양광 추적 조건으로서 입력 할 수 있는 변수 중 기본값(default value)은 최초 추적 각도와 추적 중 각도의 범위, 그리고 추적 기본 단위가 있으며, 사용자 입력값은 추적할 수 있는 각도의 범위와 추적 기본 단위 뿐만 아니라, 초단위의 추적주기를 설정할 수 있다. 1축(상/하) 추적방식과 1축(좌/우) 추적 방식의 추적 기본 단위는 1도이며, 추적 중 각도의 범위는 ±5도로 동일하다. 그러나 최초 추적 각도의 범위는 1축(상/하) 추적방식의 경우 0 - 70도, 1축(좌/우) 추적 방식의 경우 -10~+10도로 설정될 수 있다([표 2-35] 참조). 따라서, 태양광 발전량 평가 결과를 바탕으로 태양광 블라인드의 최적 슬랫 각도 및 방위각을 실시간으로 조절할 수 있도록, 태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘을 개발하여, 태양광 블라인드의 발전 효율을 극대화 할 수 있도록 하였다.

[표 2-35] 태양광 추적 조건 설정

구분		추적 조건	
상/하 Tracking	각도	기본값(default value)	사용자 입력
		▪ 최초 tracking: 0~70도 ▪ tracking 중 각도 범위: ±5도 ▪ tracking 기본 단위: 1도	▪ tracking 각도 범위 설정 가능 ▪ tracking 기본 단위 설정 가능
	주기	사용자 입력: 초 단위	
좌/우 Tracking	각도	기본값(default value)	사용자 입력
		▪ 최초 tracking: -10~+10도 ▪ tracking 중 각도 범위: ±5도 ▪ tracking 기본 단위: 1도	▪ tracking 각도 범위 설정 가능 ▪ tracking 기본 단위 설정 가능
	주기	사용자 입력: 초 단위	

(3) 단위성과 2-2-① 실내 공기질 모니터링 및 평가 지표 수립

(가) 실내 공기질 및 온·습도 모니터링 지표 수립

본 연구진은 실내 공기질 및 온·습도 모니터링 지표를 수립하기 위해, 국내·외 실내공기질 관리기준 조사를 진행하였다. 조사 결과, 국내·외 모두 실내의 온도, 습도, 미세먼지(PM10, PM2.5), 이산화탄소(CO_2), 총휘발성유기화합물(TVOCs)의 관리에 초점을 맞추고 있는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구진은 이를 고려하여 총 5개의 실내 환경 모니터링 지표를 수립하였다: ① 온도; ② 습도; ③ 미세먼지; ④ 이산화탄소(CO_2); ⑤ 총휘발성유기화합물(TVOCs). 이와 더불어, 기 개발중인 IoT 기반의 다기능 창호 제품의 경우 창문을 통한 환기를 구현해야하기 때문에, 실내 뿐 아니라 실외 환경 또한 동시에 모니터링하기로 결정하였다 ([표 2-36] 참고).

[표 2-36] 실내·외 모니터링 지표 수립

실내·외 환경 모니터링 지표				
온도 (단위: ℃)	습도 (단위: %)	공기질		
		미세먼지 (단위: $\mu g/m^3$)	이산화탄소(CO_2) (단위: ppm)	총휘발성유기화합물 (TVOCs) (단위: ppb)

본 연구진은 실내 환경(실내 공기질 및 온·습도) 평가 지표를 수립하기 위해 다음의 두 가

지 관점을 고려하였다: ① 실내 공기질 만족도 관점의 실내 환경 평가 지표; ② 열 쾌적 관점의 실내 환경 평가 지표 ([표 2-37] 참조). 더불어, 유클리디언 거리 계산 방법과 적합성 함수를 기반으로, 두 관점의 실내 환경 평가 지표를 통합하여, 실내 환경을 종합적으로 평가할 수 있는 '통합 실내 환경 점수'를 개발하여 실내 환경을 평가하였다[41].

[표 2-37] 실내 환경 평가 지표 수립

구분	실내공기질 만족도	열 쾌적			
실내 환경 평가 지표	이산화탄소(CO_2) 농도	열 쾌적성 투표 (TCV)	열적 선호도 (TP)	응답 온열감 (TSV)	열적 만족도 (TS)

(나) 건물 유형별/사용자 특성별 실내 공기질 및 온·습도 평가 지표 수립

본 연구에서는 건물 유형별/사용자 특성별 실내 환경 평가를 위하여 실내 공기질 및 온·습도 평가 지표를 다음의 두 가지 관점에서 수립하였다: ① 재실자의 실내 공기질 만족도; ② 열 쾌적 관점의 실내 환경 평가 지표.

① 재실자의 실내 공기질 만족도

일반적으로 실내 오염 물질에는 이산화탄소(CO_2), 총휘발성유기화합물(TVOCs), 미세먼지 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 실내 오염 물질들 중, 레귤레이터를 통해 농도 조절이 가능한 이산화탄소(CO_2)를 분석 대상으로서 선정하였다. 따라서 실내 공기질 만족도를 평가하기 위해, 이산화탄소(CO_2) 농도 변화에 따른 재실자의 실내 공기질 만족도(1 (매우 나쁨) - 7 (매우 좋음))를 설문을 통해 수집하였다.

② 열 쾌적 관점의 실내 환경 평가 지표

본 연구진은 온도, 상대 습도, 유속에 대한 실시간 모니터링을 통해 수집한 데이터를 기반으로, 실내 기후를 평가하고자 하였으며, 설문 조사를 통해 대사율, 의복 등의 개인적인 요소를 추가로 수집하여, 예상 평균 온열감(PMV, Predicted Mean Vote)과 예상 불만족도(PPD)를 계산하였다. 더불어, 실내 환경 통합 평가 점수 개발을 위해, 설문조사를 통해 재실자가 현재 느끼는 열 쾌적도를 판단할 수 있는, 열 쾌적성 투표(TCV, Thermal Comfort Vote), 열적 선호도(TP, Thermal Preference), 응답 온열감(TSV, Thermal Sensation Vote), 열적 만족도(TS, Thermal Satisfaction)를 평가하고자 하였다 ([표 2-38] 참조).

[표 2-38] 열 쾌적 관점의 실내 환경 평가 지표

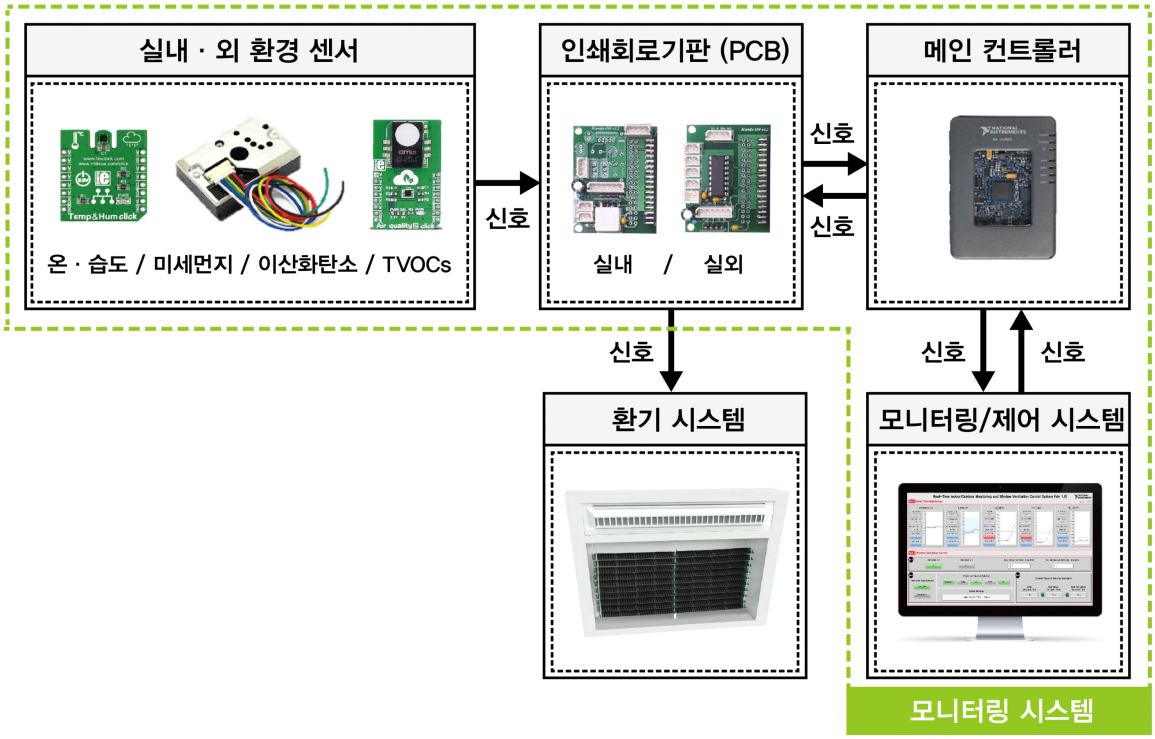
구분	정의	범위
예상 평균 온열감 (PMV)	7단계 온열감 척도에 대한 사람들의 의사 표시 (vote)의 평균치를 예측하는 지표	-3 (추움) ~ +3 (더움)
예상 불만족도 (PPD)	동일 환경에 노출된 다양한 사람들의 온열감에 대한 불쾌적도의 평균치를 예측하는 지표	0 ~ 100%
열 쾌적성 투표 (TCV)	재실자가 느끼는 열 쾌적에 대한 평가 지표	1 (매우 불쾌적) ~ 7 (매우 쾌적)
열적 선호도 (TP)	재실자의 실내 열적 조건 조정 의사에 대한 평가 지표	-1 (시원하게), 0 (유지), +1 (따뜻하게)
응답 온열감 (TSV)	재실자가 느끼는 열적 조건에 대한 평가지표	-3 (추움) ~ +3 (더움)
열적 만족도 (TS)	재실자가 느끼는 열적 조건의 만족도에 대한 평가 지표	1 (매우 불만족) ~ 7 (매우 만족)

(4) 단위성과 2-2-② 실내 공기질 모니터링 및 평가 알고리즘 개발

(가) 실시간 실내 공기질 및 온·습도 모니터링을 위한, 센서 네트워크 알고리즘 개발

본 연구에서는 7차 프로토타입 모델의 실내 공기질 및 온·습도 모니터링을 위한 센서 네트워크 알고리즘을 [그림 2-24]과 같이 구성하였다. 이는 환경(온·습도, 미세먼지, 이산화탄소(CO_2), 총휘발성유기화합물(TVOCs)) 센서, 인쇄회로기판(PCB), 메인컨트롤러, 환경 모니터링 시스템으로 구성되어 있다. 본 연구진이 구성한 센서 네트워크 알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

먼저, 본 연구진이 개발한 7차 프로토타입 모델에 내장된 환경센서를 통해 실내·외 환경 데이터를 수집하면, 인쇄회로기판(PCB)으로 신호형태의 데이터가 전송되고, 이를 기반으로 메인컨트롤러와 환경 모니터링 시스템이 연결되어 작동하는 방식이다. 이를 통해, 최종적으로 실시간 모니터링 시스템에서는 측정된 실내·외 환경 데이터를 DB로 구축하며, 실내·외 환경에 대한 데이터를 실시간으로 보여준다.



[그림 2-24] 실내 공기질 및 온·습도 모니터링을 위한 센서 네트워크 알고리즘

(나) 실내 공기질 및 온·습도 평가를 위한 알고리즘 개발

① 실내 공기질 및 온·습도 평가를 위한 알고리즘 개발과정

본 연구에서는 실내 공기질 및 온·습도 평가를 위해, 이산화탄소(CO_2)농도, 실내 기후 요소(온·습도, 유속), 예상 평균 온열감 (PMV), 예상 불만족도 (PPD)를 고려하였다. 또한 설문을 통한 재실자의 실내 공기질 만족도 및 열 쾌적도 분석 결과를 바탕으로, 실내 공기질 및 온·습도 평가 기술을 개발하고자 하였으며, 이는 다음의 3단계에 따라 진행되었다: Ⅰ) 시나리오 설정; Ⅱ) 재실자의 활동 및 실내 환경 변화를 기반으로 심리 반응(Psychological response) 분석; Ⅲ) 실내 환경 통합 평가 점수 개발. 본 연구는 실내 기후 요소와 오염 물질을 조절할 수 있는 'Y' 대학교의 사무실을 대상으로 진행되었으며, 총 22명(남자 16명, 여자 6명)의 재실자를 대상으로 설문 조사를 실시하였다.

Ⅰ) 시나리오 설정

본 연구에서는 실내 환경 통합 평가 점수 개발을 위해, 총 3개의 시나리오를 고려하였다([표 2-39] 참조). 시나리오 1과 2는 실내 온도 변화에 따른 재실자의 반응을 살펴보기 위해 수립되었으며, 시나리오 3은 이산화탄소(CO_2) 변화에 따른 재실자의 반응을 살펴보기 위해 수립하였다.

[표 2-39] 시나리오 수립

시나리오-단계	실내 온도	이산화탄소 (CO_2) 농도	재실자 활동
①-(a)	20.5℃ 이하	1000 ppm 이하	특별한 활동 없이 60분 동안 앉아있음
①-(b)	20.5℃ 이하	1000 ppm 이하	30분 동안 사무실 작업
①-(c)	25℃	1000 ppm 이하	특별한 활동 없이 60분 동안 앉아있음
①-(d)	25℃	1000 ppm 이하	30분 동안 사무실 작업
②-(a)	28℃ 이상	2000 ppm 이상	특별한 활동 없이 60분 동안 앉아있음
②-(b)	28℃ 이상	2000 ppm 이상	30분 동안 사무실 작업
②-(c)	25℃	2000 ppm 이상	특별한 활동 없이 60분 동안 앉아있음
②-(d)	25℃	2000 ppm 이상	30분 동안 사무실 작업
③-(a)	25℃	2000 ppm 이상	특별한 활동 없이 60분 동안 앉아있음
③-(b)	25℃	2000 ppm 이상	30분 동안 사무실 작업
③-(c)	25℃	1000 ppm 이하	특별한 활동 없이 60분 동안 앉아있음
③-(d)	25℃	1000 ppm 이하	30분 동안 사무실 작업

Ⅱ) 재실자의 활동 및 실내 환경 변화를 기반으로 심리 반응(Psychological response) 분석

설문을 통해 수집된 실내 환경 변화에 따른 재실자의 심리 반응 데이터를 기반으로, 재실자의 작업 전, 후와 실내 환경 변화 전, 후에 따른 재실자의 심리적인 반응을 분석하기 위해, 대응표본 t-검정(Paired t-test)을 진행하고자 하였다. 이는 실험 환경 변화 전과 후에 쌍을 이룬 샘플 간의 평균 차이를 계산하고, 이 샘플 간의 평균 차이가 통계적으로 유의한지를 분석하기 위해 사용되는 방법이다.

Ⅲ) 실내 환경 통합 평가 점수 개발

실내 공기질 만족도와 열 쾌적도를 모두 고려하는 통합 실내 환경 점수 개발을 위해, 실내 공기질 만족도와 열 쾌적도를 표준화시킨 후, 적합성 함수(Fitness function)를 도입하였다. 먼저, 재실자의 심리적인 반응에 대한 데이터를 표준화하기 위해 아래의 [식 2-16]과 [식 2-17]을 적용하였다. 실내 공기질 만족도와 열 쾌적성 투표(TCV), 열적 만족도(TS)의 범위는 양수이기에 [식 2-16]을 대입하고, 응답 온열감(TSV)과 열적 선호도 (TP)의 범위에는 음수가 있기에 [식 2-17]을 대입하였다. 열 쾌적성 투표(TCV)와 열적 만족도(TS)의 최대값은 7이고 최소값은 1이므로, 실내공기질 만족도와 열 쾌적성 투표(TCV), 열적 만족도(TS)의 가장 좋은 표준화 값은 1이다. 응답 온열감(TSV)과 열적 만족도(TP)의 경우, 0에 가까워질수록 열 쾌적성이 증가하기 때문에 응답 온열감(TSV)와 열적 만족도(TP)의 가장 좋은 표준화된 값은 0이다.

$$S_A = (Z_A - Z_A^{\min})/(Z_A^{\max} - Z_A^{\min}) \quad \text{(식 2-16)}$$

$$S_B = (|Z_B| - Z_B^{\min})/(Z_B^{\max} - Z_B^{\min}) \quad \text{(식 2-17)}$$

Z_A : 심리학적 반응 (실내공기질 만족도, TCV, TS) 각각의 값
$Z_A^{\max}$: Z_A의 값 중 최대값
$Z_A^{\min}$: Z_A의 값 중 최소값
S_A : Z_A의 표준화된 값
Z_B : 심리학적 반응 (TSV, TP) 각각의 값
$Z_B^{\max}$: Z_B의 값 중 최대값
$Z_B^{\min}$: Z_B의 값 중 최소값
S_B : Z_B의 표준화된 값

또한, 본 연구에서는 적합성 함수를 도출하기 위해, 가중 유클리디언 거리(The weighted Euclidean distance) 계산 방법을 적용하였다[41]([식 2-18], [식 2-19] 참조). 실내공기질 만족도, 열 쾌적성 투표(TCV), 열적 만족도(TS)의 표준화된 값은 1에 가까울수록 좋기 때문에 b_i의 값을 1로 하며, 응답 온열감(TSV), 열적 선호도(TP)의 표준화된 값은 0에 가까울수록 좋기 때문에 b_i의 값을 0으로 정의하였다. 이를 통해, 도출된 적합성 함수는 [식 2-18]과 같다. [식 2-19]의 A는 실내 공기질 만족도, B는 응답 온열감(TCV), C는 열적 만족도(TS), D는 응답 온열감(TSV), E는 열적 선호도(TP)이며 각각의 표준화된 값은 [식 2-16], [식 2-17]을 통해 나온 표준화된 값이다. [식 2-18]의 벤치마크 값은 각각의 표준화된 값의 좋은 값으로 주었기 때문에 [식 2-19]의 적합성 함수 값은 작을수록 재실자가 느끼는 실내 공기질 만족도와 열 쾌적도가 좋다는 것을 의미한다. 따라서 적합성 함수 값이 의미하는 통합된 실내 환경 점수는 작을수록 좋다는 것을 의미한다.

$$wEd_{x,b} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i \times (x_i - b_i)^2}, 0 < w_i < 1 \text{ and } \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \quad \text{----------(식 2-18)}$$

$wEd_{x,b}$: x와 b사이의 가중 유클리디언 거리
w_i : i번 째 가중치 값
x_i : i번 째 특성 값
b_i : x_i값에 따라 0 혹은 1의 값을 갖는 벤치마크 값

$$F = \sqrt{w_A \times (1 - S_A)^2 + w_B \times (1 - S_B)^2 + w_C \times (1 - S_C)^2 + w_D \times (S_D - 0)^2 + w_E \times (S_E - 0)^2} \text{ --(식 2-19)}$$

F: 적합성 함수 값
S_A : 실내 공기질 만족도의 표준화된 값
S_B : TCV의 표준화된 값
S_C : TS의 표준화된 값
S_D : TSV의 표준화된 값
S_E : TP의 표준화된 값
w_A : S_A의 가중치 값
w_B : S_B의 가중치 값
w_C : S_C의 가중치 값
w_D : S_D의 가중치 값
w_E : S_E의 가중치 값

② 실내 공기질 및 온·습도 평가 알고리즘 개발 결과

실내 환경 평가 기술 개발 결과는 다음의 두 가지 구분하여 설명할 수 있다: Ⅰ) 재실자의 활동 및 실내 환경 변화를 기반으로 심리 반응(Psychological response) 분석; Ⅱ) 실내 환경 통합 평가 점수 개발.

Ⅰ) 재실자의 활동 및 실내 환경 변화에 따른 심리 반응(Psychological response) 분석 결과

본 연구에서는 총 3개의 시나리오(12단계)를 고려하여, 실시간 실내 환경을 모니터링 하였고, 22명의 재실자를 대상으로 실내 환경에 대한 설문을 진행하였다. 수집된 실내 환경 데이터와 설문 조사 결과를 기반으로, 대응표본 t-검정을 통해 재실자의 활동 및 실내 환경 변화에 따른 심리 반응을 분석하였다. 그 결과를 살펴보면, 재실자의 활동과는 무관하게 실내 온도가 비적정 수준에서 적정 수준으로 변화하면 재실자의 열 쾌적도가 향상되었다. 또한 재실자의 활동 관점에서, 시나리오 ①-(a)와 ①-(b)를 비교하여 보았을 때, 대사량이 증가(60분 동안 특별한 활동 없이 앉아있는 상태에서 30분 동안 사무실 작업을 하는 상태로의 변화)하면 열 쾌적도가 증가하는 것으로 분석되었지만, 시나리오 ②-(a)과 ②-(b)를 비교하여 보았을 때, 대사량이 증가하면 열 쾌적도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 재실자의 실내 공기질 만족도 관점에서 시나리오 ③을 살펴보면, 60분 동안 특별한 활동 없이 앉아있는 상태에서 이산화탄소(CO_2) 농도 변화에 더 민감한 것으로 나타났으며, 30분 동안 사무실 작업을 하는 상태에서는 이산화탄소(CO_2) 농도 변화를 잘 알아차리지 못하였다.

Ⅱ) 실내 환경 통합 평가 점수 개발

가중 유클리디언 거리 계산 방법을 이용한 적합성 함수 값을 통해, 각각의 시나리오에 대한 실내 환경 평가를 수행하였다 ([표 2-40] 참조). 먼저, 시나리오 ①에서 실내 온도가 증가함에 따라, 통합 실내 환경 점수가 급격하게 낮아지는 것으로 나타났으며, 재실자의 활동 상태가 60분 동안 특별한 활동 없이 앉아있는 상태에서 30분 동안 사무실 작업을 하는 상태로 바뀌었을 때, 통합 실내 환경 점수는 증가하는 것으로 분석되었다. 두 번째로, 시나리오 ②에서 온도가 낮아짐에 따라, 통합 실내 환경 점수가 좋아졌고, 시나리오 ①의 결과와 유사하게 재실자의 활동이 60분 동안 특별한 활동 없이 앉아있는 상태에서 30분 동안 사무실 작업을 하는 상태로 바뀌었을 때, 통합 실내 환경 점수가 높아지는 것으로 나타났다. 마지막으로, 시나리오 ③에서 이산화탄소(CO_2) 농도가 비적정 수준에서 적정 수준으로 감소하였을 때 통합 실내 환경 점수가 좋아졌다. 분석 결과를 종합해보면, 재실자는 이산화탄소(CO2) 농도의 변화보다 작동 온도의 변화에 더 민감하게 반응하였으며, 특별한 활동을 하고 있지 않을 때가 활동을 하고 있을 때보다 통합 실내 환경 점수가 더 좋아지는 것으로 분석되었다.

[표 2-40] 각각의 시나리오에 대한 실내 환경 평가 결과

시나리오 - 단계	CO_2 농도 (ppm)	온도 (℃)	상대 습도 (%)	유속 (m/s)	대사율 (Met)	의복 (Clo)	실내 공기질 만족도	열 쾌적성 투표 (TCV)	열적 선호도 (TS)	응답 온열감 (TSV)	열적 만족도 (TP)	통합 실내 환경 점수
①-(a)	998.1	18.70	33.40	0.1	1.00	0.54	4.03	1.90	1.97	-2.21	0.93	0.690
①-(b)	998.1	18.70	33.40	0.1	1.20	0.54	3.81	2.00	2.00	-1.96	0.96	0.696
①-(c)	985.8	25.00	28.20	0.1	1.00	0.54	4.69	4.66	4.69	0.17	0.03	0.335
①-(d)	985.8	25.00	28.20	0.1	1.20	0.54	4.56	4.59	4.52	0.48	-0.07	0.358
②-(a)	2414.2	28.80	31.30	0.1	1.00	0.54	2.85	3.06	2.94	2.29	-0.88	0.722
②-(b)	2414.2	28.80	31.30	0.1	1.20	0.54	2.54	2.76	2.76	1.82	-0.82	0.729
②-(c)	2357.5	25.30	27.80	0.1	1.00	0.54	3.36	4.53	4.65	-0.24	-0.06	0.475
②-(d)	2357.5	25.30	27.80	0.1	1.20	0.54	3.23	4.88	5.06	0	0.06	0.476
③-(a)	2407.8	25.45	32.90	0.1	1.00	0.54	3.57	4.43	4.36	0.29	-0.21	0.466
③-(b)	2407.8	25.45	32.90	0.1	1.20	0.54	3.64	3.86	4.07	0.50	-0.29	0.484
③-(c)	993.3	25.21	27.47	0.1	1.00	0.54	4.00	4.64	4.64	0	-0.07	0.405
③-(d)	993.3	25.21	27.47	0.1	1.20	0.54	3.71	4.86	4.57	0.29	-0.07	0.434

비고: 통합 실내 환경 점수는 0 - 1의 값을 가지며, 점수가 높을수록 실내 환경이 좋지 않음을 의미함

(5) 단위성과 2-3-① 실시간 모니터링 장치 개발

(가) 실시간 태양광 발전량 모니터링 장치 개발

7차 프로토타입 모델 기반의 다기능 스마트 창호 제품은 여러 가지 구동 알고리즘과 장치들이 복합적으로 어우러져있기 때문에, 각각의 알고리즘과 장치들을 통합하여 시스템화 할 필요가 있다. 따라서 본 연구진은 랩뷰(LabVIEW, Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)를 활용하여, 태양광 블라인드와 관련된 각각의 알고리즘과 다양한 장치들을 웹·스마트기기 기반으로 통합하고 시스템화하였다. 본 시스템에 내장된 실시간 모니터링 및 평가 기술을 기반으로, 태양광 블라인드 슬랫이 자동으로 제어될 뿐만 아니라 최적의 태양광 추적 방식을 자동적으로 적용할 수 있도록 하였다. 기 개발된 태양광 블라인드를 실시간으로 모니터링 및 자동 제어할 수 있는 '태양광 블라인드 통합 관리 시스템(Ver 1.2)'은 크게 두 부분으로 구성되어 있다: ① 실시간 모니터링(Part A); ② 기후요소를 고려한 태양광 추적(Part B). 먼저, '실시간 모니터링(Part A)' 부분의 사용자 인터페이스는 사용

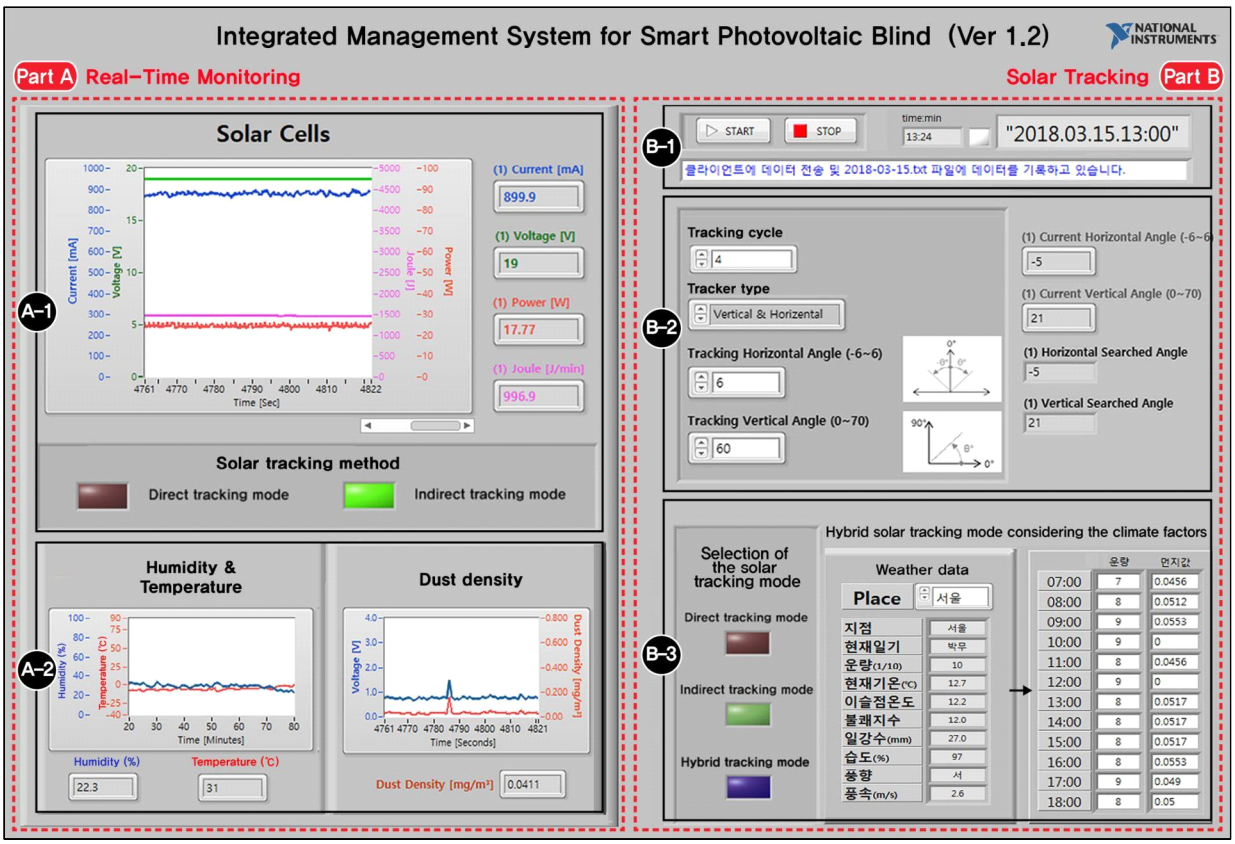
자가 여러 가지 정보를 한눈에 파악할 수 있도록 다음의 2가지 부분으로 구성하였다: ① Part A-1. 태양광 발전량 모니터링; ② Part A-2. 기후요소 모니터링 ([그림 2-25] 참조).

① Part A-1. 태양광 발전량 모니터링

7차 프로토타입의 태양광 블라인드에서 생산되고 있는 태양광 발전량에 대한 정보와 태양광 추적 방식에 대한 정보를 모니터링 할 수 있다. 먼저, 태양광 블라인드에서 생산되고 있는 전류(mA), 전압(V), 전력(W), 에너지(J/min)의 정보를 실시간으로 모니터링하고, 이러한 수치 정보를 그래프로 표현하여 사용자가 한눈에 실시간 전력생산 패턴을 파악할 수 있다. 또한, 태양광 발전량 정보를 초단위로 저장하여 태양광 발전량에 관한 데이터베이스를 구축하도록 하였다. 다음으로, 본 연구에서 개발한 3가지 태양광 추적 방식 중 현재 태양광 블라인드 슬랫에 적용되고 있는 태양광 추적 방식을 사용자가 한눈에 쉽게 파악할 수 있도록 하였다 ([그림 2-25]의 Part A-1 참조).

② Part A-2. 기후요소 모니터링

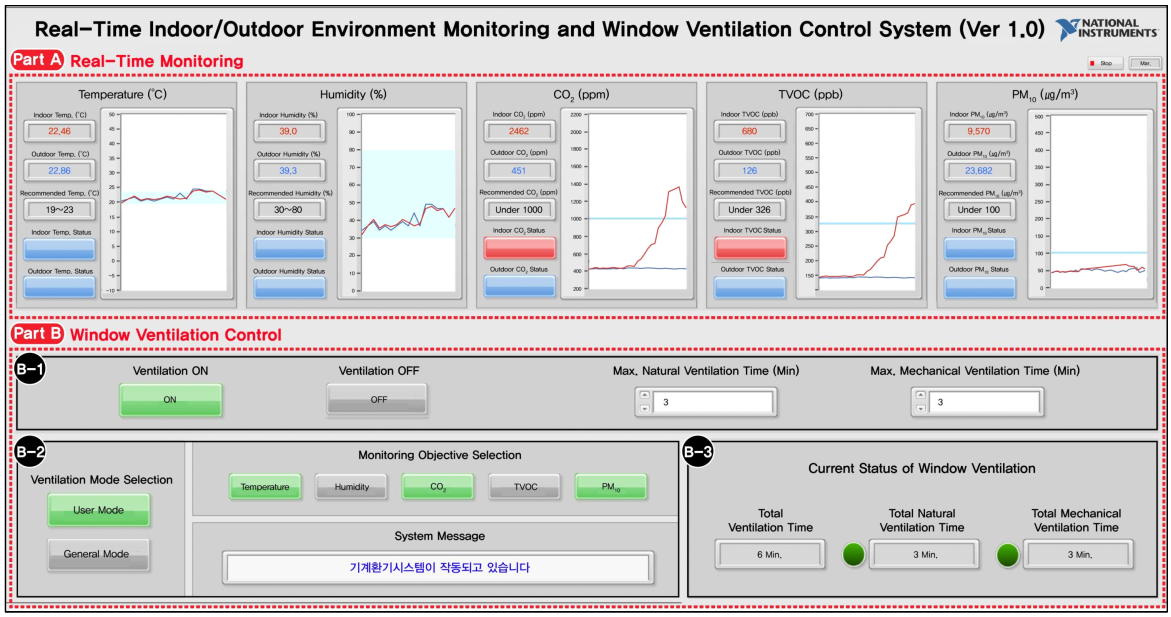
7차 프로토타입 모델에 부착되어 있는 센서를 통해, 제품이 설치된 위치의 기후요소 (기온(℃), 상대습도(%), 미세먼지 농도($\mu g/m^3$))에 대한 정보를 직접 측정하여 실시간으로 모니터링 할 수 있다 ([그림 2-25]의 Part A-2 참조).



[그림 2-25] 태양광 블라인드 통합 관리 시스템(Ver 1.2)의 유저 인터페이스

(나) 실시간 실내 공기질 모니터링 장치 개발

본 연구진은 웹/스마트기기 기반의 실시간 실내 및 실외 환경(온·습도, 미세먼지, 이산화탄소(CO_2), 총휘발성유기화합물(TVOCs)) 모니터링 장치를 랩뷰(LabVIEW) 기반으로 시스템화하였다. 본 연구진이 개발한 실시간 환경 모니터링 시스템의 유저 인터페이스는 크게 3가지 요소로 구성되어 있다: Ⅰ) 실시간 실내 환경 모니터링; Ⅱ) 실시간 실외 환경 모니터링; Ⅲ) 실내 환경 요소별 관리기준 ([그림 2-26]의 Part A 참조).



[그림 2-26] 실시간 실내·외 환경 모니터링 및 창호형 환기 제어 시스템(Ver 1.0)

Ⅰ) 실시간 실내 환경 모니터링

7차 프로토타입 모델에 내장되어 있는 실내 환경 모니터링 센서를 통해 들어오는 실내 온도, 습도, 이산화탄소(CO_2) 농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs) 농도, 미세먼지 농도 정보들을 실시간으로 모니터링 할 수 있다. 또한, 모니터링된 정보들을 바로 그래프로 변환 후 제시하여, 모니터링 중인 실의 환경 추세도 파악할 수 있도록 하였다. 이와 더불어, 각각의 실내 환경 요소들이 국가에서 제시하고 있는 관리기준 보다 나쁜 것으로 평가된 경우, 시스템 상의 모니터링 부분에 빨간색 불빛이 들어와, 재실자에게 실내 환경에 대한 알람을 주고자 하였다.

Ⅱ) 실시간 실외 환경 모니터링

본 연구진이 개발하고자 하는 다기능 스마트 창호 제품의 환기시스템의 경우, 실내 뿐 아니라 실외 환경을 동시에 고려하여 환기를 제어하고자 하였다. 따라서 개발된 시스템 상에 실내의 환경뿐만 아니라 실외 환경도 모니터링 될 수 있도록 구성하였다. 또한, 실내 환경 모니터링과 마찬가지로, 실시간 실외 환경 정보를 그래프로 제시하였으며, 실외 환경 요소들의 상태가 국가의 권고기준보다 나쁠 경우 빨간색으로 알람을 주어, 재실자의 환기행동을 제어하고자 하였다.

Ⅲ) 실내 환경 요소별 관리기준

개발된 실내 환경 실시간 모니터링 시스템을 살펴보면, 'Recommended Temp. / Humidity / CO_2 / TVOCs / PM10'으로 제시한 부분에서, 국내 교육부에서 지정한 실내 공기질 관리 기준을 토대로 적정 실내 환경 수준을 제시하고 있다. 또한, 그래프 상에 적정 범위 및 적정선을 하늘색으로 제시하여, 모니터링 되는 실의 환경적 수준을 사용자가 직관적으로 파악할 수 있도록 하였다.

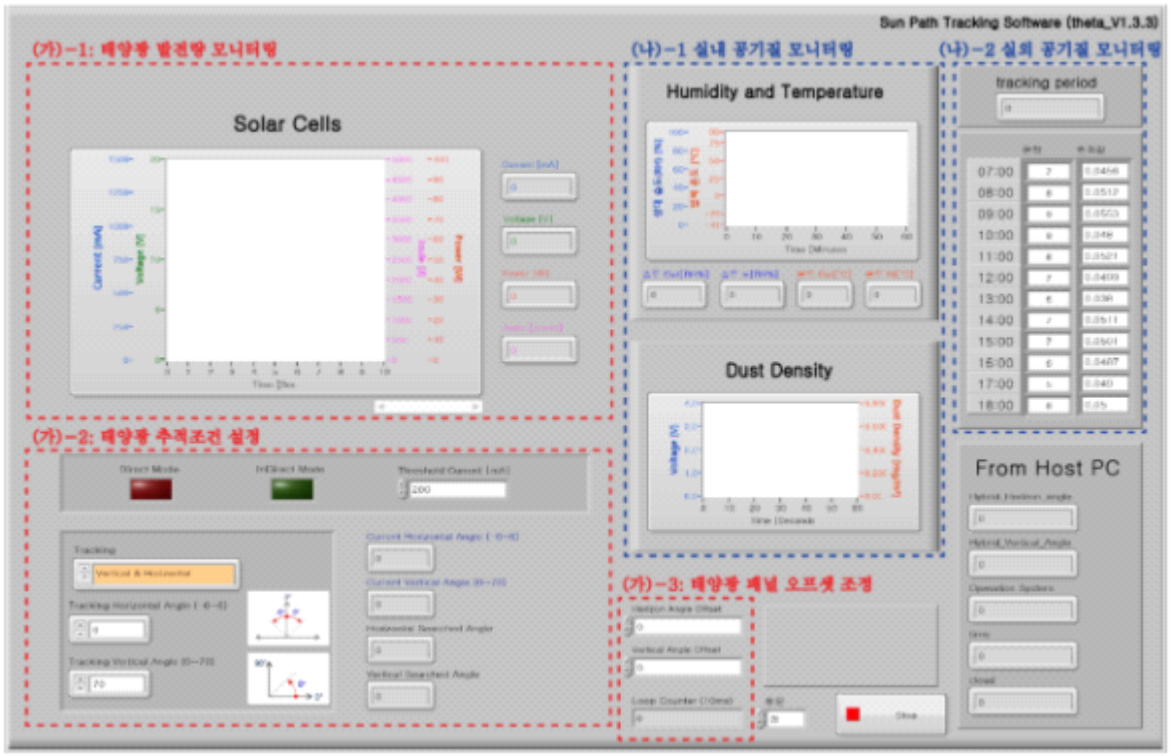
(6) 단위성과 2-3-② 실시간 모니터링 성능평가 및 실제 현장 적용 평가



[그림 2-27] 태양광 블라인드 통합 관리 시스템(Theta-V1.3.3)의 유저 인터페이스

- 7차 프로토타입 모델

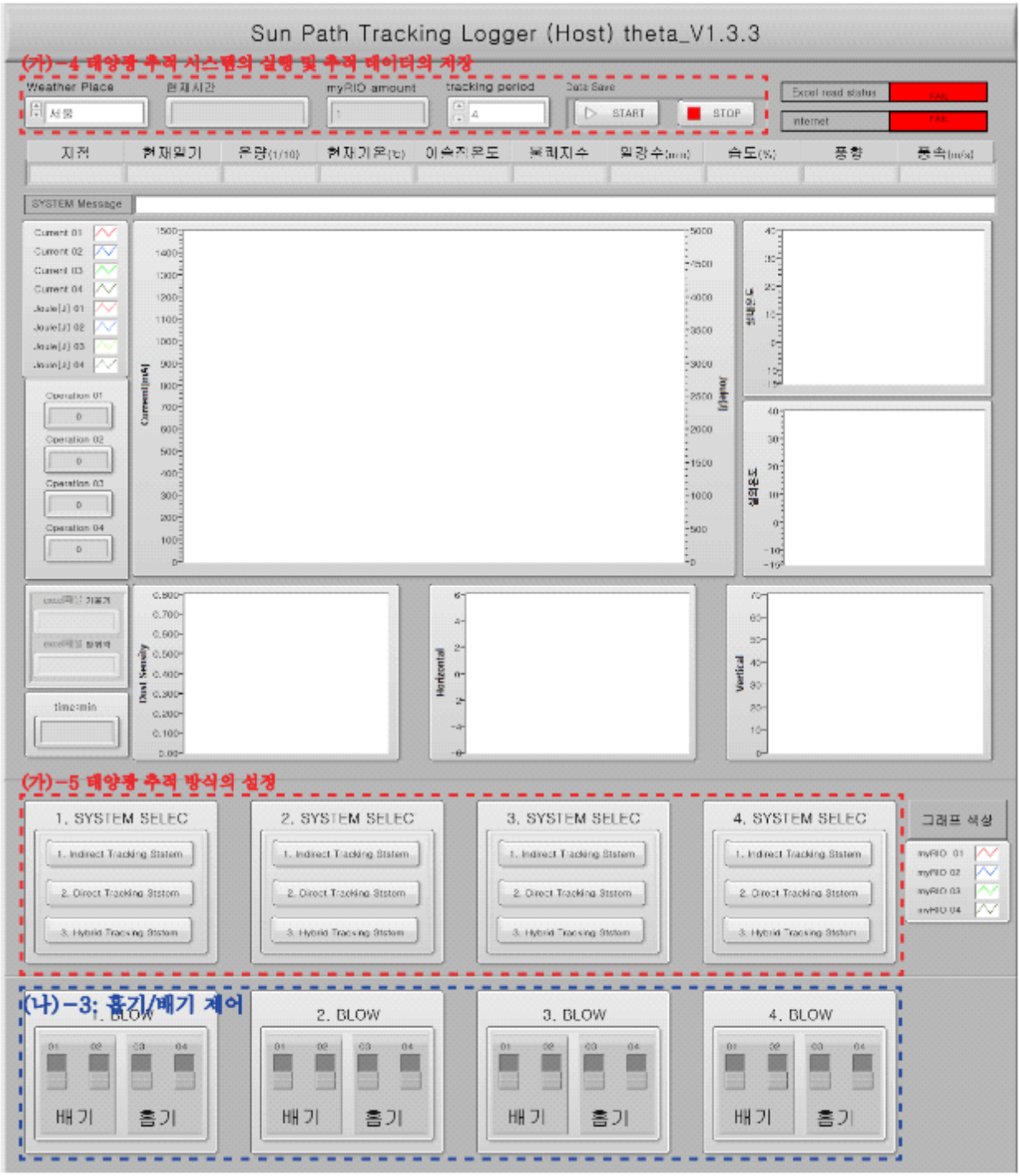
실시간 제어 시스템의 실제 현장 적용 평가를 위해 다음 현장시험을 수행하였다. 태양광 블라인드의 실시간 제어 시스템은 실시간 모니터링된 태양광 발전량을 평가하여 최적의 태양광 추적 방법을 수립하고 그에 따라 태양광 블라인드가 태양광 추적을 할 수 있도록 한다. 이를 위해, 태양광 블라인드의 실시간 제어 시스템을 실시간 제어 시스템, 주 제어기, 인쇄 회로 기판, 태양광 블라인드로 구성하였다. 먼저, 실시간 모니터링된 태양광 발전량에 대한 정보와 함께 현재의 태양광 추적 방법과 태양광 블라인드의 추적 타입에 대한 정보가 실시간 제어 시스템으로 전달되면 그에 대한 최적의 태양광 추적 방법을 수립한다. 이에 대한 태양광 추적 방법은 태양광 발전량 기반의 태양광 추적 방법과 위치 및 시간 기반의 태양광 추적 방법이 존재한다. 최종적으로 수립된 최적의 태양광 추적 방법에 대한 정보는 주 제어기와 인쇄 회로 기판을 통하여 태양광 블라인드로 전달되어 실시간 제어를 가능하게 한다.



[그림 2-28] 태양광 블라인드 통합 관리 시스템(Theta-V1.3.3)의 유저 인터페이스

(가) 실시간 태양광 발전량 모니터링 장치를 적용한 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

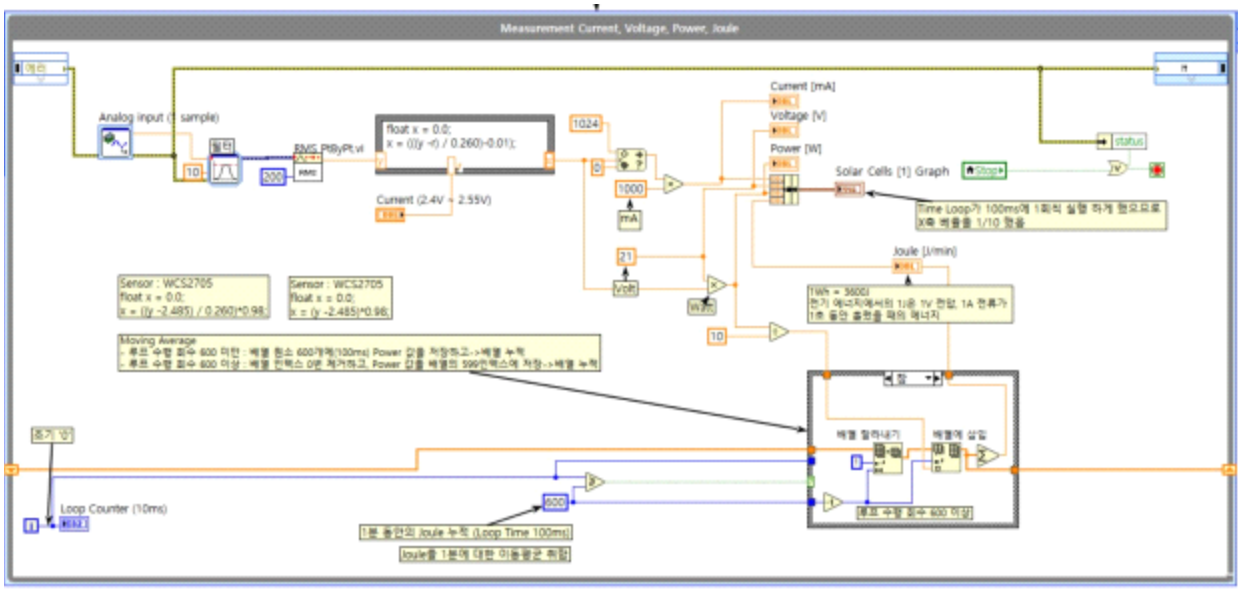
먼저, 실시간 모니터링 부분의 사용자 인터페이스는 사용자가 여러 가지 정보를 한눈에 파악할 수 있도록 다음의 3가지 부분으로 구성하였다: ① (가)-1. 태양광 발전량 모니터링; ② (가)-2. 태양광 추적조건 설정, ③ (가)-3 태양광 패널 오프셋 조정, ④ (가)-4 태양광 패널 오프셋 조정 ([그림 2-28] 참조).



[그림 2-29] 태양광 블라인드 통합 관리 시스템(Theta-V1.3.3)의 유저 인터페이스 2

① (가)-1 태양광 발전량 모니터링

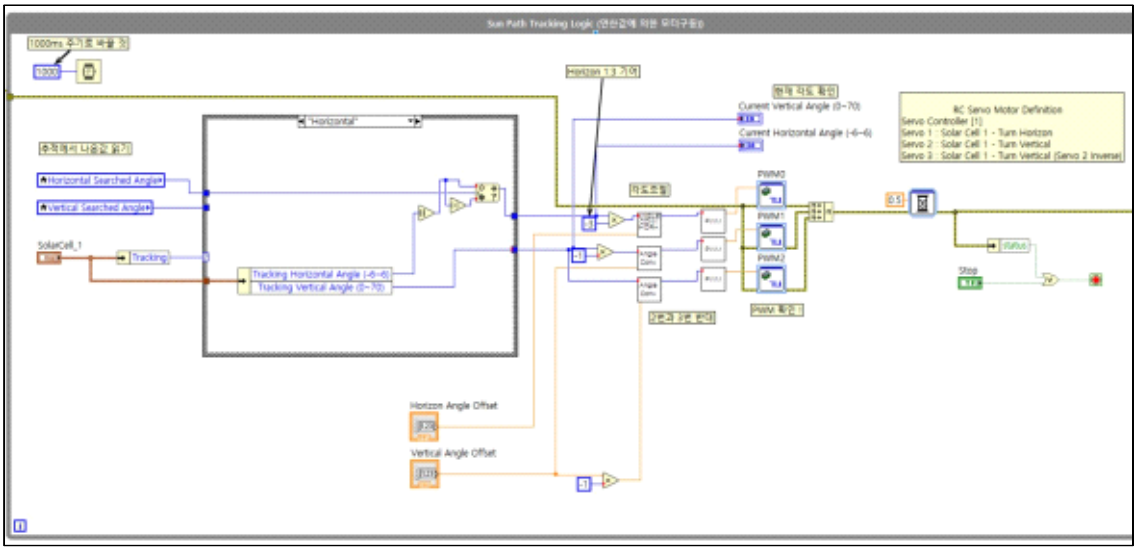
7차 프로토타입 모델의 태양광 블라인드에서 생산되고 있는 태양광 발전량에 대한 정보와 태양광 추적 방식에 대한 정보를 모니터링 할 수 있다. 먼저, 태양광 블라인드에서 생산되고 있는 전류(mA), 전압(V), 전력(W), 에너지(J/min)의 정보를 실시간으로 모니터링하고, 이러한 수치 정보를 그래프로 표현하여, 사용자가 한눈에 실시간 전력생산 패턴을 파악할 수 있다. 또한, 태양광 발전량 정보를 초단위로 저장하여 태양광 발전량에 관한 데이터베이스를 구축하도록 하였다. 다음으로, 본 연구에서 개발한 3가지 태양광 추적 방식 중 현재 태양광 블라인드 슬랫에 적용되고 있는 태양광 추적 방식을 사용자가 한눈에 쉽게 파악할 수 있도록 하였다 ([그림 2-28], [그림 2-30] 참조).



[그림 2-30] 전류, 전압, 전력, 열량 모니터링

② (가)-2 태양광 추적조건 설정

7차 프로토타입 모델의 태양광 블라인드에 적용되는 태양광 추적시스템을 설정하기에 앞서, 태양광 추적에 대한 조건을 설정할 수 있다. 먼저, 태양광 추적 주기를 최소 1분부터 최대 1시간까지 분 단위로 설정할 수 있다. 둘째, 태양광 블라인드 슬랫의 회전 방향과 회전할 수 있는 축의 개수를 결정지어주는 추적기 타입(상하 추적기(1축), 좌우 추적기(1축), 양방향 추적기(2축))을 설정할 수 있다. 셋째, 태양광 블라인드 슬랫이 회전할 수 있는 범위(상하, 좌우)를 설정할 수 있다. 마지막으로, 설정된 태양광 추적 조건에 맞게, 태양광 블라인드 슬랫이 현재 설정되어 있는 각도와 추적 방식에 따라 선정된 최적의 슬랫 각도를 모니터링 할 수 있다 ([그림 2-8], [그림 2-31] 참조).



[그림 2-31] 태양광 추적조건 설정

③ (가)-3 태양광 패널 오프셋 설정

7차 프로토타입 모델의 축의 기울기나 평형이 흐트러졌을 때, 자동으로 원상복구 시키는 기능이다 ([그림 2-28] 참조).

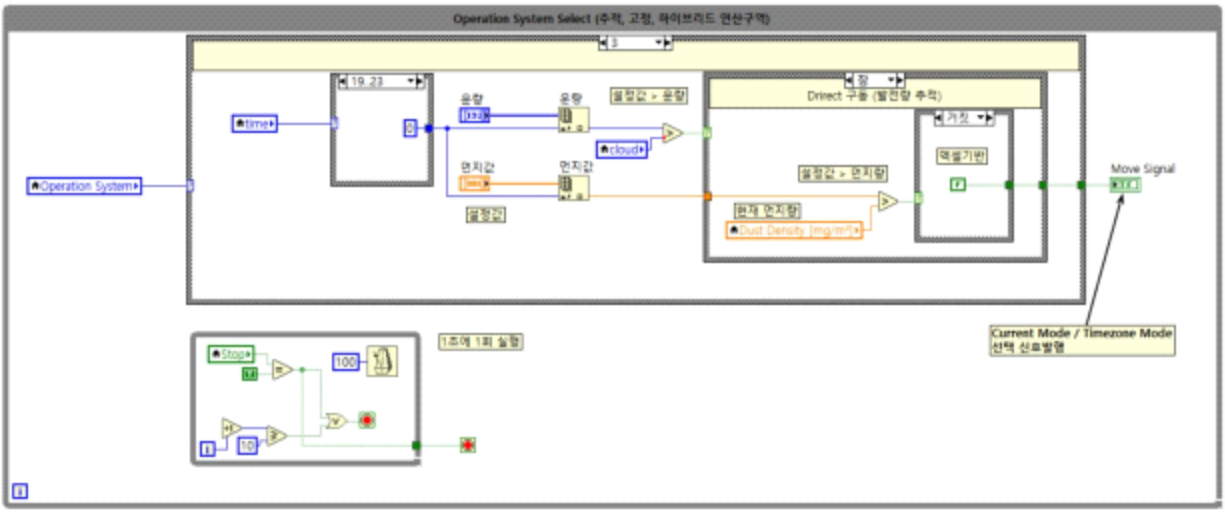
④ (가)-4 태양광 추적 시스템의 실행 및 추적 데이터의 저장

사용자가 화면의 'START' 버튼을 클릭하면 태양광 추적 시스템이 실행된다. 태양광 추적 시스템이 실행된 후, 태양광 추적에 관한 데이터를 저장할 수 있는 팝업 창이 나타나며, 태양광 통합 관리 시스템에 데이터가 저장되고 있을 때 데이터 기록 중이라는 안내메세지가 나타난다. 태양광 추적 시스템이 실행되는 중에는 설정한 추적 주기에 따라 태양광 블라인드 슬랫이 구동된 시간이 표시된다. 또한, 'STOP' 버튼을 클릭하면 구동중인 태양광 추적 시스템이 중단된다 ([그림 2-29] 참조).

⑤ (가)-5 태양광 추적 방식의 설정

7차 프로토타입 모델의 태양광 블라인드에 적용되는 태양광 추적시스템을 설정하기에 앞서, 태양광 추적에 대한 조건을 설정할 수 있다. 먼저, 태양광 추적 주기를 최소 1분부터 최대 1시간까지 분 단위로 설정할 수 있다. 둘째, 태양광 블라인드 슬랫의 회전 방향과 회전할 수 있는 축의 개수를 결정지어주는 추적기 타입(상하 추적기(1축), 좌우 추적기(1축), 양방향 추적기(2축))을 설정할 수 있다. 셋째, 태양광 블라인드 슬랫이 회전할 수 있는 범위(상하, 좌우)를 설정할 수 있다. 마지막으로, 설정된 태양광 추적 조건에 맞게, 태양광 블라인드 슬랫이 현재 설정되어 있는 각도와 추적 방식에 따라 선정된 최적의 슬랫 각도를 모

니터링 할 수 있다 ([그림 2-29], [그림 2-32] 참조).

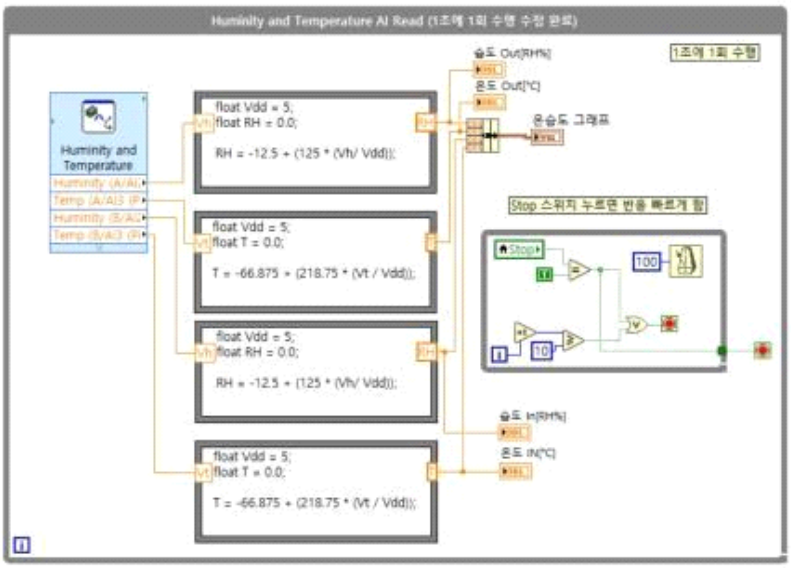


[그림 2-32] 태양광 추적 방식의 설정

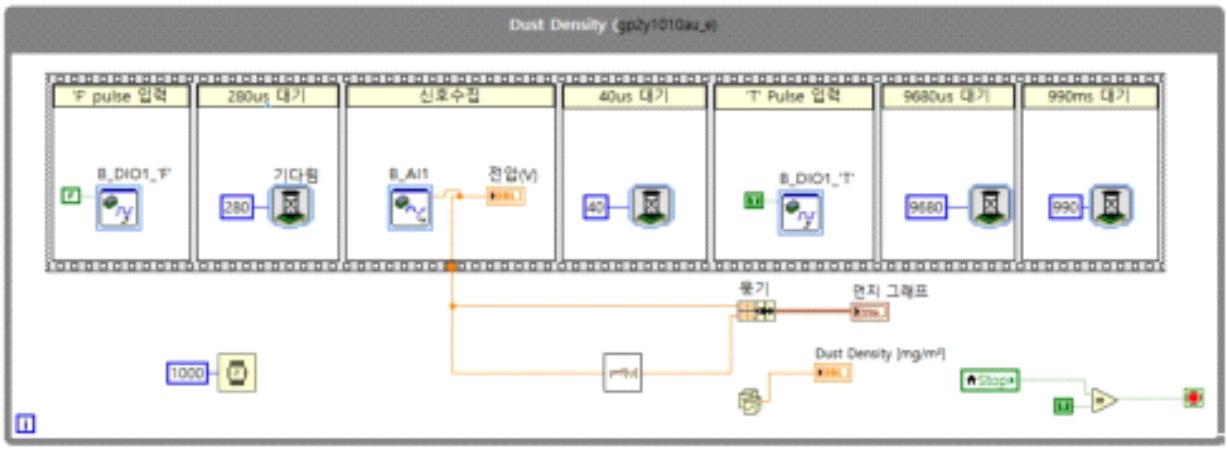
(나) 실시간 실내 공기질 모니터링 장치를 적용한 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

① (나)-1 실내 공기질 모니터링

7차 프로토타입 모델의 태양광 블라인드에 적용되는 태양광 추적시스템을 설정하기에 앞서, 7차 프로토타입 모델에 부착되어있는 센서를 통해, 모델 주변의 환경에 대한 기후요소(기온(℃), 상대습도(%), 미세먼지 농도($\mu g/m^3$))에 대한 정보를 직접 측정하여 실시간으로 모니터링 할 수 있다 ([그림 2-28], [그림 2-33], [그림 2-34] 참조).



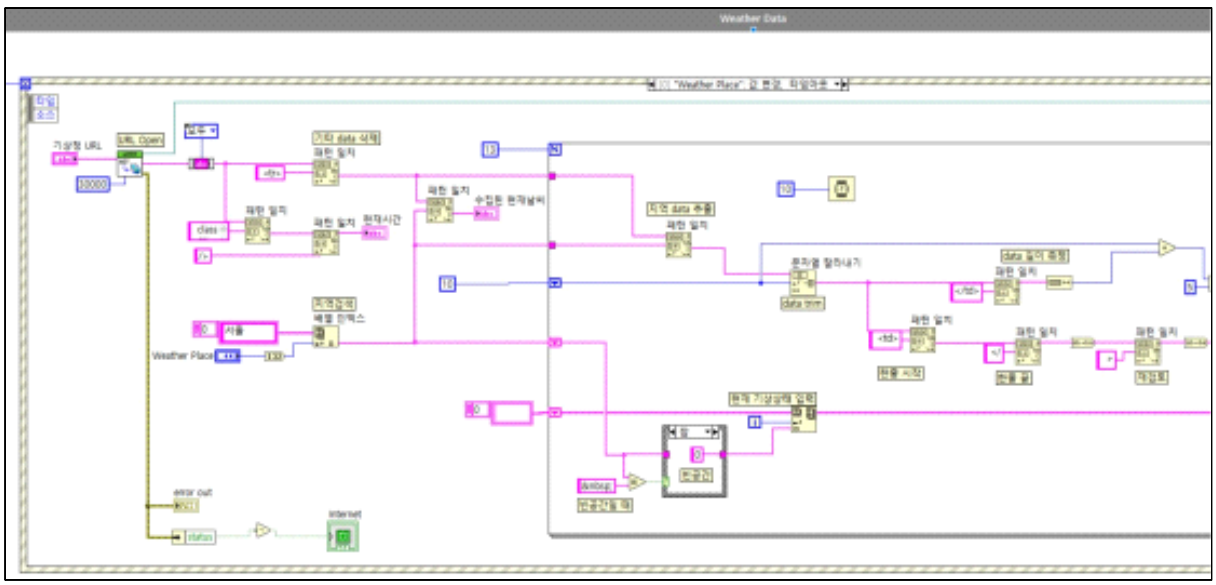
[그림 2-33] 온도, 습도 모니터링



[그림 2-34] 미세먼지농도 모니터링

② (나)-2 실외 공기질 모니터링

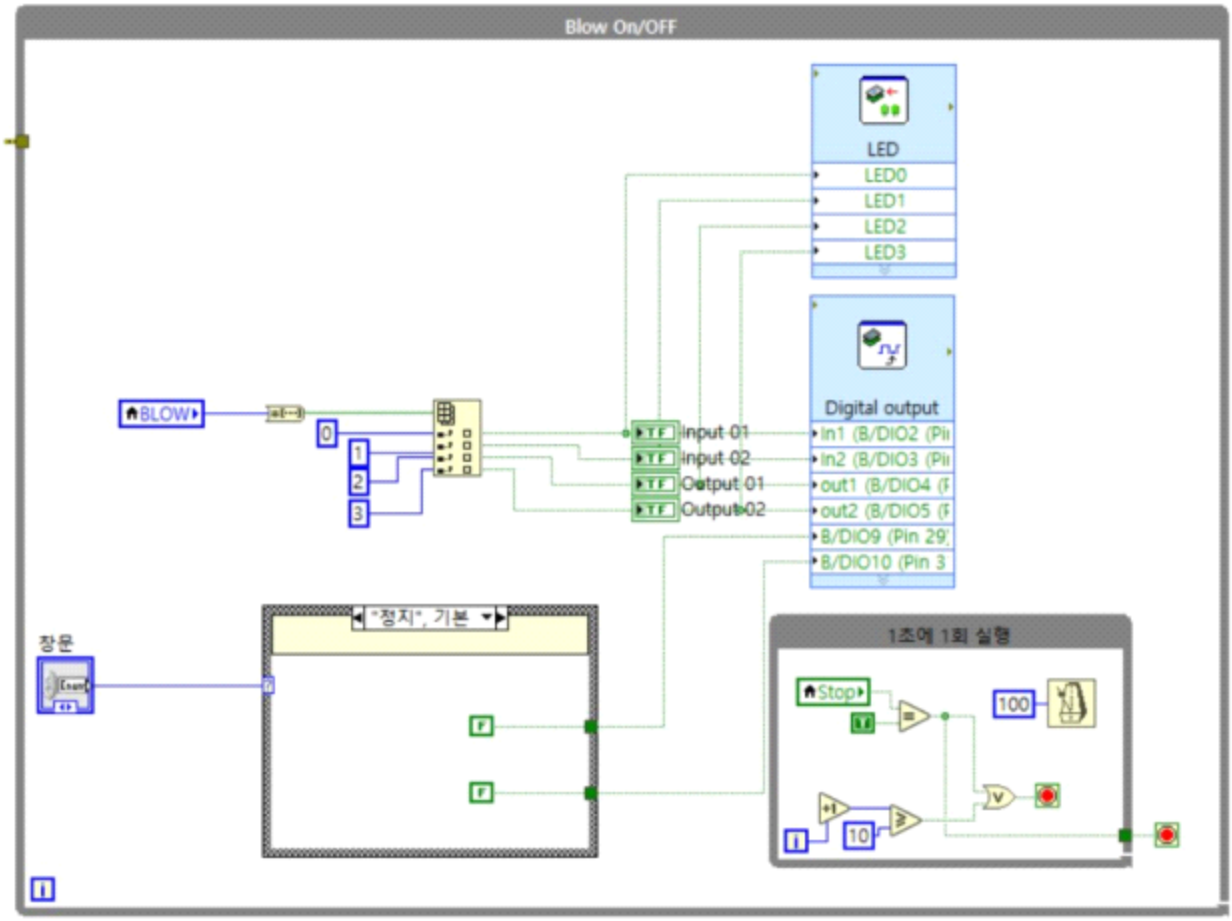
7차 프로토타입 모델의 태양광 발전량 최대 생산을 위하여, 본 연구에서 개발한 3가지 태양광 추적 방식 중 하나를 선정할 수 있다. 또한, 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 알고리즘에 따라 추적 방식을 선정 시, 한국 기상청으로부터 실시간으로 수집된 정보를 활용할 수 있도록 하였다 ([그림 2-28], [그림 2-35]).



[그림 2-34] 실외공기질 모니터링

③ (나)-3 흡기/배기 제어

7차 프로토타입 모델의 환기성능을 위해, 수동으로 흡기 및 배기를 제어할 수 있다 ([그림 2-28], [그림 2-36] 참조).



[그림 2-36] 흡기/배기 제어

다. 핵심성과 3: 웹/스마트마트기기 기반 '자동 제어 장치'의 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용평가

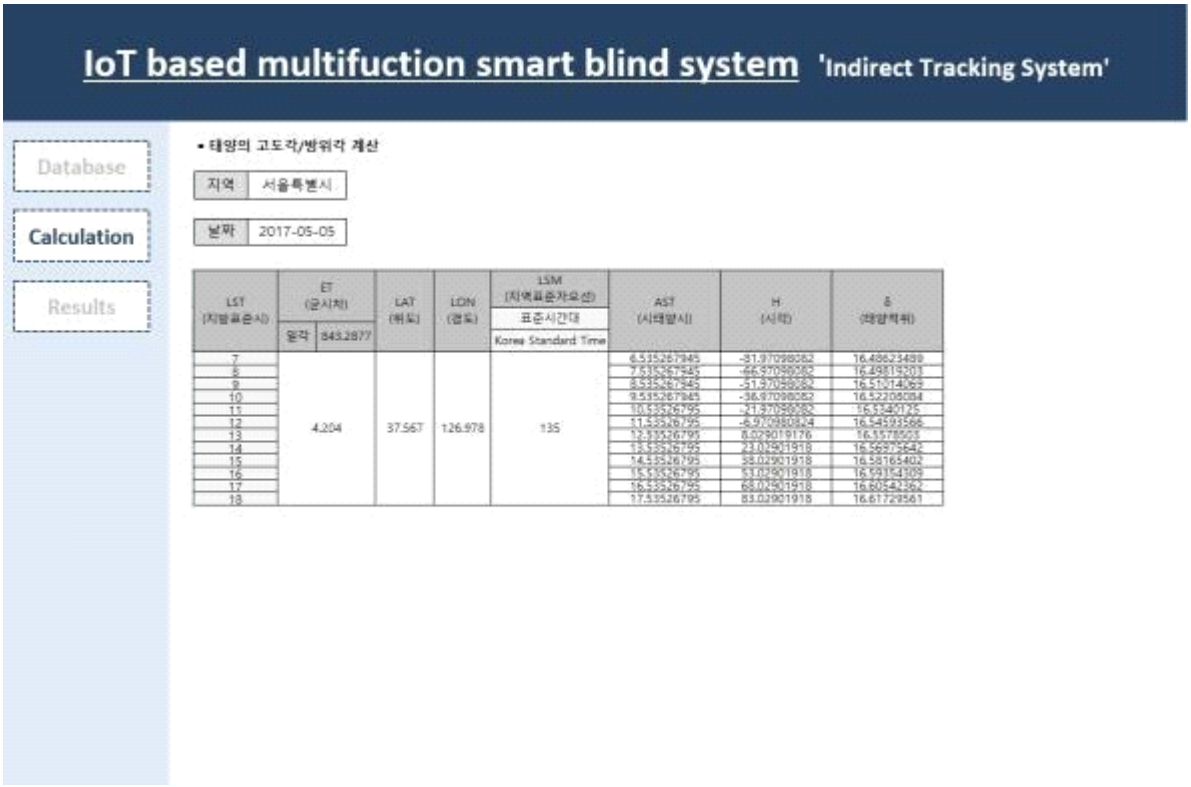
(1) 단위성과 3-1-① 지역별/일별 태양광 위치 DB 구축

(가) 지역별/일별 태양의 위치 DB 구축

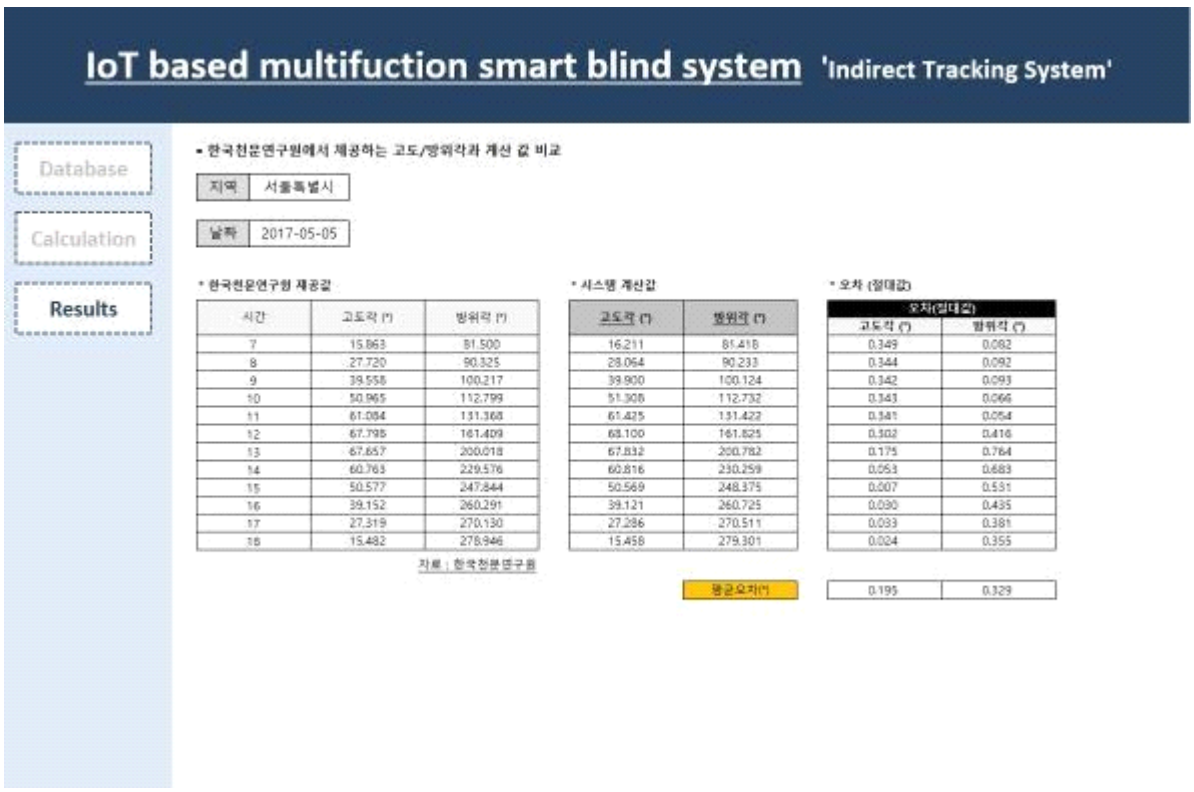
본 연구에서는 전력생산 최대화를 위한 태양광 추적 기술을 개발하기 위하여, 위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식을 적용할 수 있도록 지역별/일별 태양의 위치 DB를 구축하였다. 미국공조냉동공학회(American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE)에서 제공하는 2009 ASHRAE Handbook을 기반으로, 전국 166개의 지역에 대한 태양의 고도 및 방위각을 계산하였다. 본 연구에서 계산한 태양의 고도 및 방위각에 대한 신뢰성 확보를 위하여, 한국 천문 연구원에서 제공하는 태양의 고도 및 방위각과 비교하여 오차를 계산하였다. 본 연구에서는 이러한 일련의 과정을 자동으로 수행하기 위해, 엑셀기반의 태양 위치 자동 계산 모델을 개발하여, 사용자가 지역별/일별 태양의 고도와 방위각을 편리하게 계산할 수 있도록 하였다 ([그림 2-37] - [그림 2-39] 참조). 본 모델은 지역별/일별 태양의 위치 DB를 바탕으로 위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식을 적용할 때 편리하게 사용할 수 있다.



[그림 2-37] 엑셀기반의 태양 위치 자동 계산 모델 유저 인터페이스 1



[그림 2-38] 엑셀기반의 태양 위치 자동 계산 모델 유저 인터페이스 2



[그림 2-39] 엑셀기반의 태양 위치 자동 계산 모델 유저 인터페이스 3

(나) 지역별/일별 태양의 위치 DB 검증

본 연구에서는 구축한 위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식을 적용할 수 있는 지역별/일별 태양의 위치 DB의 신뢰성 확보를 위하여, 한국 천문 연구원에서 제공하는 태양의 고도 및 방위각과 시스템에서의 계산값을 비교하여 오차를 계산하였다. 한국 천문 연구원에서 제공하는 태양의 고도 및 방위각과 시스템에서의 계산값을 비교하기 위하여, 다음의 지역과 날짜를 대상으로 오차를 계산하였다: ① 지역: 서울특별시; ② 날짜: 2017년 5월 5일. 아래의 [표 2-41]에서 보이는 것과 같이, 시간별로 한국 천문 연구원에서 제공하는 고도각과 방위각은 시스템에서 구축한 DB를 기반으로 계산된 값과의 오차가 거의 없는 것을 알 수 있다. 고도각의 경우, 평균오차가 0.195° (최소 0.007°, 최대 0.349°), 방위각의 경우, 평균오차가 0.329°(최소 0.054°, 최대 0.764°)로 나타났다. 백분율 오차를 살펴봤을 때, 고도각의 경우 0.56%, 방위각의 경우 0.17%로 나타나, 본 시스템에서 계산한 고도각과 방위각의 정확성 및 신뢰성이 확보된 것으로 판단할 수 있다.

[표 2-41] 한국천문연구원 제공값과 시스템 계산값 비교

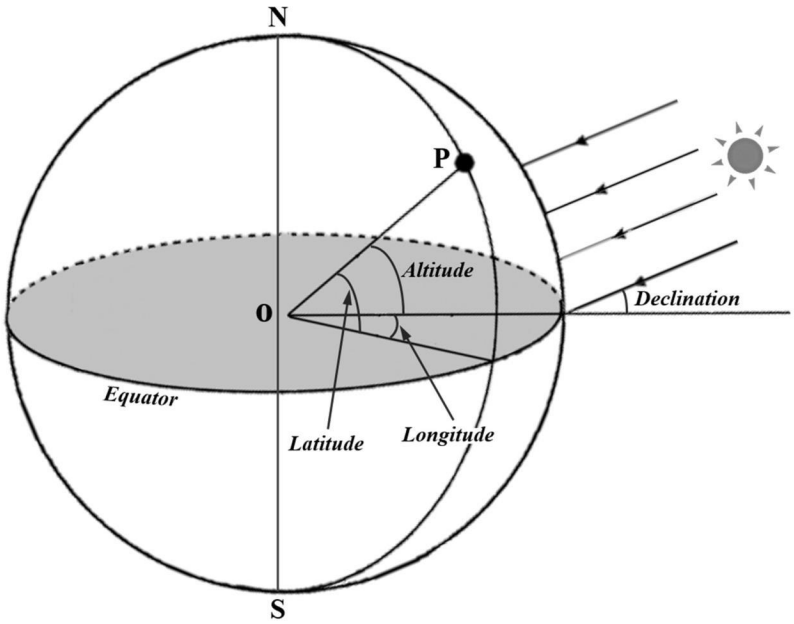
시간	한국천문연구원 제공값		시스템 계산값		절대값 오차		백분율 오차(%)	
(시)	고도각(°)	방위각(°)	고도각(°)	방위각(°)	고도각(°)	방위각(°)	고도각	방위각
7	15.863	81.500	16.211	81.418	0.349	0.082	2.20%	0.10%
8	27.720	90.325	28.064	90.233	0.344	0.092	1.24%	0.10%
9	39.558	100.217	39.900	100.124	0.342	0.093	0.86%	0.09%
10	50.965	112.799	51.308	112.732	0.343	0.066	0.67%	0.06%
11	61.084	131.368	61.425	131.422	0.341	0.054	0.56%	0.04%
12	67.798	161.409	68.100	161.825	0.302	0.416	0.45%	0.26%
13	67.657	200.018	67.832	200.782	0.175	0.764	0.26%	0.38%
14	60.763	229.576	60.816	230.259	0.053	0.683	0.09%	0.30%
15	50.577	247.844	50.569	248.375	0.007	0.531	0.01%	0.21%
16	39.152	260.291	39.121	260.725	0.030	0.435	0.08%	0.17%
17	27.319	270.130	27.286	270.511	0.033	0.381	0.12%	0.14%
18	15.482	278.946	15.458	279.301	0.024	0.355	0.15%	0.13%
평균 오차					0.195	0.329	0.56%	0.17%

(2) 단위성과 3-1-② 기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발

(가) 위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발

본 연구에서는 태양의 위치에 따라 블라인드 슬랫 각도를 조정하기 위하여, 위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 개발하였다. 위치 • 시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식은 태양광 블라인드가 설치된 위치와 시간에 따라, 태양의 고도 및 방위각을 산정하여, 블라인드 슬랫의 각도를 조절하는 방식을 적용한다. 그러나, 태양광 블라인드가 설치되는 장소나 방향에 따른 발전량의 차이를 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식적용을 위한 DB 구축하기 위해, 미국공조냉동공학회(American Society of H

eating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE)에서 제공하는 2009 ASHR AE Handbook의 수식을 활용하여, 위치 및 시간에 따른 태양의 고도 및 방위각을 계산할 수 있으며, 계산된 태양의 위치로부터 수직을 이루는 블라인드의 슬랫 각도 및 방위각 또한 계산할 수 있다. 첫째, 태양의 고도는 편각, 위도, 시각을 사용하여 계산하였다 ([식 2-20], [그림 2-39] 참조). 태양의 중심과 지구의 중심을 연결하는 가상 선이 적도와 연결되는 각도인 기울기는 [식 2-21]을 사용하여 계산할 수 있으며, 시각은 [식 2-22]을 사용하여 계산할 수 있다. 둘째, 태양의 방위각은 태양의 경사, 태양의 고도, 시각을 사용하여 계산하였다 ([식 2-25] 참조). 이와 같이 계산된 태양의 고도와 방위각을 사용하면 태양광의 입사 방향에 수직인 블라인드 슬랫 각도와 방위각을 추정할 수 있다 ([식 2-26], [식 2-27] 참조).



[그림 2-40] 태양의 고도 및 방위각

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin\delta \cdot \sin\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\omega) \quad \text{(식 2-20)}$$

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360 \times (n+284)}{365}\right] \quad \text{(식 2-21)}$$

$$\omega = \left\{LST + \frac{ET}{60} + \frac{\phi - LSM}{15} - 12\right\} \times 15 \quad \text{(식 2-22)}$$

$$ET = 2.2918\,(0.0075 + 0.1868\cos(t) - 3.2077\sin(t) - 1.4615\cos(2t) - 4.089\sin(2t)) \quad \text{(식 2-23)}$$

$$t = 360 \times (n-1)/365 \quad \text{(식 2-24)}$$

$$h = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\dfrac{\cos\omega \cdot \cos\delta \cdot \sin\phi - \sin\delta \cdot \cos\phi)}{\cos\alpha}\right) & \text{if } \omega \geq 0 \\ -\cos^{-1}\left(\dfrac{\cos\omega \cdot \cos\delta \cdot \sin\phi - \sin\delta \cdot \cos\phi)}{\cos\alpha}\right) & \text{if } \omega < 0 \end{cases} \quad \text{(식 2-25)}$$

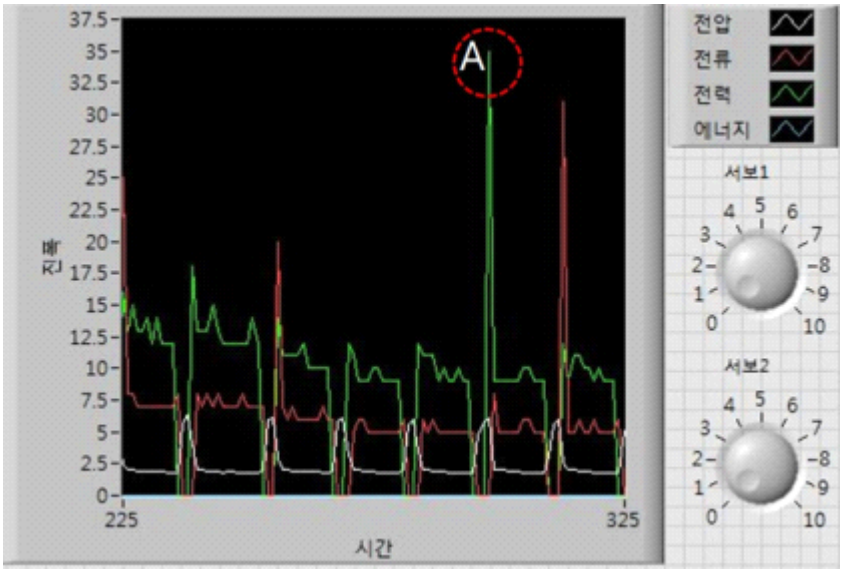
$$SoP = 90^\circ - \alpha \quad \text{----------(식 2-26)}$$

$$AoP = \begin{cases} h-180^\circ & \text{if} \quad -10^\circ \le h-180^\circ \le 10^\circ \\ 10^\circ & \text{if} \quad 10^\circ < h-180^\circ \\ -10^\circ & \text{if} \quad h-180 < 10^\circ \end{cases} \quad \text{----------(식 2-27)}$$

α : 태양의 고도
δ : 태양의 적위
ϕ : 위도
ω : 시각
n : 1년의 일수 (예 : 1월 1일 − 1, 7월 21일 − 202)
LST : 지방표준시
ET : 분단위의 균시차 (평균 태양시와 진태양시의 차이)
LSM : 지방표준시 정오의 경도
t : 하루의 각도 (시간)
h : 태양의 방위각
SoP : 패널의 기울기
AoP : 패널의 방위각

(나) 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발

본 연구에서는 태양광 발전량에 따라 블라인드 슬랫 각도를 조정하기 위하여, 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 개발하였다. 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식은 일사량 또는 발전량을 측정하여, 가장 많은 일사량 또는 가장 높은 발전량을 얻을 수 있도록 블라인드 슬랫의 각도를 조절하는 방식을 적용한다. 일사량을 기반으로 하는 양방향(2축) 태양광 추적 방식은 광센서를 이용하여 최대 일사량 데이터를 모니터링 및 평가하여, 추적방향을 결정한다. 발전량을 기반으로 하는 양방향(2축) 태양광 추적 방식은 태양광 블라인드로부터 실시간 전류 및 전압 등의 데이터를 모니터링 및 평가하여, 추적방향을 결정한다. 그러나, 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식은 센서나 시스템의 일시적인 오류에 의해, 추적의 오작동이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 본 연구에서는 실시간 태양광 발전량 모니터링을 통해 수집된 데이터(전류, 전압)를 기반으로 생산 전력을 계산하여, 발전량이 최대가 되는 위치로 블라인드 슬랫 각도를 조절하였다. 예를 들어, [그림 2-40]은 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식의 태양광 발전량 모니터링 결과를 보여주고 있다. A 시점은 다른 시점과 비교하여, 태양광 발전량이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서, 다음 추적 주기 (예를 들어, 1회 추미/10분)까지, A 시점의 슬랫 각도로 태양광 발전을 수행한다. 이렇게 함으로써, 최대 발전량을 얻을 수 있는 태양광 블라인드의 최적 슬랫 각도로 태양광 추적을 진행할 수 있다. 더불어, 본 연구에서는 양방향(2축) 추적 중, 상-하 추적을 위한 태양광 블라인드 슬랫 각도의 회전범위를 0° - 70°로 설계하였으며, 좌-우 추적을 위한 회전범위를 -10° - 10°로 설계하였다.

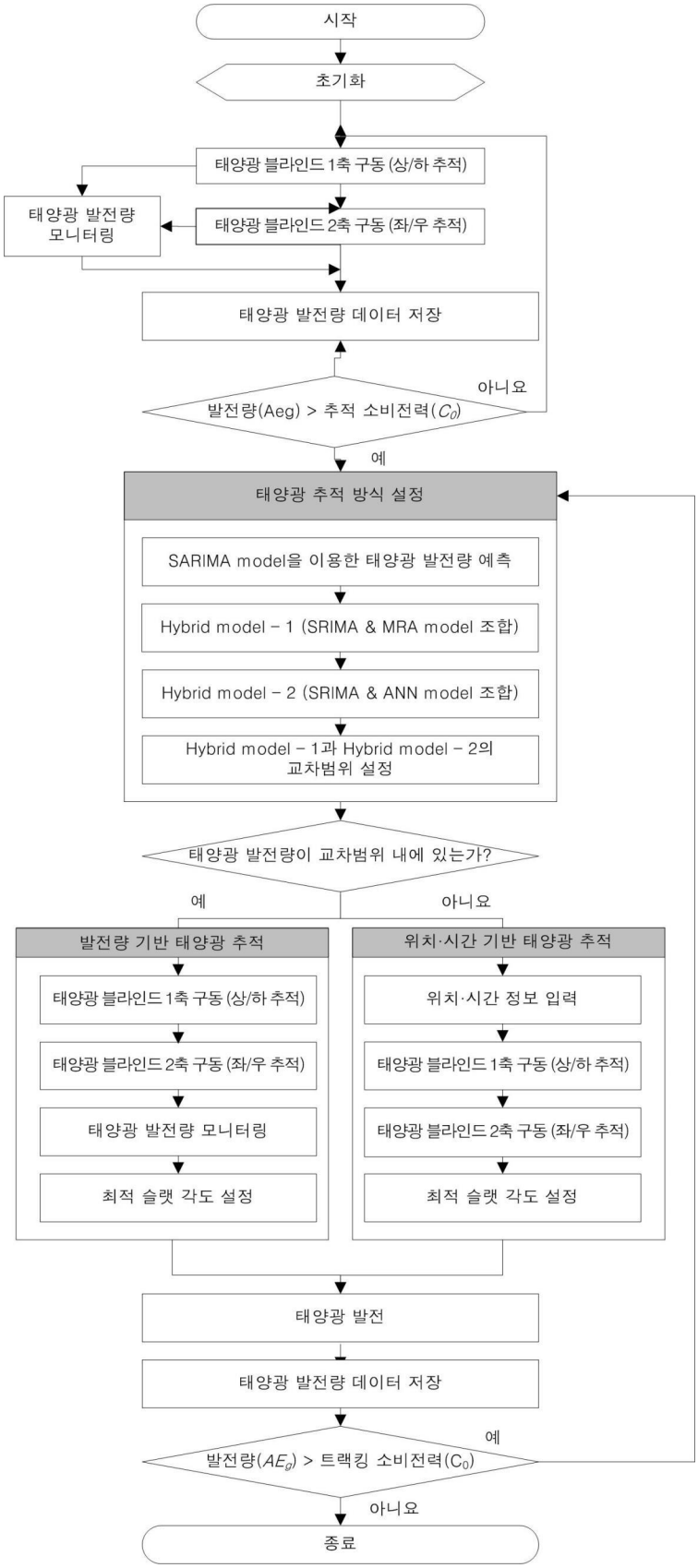


[그림 2-41] 실시간 태양광 발전량 모니터링 결과(예)

(다) 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발

기계학습을 이용한, 하이브리드(위치·시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘은 [그림 2-41]과 같다. 기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘은 크게 4단계로 구분할 수 있다. 첫째, SARIMA model을 개발하여, 과거 태양광 발전량을 기반으로, 미래시점의 태양광 발전량을 예측한다. 둘째, hybrid model-1(SARIMA model과 MRA model)은 SARIMA model의 예측 결과에 대한 MRA를 수행하고, 태양광 발전량을 예측한다. 셋째, hybrid model-2(SARIMA model과 ANN model)은 SARIMA model의 예측 결과를 기반으로 ANN을 수행하고, 태양광 발전량을 예측한다. 넷째, hybrid model-1 과 hybrid model-2의 예측결과를 이용하여, 태양광 발전량 교차 범위([그림 2-41]의 음영 부분 참조)를 설정한다.

태양광 발전량 교차범위는 다음과 같이 이용된다. 첫째, 실제 태양광 발전량이 교차범위 내에 있는 경우 ([그림 2-42]의 ①), 태양광 발전량 기반 태양광 추적이 제대로 이루어지고 있다고 판단하여, 추적 방식을 유지한다. 둘째, 실제 태양광 발전량이 교차범위 내에 없는 경우 ([그림 2-41]의 ②), 기상학적인 요인(구름 낀 날, 강우, 강설 등)과 시스템적인 요인(시스템 오류 등)으로 인하여, 태양광 발전량 기반의 태양광 추적이 제대로 이루어 지지 않는다고 판단한다. 이에 따라, 태양광 추적 방식은 태양광 발전량 기반의 태양광 추적 방식에서 위치 • 시간 기반의 태양광 추적 방식으로 변경한다.



[그림 2-42] 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘

(라) 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발

① 태양광 추적 장치 개발

본 연구진은 기후요소를 고려한 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 다음의 두 단계에 따라서 개발하였다: ㉮ 태양광 발전량에 영향을 미치는 기후요소 선정; ㉯ 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 태양광 추적 알고리즘 개발.

㉮ 태양광 발전량에 영향을 미치는 기후요소 선정

기후요소를 고려한 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘 개발을 위하여, 각 기후요소와 태양광 발전량간의 상관분석을 수행하여 태양광 발전량 생산에 영향을 미치는 기후요소를 선정하였다 ([표 2-42] 참조). 먼저, 기온은 태양광 추적 방식에 관계없이 모두 양의 상관관계로서, 유의확률은 0.01 수준에서 유의한 것으로 분석되었다(유의확률 (p-value)<0.01). 다음으로, 상대습도, 미세먼지 농도, 강수량 그리고 운량은 태양광 추적 방식에 관계없이 모두 음의 상관관계로서, 유의확률은 0.01 수준에서 유의한 것으로 분석되었다(유의확률 (p-value)<0.01). 결과적으로, 5가지 기후요소(기온, 상대습도, 미세먼지 농도, 감수량, 운량) 모두 태양광 발전량에 영향을 미치는 요소로 분석되었기 때문에, 기후요소를 고려한 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 개발을 위한 의사결정나무분석(DT)의 변수로서 활용될 수 있다.

[표 2-42] 기후요소와 태양광 발전량간의 상관관계 분석 결과

변수		위치 • 시간 기반의 추적 방식을 적용하여 생산된 발전량 (Wh)	태양광 발전량 기반의 추적 방식을 적용하여 생산된 발전량 (Wh)
기온(°C)	상관계수	0.176**	0.076**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000
상대습도(%)	상관계수	-0.242**	-0.293**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000
미세먼지 농도($\mu g/m^3$)	상관계수	-0.119**	-0.171**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000
강수량(mm)	상관계수	-0.177**	-0.233**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000
운량(%)	상관계수	-0.318**	-0.434**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000

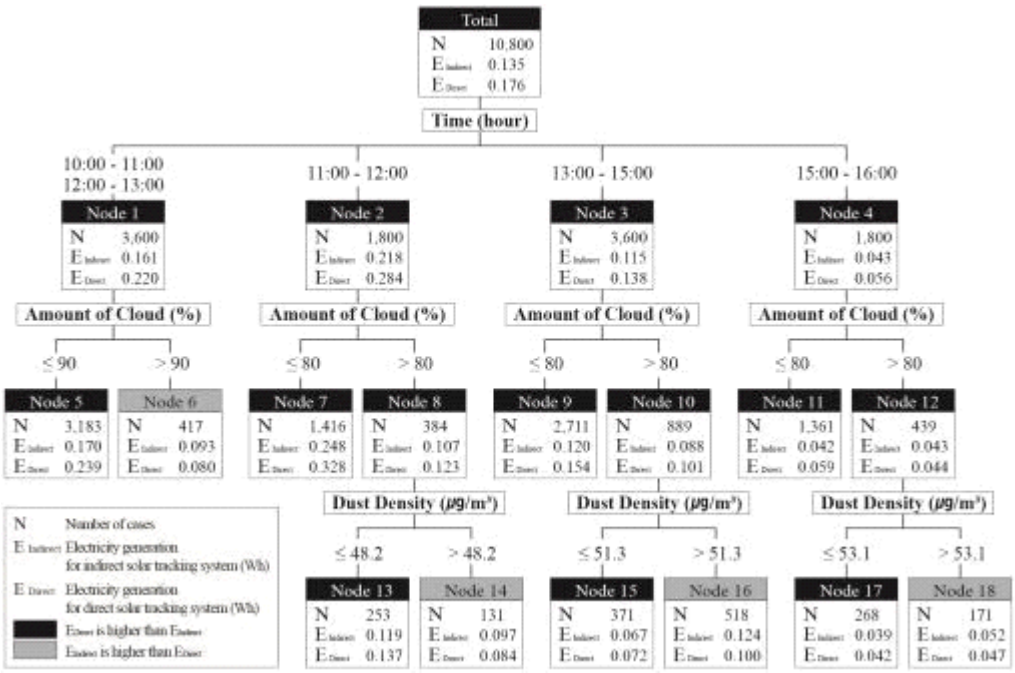
** 상관계수가 0.01 수준에서 유의함(양쪽)

㉯ 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 태양광 추적 알고리즘 개발.

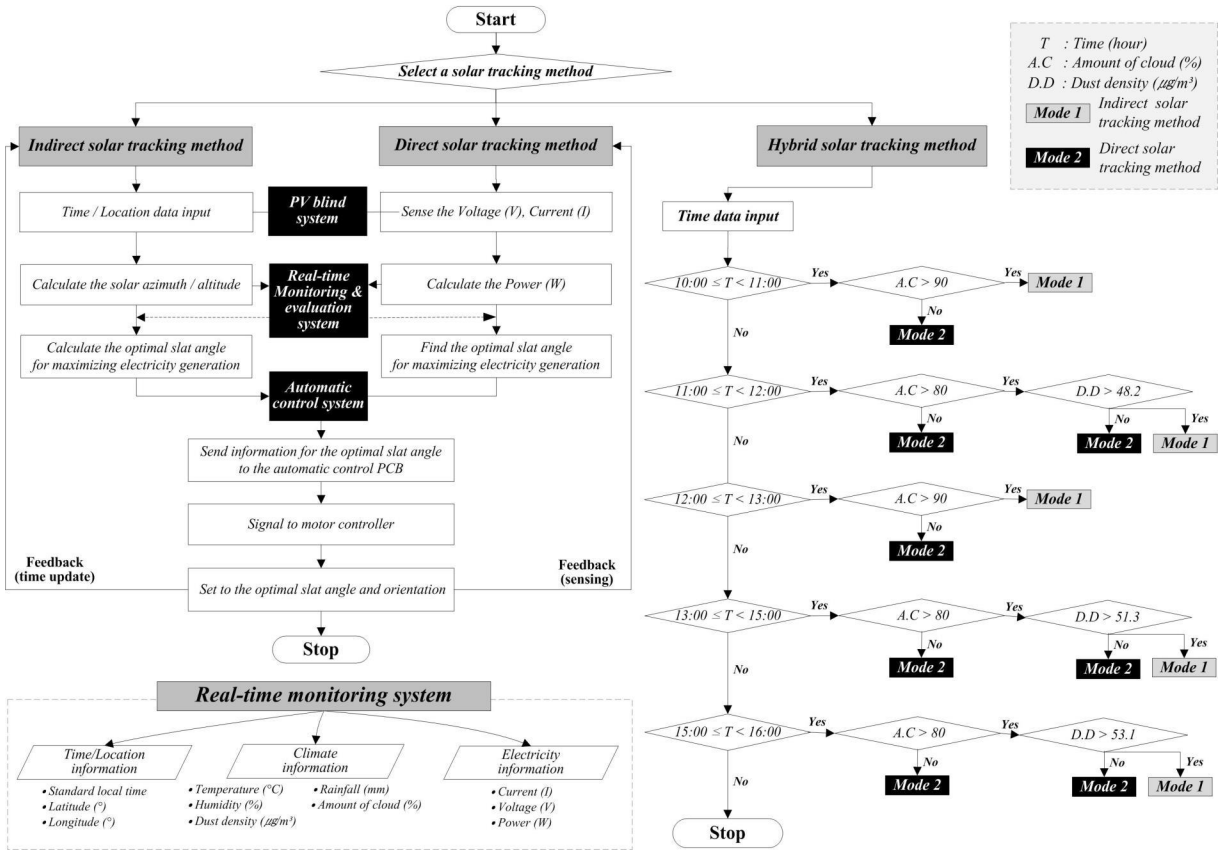
수집된 총 10,800개의 태양광 발전량 데이터는 6가지의 독립변수(기온, 상대습도, 미세먼지 농도, 강수량, 운량, 시간)를 활용하여 의사결정나무분석(DT)을 수행하였다. 그 결과, 3가지

변수(시간, 운량, 미세먼지 농도)에 따라 18개의 그룹으로 분류되었다 ([그림 2-41] 참조).

첫째, 전체 데이터는 시간에 따라 4개의 그룹(Node 1 ~ Node 4)으로 분류되었다. Node 2(11:00 ~ 12:00)는 일반적으로 일사량이 가장 높은 시간대로 생산된 태양광 발전량이 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한, Node 4(15:00~16:00)는 태양이 서쪽으로 기울어져 있는 시간으로, 태양광 블라인드 제품 프레임으로 인한 그림자가 발생하여 다른 시간대보다 태양광 발전량이 비교적 낮게 생산되었다. 둘째, 시간에 따라 분류된 Node 1 ~ Node 4는 시간대별로 각각 산정된 운량기준에 따라 각 2개씩, 총 8개의 그룹(Node 5 ~ Node 12)으로 분류되었다. 각 그룹을 분류하는 운량 기준은 Node 1의 경우에는 90%, Node 2, 3, 4의 경우에는 80%로 나타났다. 비교적 운량이 적은 Node 5, 7, 9, 11의 경우에는 태양광 발전량 기반의 태양광 추적 방식의 발전량 생산 효율이 더 높았다. 반대로, 비교적 운량이 많은 Node 6의 경우에는 위치•시간 기반의 태양광 추적 방식의 발전량 생산 효율이 더 높았다. 셋째, 운량에 따라 분류된 8개의 그룹 중 Node 8, 10, 12는 미세먼지 농도에 따라 각각 2개씩, 총 6개의 그룹(Node 13 – Node 18)으로 분류되었다. 그룹을 분류하는 미세먼지 농도 기준은 Node 8의 경우에는 48.2$\mu g/m^3$, Node 10의 경우에는 51.3$\mu g/m^3$, 그리고 Node 12의 경우에는 53.1$\mu g/m^3$으로 나타났다. 그룹을 분류하는 미세먼지 농도기준보다 이하인 Node 13, 15, 17은 태양광 발전량 기반의 태양광 추적 방식으로 생산한 발전량이 위치·시간 기반의 태양광 추적 방식으로 생산한 발전량 보다 더 높았다. 그러나 그룹을 분류하는 미세먼지 농도기준을 초과하는 Node 14, 16, 18은 위치·시간 기반의 태양광 추적 방식을 적용한 발전량이 더 높은 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 의사결정나무분석(DT) 결과를 토대로, 시간과 운량, 그리고 미세먼지 농도 기준을 태양광 추적 방식을 선정하는 기준 값으로 활용하여, 기후요소 별로 나누어진 그룹의 발전량 생산 효율이 더 높은 태양광 추적 시스템을 선정하도록 하였다 ([그림 2-43] 참조). [그림 2-44]은 개발된 기후요소를 고려한 하이브리드(위치•시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 포함한 3가지 태양광 추적 시스템을 통합한 알고리즘을 보여주고 있다.



[그림 2-43] 의사결정나무 분석 결과



[그림 2-44] 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘

(3) 단위성과 3-2-① 기계학습을 이용한 환기 자동제어 알고리즘 개발

(가) 건물 유형/사용자 특성별 환기 특성/환기량/실내 및 온·습도 분석

본 연구에서는 건물 유형별/사용자 특성별 환기 특성/환기량/실내 온·습도 분석을 위해, 홍콩에 위치한 'A'사무실 건물의 2개 실을 대상으로 실시간 환경 모니터링을 수행하였다. 자세한 실험 조건(실험 기간, 분석 대상, 대상 실의 특성 등)은 다음과 같다. 먼저, 총 2달간(2017.07.30.~2017.09.30.) 'Awair' 환경센서를 활용하여, 온·습도, 이산화탄소(CO_2) 농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs), 미세먼지에 대한 실시간 데이터 수집을 진행하였다 ([표 2-43] 참조). 또한, 'A' 건물의 경우, 대부분의 직원들이 오전 9시부터 오후 5시까지 규칙적으로 근무하지만, 본 연구에서는 불규칙적으로 점유되는 실에서 실시간 데이터를 기반으로 HVAC(Heating, ventilation, air conditioning) 시스템을 제어함으로써 실내공기질의 개선 가능성을 분석하는 것을 목적으로 하였기 때문에, 일반적으로 직원들이 상주하는 사무실이 아닌, 2개의 회의실(소회의실, 대회의실)을 실험 장소로 선정하였다. 'A' 건물은 HVAC 시스템이 일괄적으로 오전 7시부터 오후 11시까지 중앙에서 제어되지만, 각 실별로 제어패널이 있기 때문에 실별 제어 또한 가능하다. 더불어, 실험 장소로 선정한 회의실은 외기가 면하는 창문이 없기 때문에 실내 환경(실내

공기질 및 온·습도) 제어를 위해서는 HVAC 시스템을 가동해야만 하는 특성이 있다. 또한 홍콩은 아열대 기후에 속하기 때문에 'A' 건물에 적용된 HVAC 시스템은 일반적으로 운용되는 냉·난방 듀얼모드가 아닌 냉방 단일 모드로 운용되며, 강약제어를 통해 환기량 변화가 가능하다.

[표 2-43] 실내 공기질 측정을 위한 센서의 특성

센서	수집 주기	다운로드 간격	지표	측정범위	측정 정확도
환경 센서 (Awair)	1분	15분	온도	5~60℃	±0.2℃
			습도	20~80%	±2%
			이산화탄소(CO_2)	400~5000ppm	±75ppm
			총휘발성유기화합물 (TVOCs)	측정항목마다 상이	
			미세먼지	N/A	N/A

본 연구에서는 'Awair' 환경 센서를 활용한 실시간 실내 환경 모니터링을 통해, 건물 유형별/사용자 특성별 실내 환경 분석을 다음의 두 지표를 활용하여 진행하였다: ① 이산화탄소(CO_2) 농도 권고 기준 초과 빈도(ER, Exceeding rate); ② 이산화탄소(CO_2) 농도가 권고 기준(1000ppm)을 초과할 경우들 중 가장 높은 이산화탄소(CO_2) 농도(MORCO_2, the maximum over-standard rate of CO_2). 이 두 지표는 아래의 [식 2-28]과 [식 2-29]로 설명가능하다. 이산화탄소(CO_2)의 경우, 실내에서 농도가 높아지면 재실자의 신체적 불편함(두통, 피로, 눈 또는 목의 염증 등)과 정신적 스트레스(낮은 작업효율 등)을 야기할 수 있기 때문에, 'Awair' 환경 센서를 통해 수집한 다양한 오염물질(총휘발성유기화합물(TVOCs), 미세먼지 등)들 중 우선적으로 고려하였다.

$$ER = \frac{NOM_{exceeding}}{NOM} \quad \text{----------(식 2-28)}$$

$$MOR = \frac{MOS_{CO_2} - 1000}{1000} \times 100 \quad \text{----------(식 2-29)}$$

ER: 이산화탄소 농도가 권고 기준을 초과하는 빈도
$NOM_{exceeding}$: 이산화탄소 농도가 권고기준을 초과했을 때, 회의가 진행되고 있었던 경우의 수

(나) 기계학습을 이용한, 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 알고리즘 개발

본 연구진은 홍콩에 위치한 'A' 건물의 두 회의실(소회의실, 대회의실)을 대상으로 실내 환경에 대한 실시간 모니터링을 진행하였으며, 이를 토대로 다음의 두 단계에 걸쳐 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 알고리즘을 개발하였다: Ⅰ) 건물 유형 및 사용자 특성에 따른 실내 환경 특성 분석; Ⅱ) 환기 자동제어 알고리즘 개발.

[표 2-44]와 [표 2-45]는 본 연구진이 선정한 두 회의실(소회의실, 대회의실)을 대상으로 수집한 실시간 이산화탄소(CO_2) 농도 데이터를 기반으로, 이산화탄소 농도(CO_2)의 권고기준(100

0ppm)을 초과한 시점들의 데이터를 분석한 결과이다. 그 결과를 살펴보면, 먼저 회의 중 이산화탄소(CO_2) 권고 기준 초과 빈도(ER)는 소회의실과 대회의실에서 각각 14.75%와 31.68%로 나타났다. 두 번째로, 회의 중 이산화탄소(CO_2) 권고기준 초과 정도($MORCO_2$)는 소회의실에서는 2.10 - 64.31%의 범위, 대회의실에서는 1.78 - 213.87%의 범위에서 나타났다. 결과를 종합해보면, 직원이 불규칙적으로 재실하는 회의실에서 회의를 진행할 경우, 이산화탄소(CO_2)는 서서히 증가하며, HVAC 시스템이 적절히 작동하지 않을 때에는 권고기준을 초과하는 경우가 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구진은 위 결과를 토대로, 실내 오염 물질(CO_2)을 적정수준으로 유지할 수 있는 HVAC 시스템의 제어 알고리즘을 개발하고자 하였다.

① 환기 자동제어 알고리즘 개발.

본 연구진이 실내 이산화탄소(CO_2) 농도를 적정 수준으로 유지하고, 적절히 HVAC 시스템을 가동하기 위해 수립한 알고리즘은 [그림 2-46]과 같다. 이 알고리즘은 본 연구진이 개발 중인 다기능 스마트 창호 제품의 환기 제어를 위해 적용 가능하며, 다음의 4단계로 구성되어 있다: ㉮ 데이터 수집; ㉯ 회의 진행 및 HVAC 시스템의 가동여부 확인; ㉰ 권고기준(1000ppm)을 토대로, 실내 이산화탄소(CO_2) 농도 초과 여부 확인; ㉱ 환기 제어.

㉮ 데이터 수집: 실내 온도(T(i)) 및 이산화탄소(CO_2(i)) 농도는 실시간 환경 센서를 통해 일정한 간격(1분)으로 수집 및 저장되며, 환기량(V(i))은 HVAC 시스템의 제어 패널에서 확인 가능하다. 여기서 i는 데이터 수집 주기를 의미한다.

㉯ 회의 진행 및 HVAC 시스템의 가동여부 확인: 이산화탄소(CO_2)의 농도와 실내 온도를 토대로 회의 진행 및 HVAC 시스템의 작동 여부를 판단할 수 있다. 먼저, 회의 진행여부는 CO_2(i)가 CO_2(i-1)보다 높고, 이 양상이 10분 이상 지속될 경우 회의가 진행되고 있다고 판단할 수 있다. 또한, HVAC 시스템 가동여부의 경우, T(온도)(i)가 T(온도)(i-1)보다 낮은 양상이 10분 이상 지속되거나, 실내온도가 20±2℃의 범위에서 10분 이상 유지될 경우에, HVAC 시스템이 작동하고 있는 것으로 판단 가능하다.

㉰ 권고기준(1000ppm)을 토대로, 실내 이산화탄소(CO_2) 농도 초과 여부 확인: i번째 수집된 실내 이산화탄소 농도 (CO_2(i)) 데이터는 권고기준을 토대로 비교되며, 이를 초과하는 경우 재실자의 건강을 위해 환기량 (V(i))을 증가시킬 필요가 있는 것으로 판단한다.

㉱ 환기 제어: 이전 단계에서 환기량을 증가시킬 필요가 있는 것으로 판단된 경우, HVAC 시스템의 최대용량과 필요한 환기량을 판단하여 환기제어를 진행한다. 즉, HVAC 시스템의 최대용량보다 작은 양으로 실내 이산화탄소(CO_2) 농도를 권고기준(1000ppm) 이하로 유지할 수 있는 경우에는, HVAC 시스템 구동을 통해 반복적으로 환기를 실시하여, 실내 이산화탄소(CO_2) 농도를 낮추는 방향으로 조정한다. 그러나 HVAC 시스템의 최대 용량을 넘어선 환기량이 필요한 경우, 재실자에게 알람을 주어 현재의 실내 환경(이산화탄소(CO_2) 농도)을 개선할 수 있도록 유도한다.

[표 2-44] 기본분석(소회의실): 회의 중, 권고 기준을 초과하는 이산화탄소(CO_2) 농도의 분석

날짜	회의 시간	회의 중, CO_2 농도의 권고기준인 1,000ppm 초과 여부	권고기준(1000ppm)을 넘을 때의 CO_2 농도 (MOS_{CO2}) (ppm)	권고기준(1000ppm)의 초과 정도 (MOR_{CO2})(%)
7월 31일	9:30-12:15	No	-	-
	12:45-13:15	No	-	-
	14:30-15:30	No	-	-
8월 1일	8:00-12:00	No	-	-
	14:45-16:00	No	-	-
8월 2일	8:00-11:15	No	-	-
	11:45-15:00	No	-	-
	16:30-17:15	No	-	-
8월 3일	8:00-11:15	No	-	-
	13:30-16:30	No	-	-
8월 4일	8:00-11:30	No	-	-
	16:45-18:15	No	-	-
8월 7일	8:00-10:30	No	-	-
	14:15-17:00	No	-	-
8월 8일	8:00-12:00	No	-	-
	14:00-18:15	No	-	-
8월 9일	8:00-11:15	No	-	-
	13:45-16:15	No	-	-
8월 10일	8:00-12:30	No	-	-
	14:00-17:45	No	-	-
	19:00-20:30	No	-	-
8월 11일	8:00-10:30	Yes	1020.97	2.10
	14:15-14:45	No	-	-
8월 14일	10:00-10:45	No	-	-
	13:30-16:45	No	-	-
8월 15일	8:00-10:45	No	-	-
	11:45-12:45	No	-	-
	14:45-16:30	No	-	-
8월 16일	8:00-11:00	No	-	-
	15:00-17:30	No	-	-
	19:00-19:30	No	-	-
8월 21일	8:15-11:15	Yes	1127.65	12.77
	14:45-15:30	Yes	1041.09	4.11
8월 22일	14:30-15:15	No	-	-
	16:00-16:45	No	-	-
8월 25일	9:15-9:45	No	-	-
	10:30-12:30	No	-	-
	14:00-15:00	No	-	-
	15:45-16:30	No	-	-
	17:15-18:15	No	-	-
8월 28일	8:00-9:30	No	-	-
	10:00-11:15	No	-	-
	13:45-14:45	No	-	-
	15:30-16:00	No	-	-
8월 29일	8:00-11:15	No	-	-
	14:00-14:45	No	-	-
	15:15-17:30	No	-	-
8월 30일	8:00-10:45	No	-	-
	11:30-13:00	No	-	-
	14:15-16:45	No	-	-
8월 31일	9:00-12:30	No	-	-
	14:15-15:30	Yes	1052.98	5.30
	16:15-18:15	Yes	1373.78	37.38
	20:00-20:30	Yes	1202.89	20.29
9월 1일	15:30-17:15	Yes	1643.08	64.31
9월 4일	14:45-17:15	Yes	1201.58	20.16

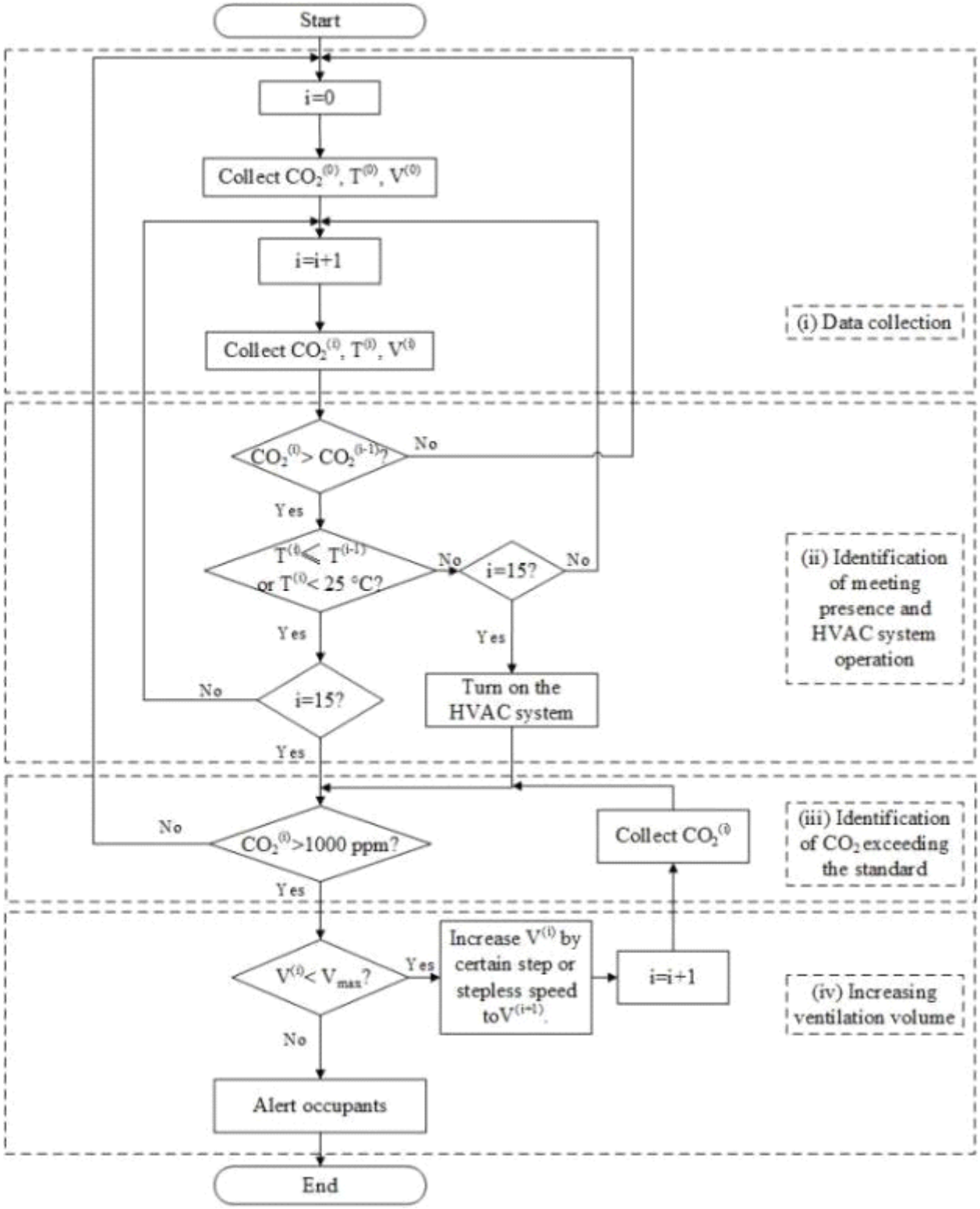
9월 8일	10:15-12:15	No	-	-
	14:30-15:15	No	-	-
9월 26일	14:45-15:45	Yes	1194.93	19.49
9월 27일	10:00-10:30	No	-	-
	11:00-12:00	No	-	-
총 회의 횟수(NOM_{total})		61		
회의 중 CO_2 권고 기준 초과 횟수($NOM_{exceeding}$)		9		
회의 중 CO_2 권고 기준 초과 빈도(ER) (%)		14.75		

[표 2-45] 기본분석(대회의실): 회의 중, 권고 기준을 초과하는 이산화탄소(CO_2) 농도의 분석

날짜	회의 시간	회의 중, CO_2 농도의 권고기준인 1,000ppm 초과 여부	권고기준(1000ppm)을 넘을 때의 CO_2 농도 (MOS_{CO2}) (ppm)	권고기준(1000ppm)의 초과 정도 (MOR_{CO2})(%)
7월 31일	8:45-9:30	No	-	-
	11:00-13:00	No	-	-
	14:15-16:15	No	-	-
8월 1일	8:30-10:15	Yes	1185.98	18.60
	11:45-12:30	No	-	-
	14:30-16:30	No	-	-
8월 2일	8:00-10:15	No	-	-
8월 3일	9:30-11:00	No	-	-
	13:30-15:00	No	-	-
8월 4일	8:00-10:30	Yes	1193.98	19.40
8월 7일	8:00-11:30	No	-	-
8월 8일	8:00-11:45	No	-	-
	14:30-17:00	No	-	-
8월 9일	8:00-11:30	No	-	-
	12:15-13:00	No	-	-
8월 10일	8:45-11:15	Yes	1196.08	19.61
	11:30-12:15	Yes	1171.28	17.13
8월 11일	8:00-10:15	Yes	1100.97	10.10
	14:00-15:00	No	-	-
	17:00-17:45	Yes	1163.80	16.38
	20:00-20:45	No	-	-
8월 14일	8:00-13:00	No	-	-
	14:00-15:15	Yes	1339.04	33.90
	16:00-17:30	Yes	1185.91	18.59
8월 15일	9:30-10:30	Yes	1136.58	13.66
	13:45-14:45	No	-	-
	15:45-16:15	No	-	-
	18:15-20:15	Yes	1166.02	16.60
8월 16일	8:00-11:15	No	-	-
	14:15-15:00	Yes	1036.94	3.69
8월 17일	8:00-12:00	Yes	1367.93	36.79
	14:15-15:45	No	-	-
	17:45-18:45	No	-	-
8월 18일	8:00-11:45	No	-	-
	13:30-16:45	Yes	2194.46	119.45
8월 21일	8:00-12:00	No	-	-

	14:00-16:30	No	-	-
	17:00-17:45	No	-	-
8월 22일	8:00-10:30	No	-	-
	11:00-12:30	No	-	-
	14:15-16:15	No	-	-
	16:45-18:15	No	-	-
8월 24일	8:45-11:15	No	-	-
	13:45-17:15	No	-	-
8월 25일	9:00-12:45	Yes	1128.63	12.86
	14:15-15:15	No	-	-
	16:00-17:00	No	-	-
	18:00-18:45	No	-	-
8월 28일	8:15-11:15	No	-	-
	14:15-17:15	No	-	-
8월 29일	7:45-9:15	No	-	-
	14:30-17:15	No	-	-
8월 30일	12:00-13:30	Yes	1130.18	13.02
	14:15-14:45	Yes	1131.37	13.14
	16:30-17:30	No	-	-
9월 1일	9:30-10:30	No	-	-
9월 4일	9:00-10:00	No	-	-
	12:30-13:45	No	-	-
	15:00-15:45	No	-	-
	16:45-17:45	No	-	-
9월 5일	8:15-11:00	No	-	-
	11:30-12:00	No	-	-
	14:00-15:00	No	-	-
	16:45-17:15	No	-	-
9월 6일	8:30-10:15	No	-	-
	11:00-11:45	No	-	-
	14:15-15:30	Yes	1102.13	10.21
9월 7일	8:15-10:30	Yes	1306.57	30.66
	14:15-15:45	No	-	-
	17:00-19:15	Yes	1247.93	24.79
9월 8일	9:30-11:45	Yes	1881.74	88.17
	14:15-17:15	No	-	-
9월 11일	12:45-13:45	Yes	2785.96	178.60
9월 12일	15:15-18:15	Yes	2181.23	118.12
9월 13일	9:45-10:30	No	-	-
9월 14일	14:00-16:00	Yes	1902.02	90.20
	18:15-21:00	Yes	3138.72	213.87
9월 15일	9:45-10:45	No	-	-
	12:30-13:00	No	-	-
	13:45-15:45	No	-	-
9월 18일	9:15-9:45	Yes	1155.12	15.51
	11:30-12:15	No	-	-
	15:30-16:30	Yes	1192.10	19.21

9월 19일	8:15-10:45	No	-	-
	11:15-12:00	No	-	-
9월 20일	16:30-17:15	No	-	-
	18:00-19:45	Yes	1689.17	68.92
9월 21일	9:30-11:30	Yes	1017.75	1.78
	15:30-18:00	Yes	1186.52	18.65
9월 22일	9:30-10:30	Yes	1375.19	37.52
	15:45-18:00	Yes	1429.99	43.00
9월 25일	9:00-12:00	No	-	-
	14:00-16:00	No	-	-
	17:15-17:45	No	-	-
9월 26일	9:15-13:00	No	-	-
	14:15-16:00	No	-	-
	17:00-17:30	No	-	-
9월 27일	9:15-12:15	No	-	-
	14:15-15:30	Yes	1044.61	4.46
	17:00-17:30	No	-	-
9월 28일	10:30-11:15	NO	-	-
총 회의 횟수(NOM_{total})		101		
회의 중 CO_2 권고 기준 초과 횟수($NOM_{exceeding}$)		32		
회의 중 CO_2 권고 기준 초과 빈도(ER)(%)		31.68		



[그림 2-46] HVAC 시스템의 환기량 증가를 위한 자동제어 알고리즘

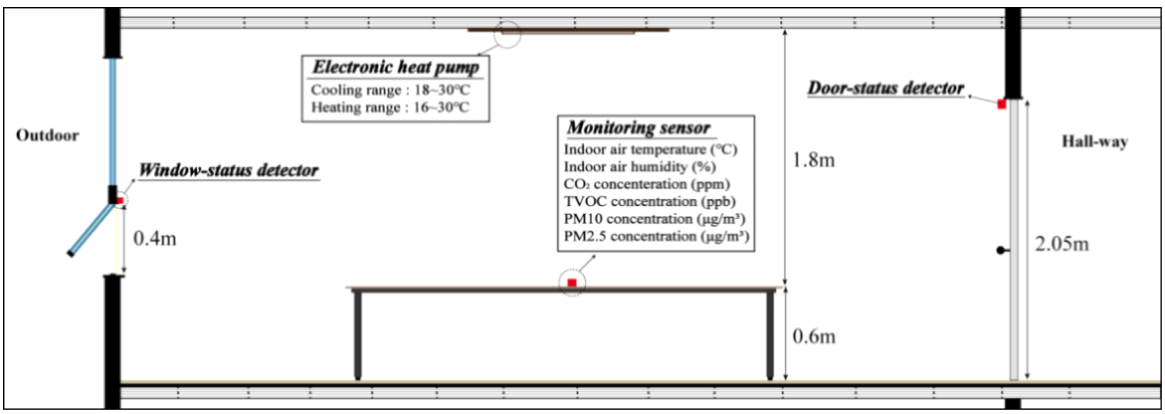
(다) 환기 방식에 따른 실내 공기질 및 온·습도 분석

① 환기 방식에 따른 실내 공기질 및 온·습도 특성 분석

본 연구진은 환기자동제어 기술을 위해, 재실자의 환기 행동을 고려하여 환기 방식에 따른 실내 환경(실내 공기질 및 온·습도)에 대한 분석을 진행하였다. 이를 위해, 실시간 실내 환경 모니터링 센서를 기반으로, 재실자의 환기 시작 시점과 종료 시점의 실내 환경 데이터를 분석하였으며 이는 다음의 두 단계에 따라 진행하였다: ㉮ 실험 설계; ㉯ 탐색적 데이터 분석

㉮ 실험 설계

재실자의 환기 행동에 따른 실내 환경 특성 분석을 위해, 동일한 규모(11.8m^2)의 2개의 사무실을 대상으로 총 50일(2018.01.22.~2018.03.13.)간의 실험을 진행하였다. 자세한 실험 환경 정보는 아래의 [표 2-46]과 같다. 또한, 본 연구에서는 재실자의 환기 방식에 따른 실내 환경 특성을 분석하기 위해, 재실자의 건강에 영향을 미칠 수 있는 실내 공기질 요소(이산화탄소(CO_2) 농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs) 농도, 미세먼지(PM10) 농도, 초미세먼지(PM2.5) 농도와 재실자의 열적 쾌적성에 영향을 미칠 수 있는 온도와 습도를 모니터링하기로 결정하였다. 더불어, 사무실의 여닫이창과 출입문에 문 열림 감지센서를 설치하여, 환기 여부를 판단하고자 하였다 [그림 2-46].



[그림 2-47] 실험실 단면

[표 2-46] 실험 정보

구분	상세 내용
실험 기간	총 50일 (2018.01.22. ~ 2018.03.13.)
재실자 수	2개의 사무실에 각각 7명, 5명씩 재실
공조 형태	천장형 에어컨 (Electronic heat pump)
환기 형태	2개의 사무실에 각각 하나의 출입문과 4개의 여닫이창을 통해 환기
실내 환경 센서 설치 위치	각 실의 중앙부, 지면으로부터 0.6m 떨어진 위치

㉰ 탐색적 데이터 분석

본 연구진은 환기 방식에 따른 실내 공기질 및 온·습도 특성을 분석하기 위해, 재실자가 환기를 시작하고 종료하는 시점의 실내 환경 데이터를 수집하였다. 또한, 수집한 데이터를 기반으로 탐색적 데이터 분석을 다음의 세 단계에 걸쳐 진행하였다: Ⅰ)상자도표 분석; Ⅱ) 피어슨 상관 분석; Ⅲ) 단일변수 로지스틱회귀분석. 먼저, 상자도표는 서로 다른 종류의 명목변수 데이터 범위를 비교할 수 있도록 시각화한 2차원 그래프를 의미한다. 두 번째로, 피어슨 상관 분석은 두 변수간의 관련성을 구하기 위해 보편적으로 이용되는 방법으로, 상관계수(ρ)가 $0<\rho\leq1$ 이면 양의 상관관계, $-1\leq\rho<0$ 이면 음의 상관관계, $\rho=0$이면 상관관계가 없다고 판단할 수 있다. 또한 상관계수 ρ의 절댓값이 커질수록 강한 상관관계를, 작을수록 상대적으로 약한 상관관계를 가진다고 볼 수 있다. 마지막으로 6가지의 실내환경변수와 재실자의 환기 행동을 대상으로 단일변수 로지스틱회귀분석을 수행하였다.

Ⅰ) 상자도표분석

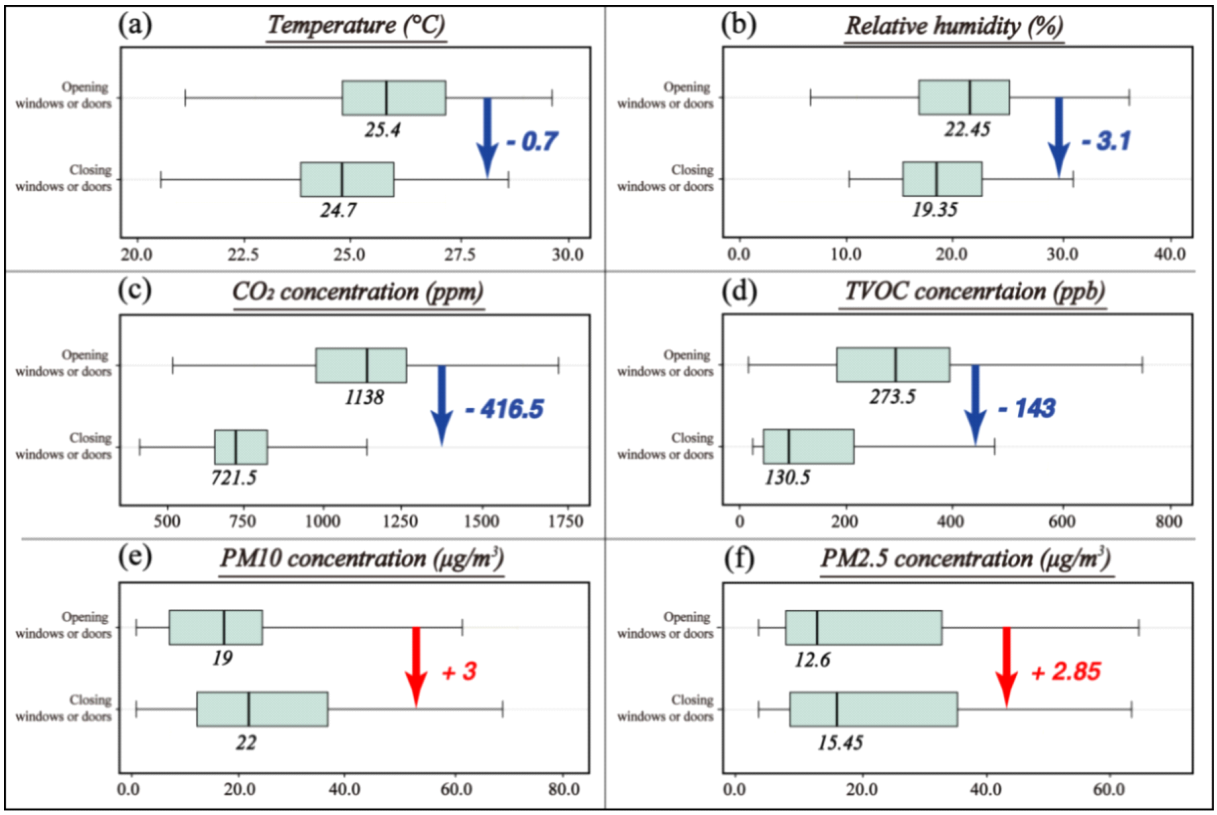
50일간의 모니터링기간동안, 문을 여는 행위 152회, 문을 닫는행위 152회로 총 304회의 재실자 환기행동이 모니터링되었다. [그림 2-48]은 실시간 모니터링 데이터를 상자도표로 보여준다. 이를 통해, 재실자의 환기행동의 특징을 이해할 수 있다. 재실자가 문을 엶에 따라, 실내공간의 온도, 상대습도, 이산화탄소(CO_2)농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도는 감소하였으나 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)농도는 오히려 감소하였다. 상자도표의 중앙값을 볼 때, 실내온도는 25.4℃에서 24.7℃로 0.7℃만큼, 상대습도는 22.45%에서 19.35%로 3.1%만큼 감소하였다. 또한 이산화탄소(CO_2)농도는 1138ppm에서 721.5ppm으로 416.5ppm만큼, 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도는 273.5ppb에서 130.5ppb로 143ppb만큼 감소하였다 ([그림 2-48]의 (a)-(d) 참조). 반대로 미세먼지(PM10)농도는 19$\mu g/m^3$에서 22$\mu g/m^3$로 3$\mu g/m^3$만큼, 초미세먼지(PM2.5)농도는 12.6$\mu g/m^3$에서 15.45$\mu g/m^3$로 2.85$\mu g/m^3$만큼 증가했다 ([그림 2-48]의 (e), (f) 참조).

Ⅱ) 피어슨상관분석

재실자의 환기행동과 각각의 실내 환경 요소들 간의 관계를 피어슨 상관 분석을 통해 도출한 결과, 이산화탄소(CO2) 농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs) 농도, 실내 습도, 실내 온도 순으로 양의 상관관계가 높게 나타났고, 초미세먼지(PM2.5) 농도는 낮은 수준의 음의 상관관계를 나타냈고 미세먼지(PM10) 농도는 통계적으로 유의하지 않았다 ([표 2-47] 참조).

Ⅲ) 단일변수 로지스틱 회귀분석

[그림 2-49]의 시그모이드 커브는 실내환경변수의 변화에 따른 환기를 시작할 확률을 나타낸다. 실내환경변수의 수치가 변함에 따라서 확률이 변하게 되는데, 시그모이드 커브의 기울기가 클수록 환기행동에 있어서 중요한 변수라 할 수 있다. 실내온도, 실내습도, 이산화탄소(CO_2)농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도는 수치가 높아질수록 확률이 커지고 반대로 미세먼지(PM10)농도, 초미세먼지(PM2.5)농도는 확률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

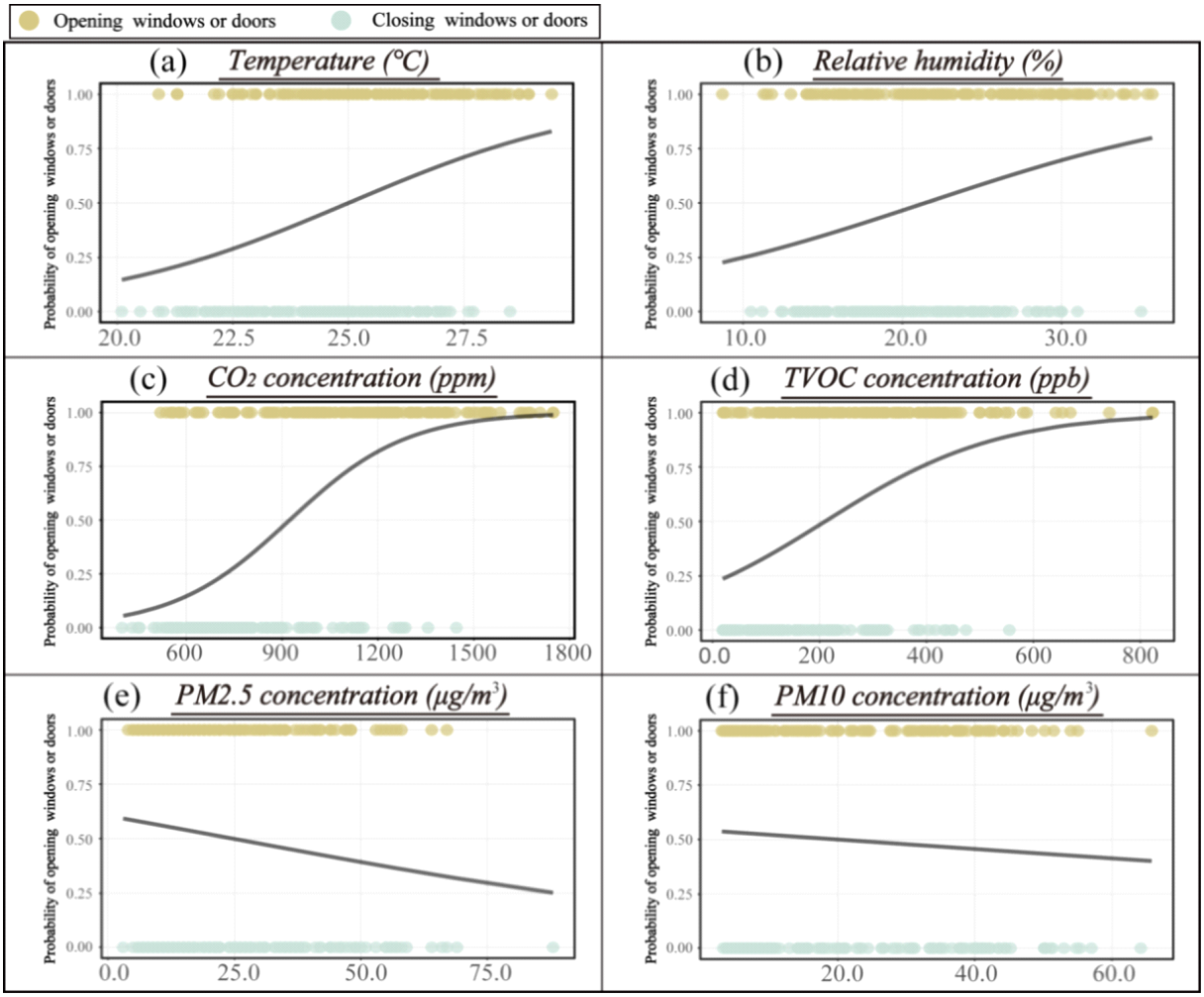


[그림 2-48] 실시간 모니터링 데이터의 상자도표

[표 2-47] 피어슨 상관분석

구분	온도	습도	이산화탄소 농도	총휘발성유기화합물 농도	미세먼지 농도	초미세먼지 농도
환기 행동	0.288**	0.301**	0.521**	0.405**	-0.126	-0.179**

비고:**상관계수는 0.01수준에서 유의함 (양측검정)



[그림 2-49] 단일변수 로지스틱 회귀분석

(라) 기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 환기 자동제어 알고리즘 개발

본 연구진은 재실자의 환기 시작 및 종료 시점의 실내 환경 데이터를 수집하여, 통계적 기법을 기반으로 창호형 환기 시스템의 제어 알고리즘을 개발하고자 한다. 본 연구에서 창호형 환기 시스템의 제어 알고리즘은 다음의 3단계에 따라 진행되었다: ① 로지스틱(Logistic) 회귀분석; ② 설명변수 선택; ③ ROC (Receiver Operation Characteristic) 곡선을 이용한 모델 선정; ④ Yonden's index를 이용한 최적기준점 결정.

① 로지스틱 회귀분석

일반적으로 로지스틱 회귀분석은 반응변수가 이항형인 문제(유효한 범주의 개수가 두 개인 경우)를 지칭할 때 사용되는 방법론으로, 본 연구진이 수집한 데이터의 경우, 재실자의

환기 행동에 따라, 이분형 데이터(환기 시작 ='1', 환기 종료 ='0')로 치환이 가능하기 때문에, 각각의 설명변수에 대해 로지스틱 회귀분석을 적용할 수 있다. 로지스틱회귀분석의 식은 다음과 같다.

$$P(Y=1|X_i) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k)} \text{ ----------(식 2-30)}$$

$$L(\beta_0, \beta_1 ..., \beta_k) = \prod_{i:y_{i=1}} P(X_i) \prod_{i:y_{i=0}} (1 - P(X_i)) \text{ ----------(식 2-31)}$$

$X_i = (x_1, x_2, ..., x_k)$: 설명변수 (실내 환경 요소)
$\beta_j = (j = 1, ..., k)$: 각 설명변수의 회귀계수
$P(Y=1|X_i)$: 환기 ($Window\ opening$) 확률
$L(\beta_0, \beta_1, ..., \beta_k)$: 회귀계수에 대한 우도함수
$\prod$: *product notation*

[식 2-30]의 $P(Y=1|X_i)$는 설명변수에 대한 반응변수로서 '0'부터 '1'까지의 범위를 가지며, 실내 환경에 따라 재실자가 문을 열 확률을 의미한다. 또한, 일반적으로 로지스틱 회귀분석에서, 회귀계수를 추정하기 위해서는 최대우도추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 이용하는데, 이는 획득한 데이터의 우도(Likelihood)를 최대화 시키는 모수를 찾는 방법이다. 전체 데이터에 대한 우도를 수식으로 표현하면 [식 2-31]과 같다. 우도 함수를 최대화하는 값, 즉 관찰치의 가능성을 최대화하는 값에서 모수의 추정치를 결정하게 된다.

② 설명변수 선택

로지스틱 회귀분석을 기반으로 최종모델을 선택하기에 앞서, 환기행동에 대해 설명력이 부족한 변수들을 소거하거나, 영향력을 감소시킬 필요가 있다. 각 변수들의 계수 축소 및 소거 없이 모델을 선택하게 된다면, 분산(Variance)이 높아지게 되어 미래의 데이터에 대한 적응력이 떨어지며, 실제 현상과 관련 없는 무작위한 요소까지 학습하게 될 가능성이 높아진다. 다시 말해, 이상적인 모델은 데이터의 규칙성을 잘 잡아내어 정확하면서도 다른 데이터가 들어왔을 때도 잘 일반화 시킬 수 있는 모델이어야 한다. 본 연구진은 최적의 모델을 선택하기 위해, 다음의 2가지 변수 선택법을 고려하였다: ㉮ 변수 선택법: 설명력 기준에 의해 변수를 소거하는 방법; ㉯ 축소화 방법(Shrinkage method): 영향력이 없는 설명변수의 계수를 감소시키는 방법.

㉮ 변수 선택법: 변수 선택법이란, 각 단계마다 주어진 후보 설명변수 중 가장 설명력이 높거나 혹은 낮은 변수를 차례로 선택 혹은 제거하여, 최종적으로 가장 적합한 설명변수 군을 찾아내는 방법이다. 변수 선택법에는 전진적 선택법, 후진 제거법, 그리고 앞선 두 방법을 혼합하여, 다중공선성의 영향을 줄이는 하이브리드 선택법이 있다. 아카이케 정보 기준(AIC, Akaike Information Criterion)을 통해, 앞서 언급한 설명력을 정의할 수 있다. [식 2-32]을 통하여 편차(Deviance)는 우도함수의 음의 로그변환과 비례한다는 사실을 알 수 있다. 즉, 우도함수의 값이 클수록 편차는 작아진다고 볼 수 있다. [식 2-33]의 아카이케 정보 기준(AIC)은 변수 선택법의, 첫 단계에서는 최대우도추정법을 통해 변수를 선택하지만, 두 번째 단계부터는 설명변수의 개수를 통해 편차에 페널티를 주기 때문에, 많은 변수로 인한 과적합을 피하게 해준다. 아카이케 정보 기준(AIC)을 통해 가장 적은 양의 정보손실을 갖는 모델이 데이터에 대해 가장 적합한 모델로 선택이 된다. 가장 적은 양의 정보 손실을

갖는 모델은, 가장 낮은 아카이케 정보 기준(AIC)을 가지기 때문에, 변수 선택법에서는, 최소의 아카이케 정보 기준(AIC)을 가진 모델이 최적의 모델로 선택된다. 본 연구에서는 3가지의 변수 선택법 중, 전진적 선택법 과 후진 제거법을 혼합한 하이브리드 선택법을 활용하여 변수 선택을 진행하였다.

$$Deviance \approx -\log(L_{fitted}) \quad \text{(식 2-32)}$$

$$Akaike\,Information\,Criterion = Deviance + 2k \quad \text{(식 2-33)}$$

L_{fitted} : 우도 함수 $(Likelihood\,function)$
k : 설명변수의 개수

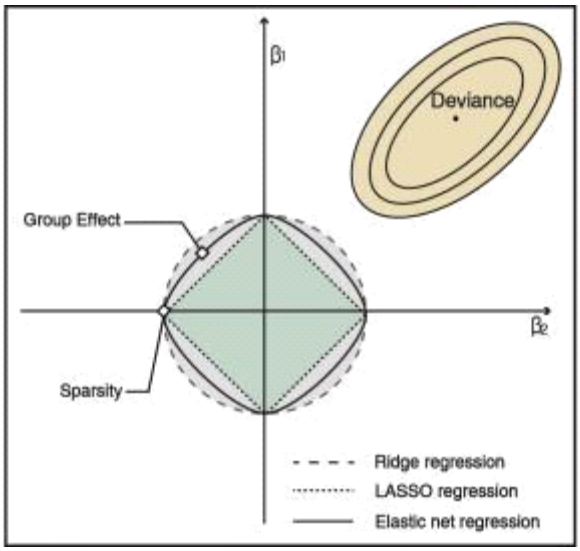
㉳ 축소화 방법(Shrinkage method): 축소 추정이란 앞서 설명한 단계적 선택법과 달리, 모든 설명변수를 통해 반응변수의 변동을 설명하되, 설명력이 떨어지는 변수들의 계수를 0에 가깝게 줄여나가거나 소거하는 방법이다. 이러한 축소화 방법에는 LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) 추정, Ridge 추정, Elestic net 추정의 3가지 방법이 있다 ([식 2-34] - [식 2-36], [그림 2-50] 참조). [식 2-34]은 LASSO 추정으로, 편차에 대해 계수의 절대 값의 합인 l1 norm ($\lambda\sum_{k=1}^{K}|\beta_k|$)을 페널티로 주는 방법이다. [식 2-35]은 Ridge 추정으로, 편차에 대해 계수의 제곱의 합인 l2 norm($\lambda\sum_{k=1}^{K}\beta^2$)을 페널티로 가하는 방법이다. [식 2-36]은 Elastic net 추정으로써, α를 매개로 한 l1 norm과 l2 norm의 블록 결합형태($\alpha\lambda_1\sum_{k=1}^{K}|\beta_k|+(1-\alpha)\lambda_2\sum_{k=1}^{K}\beta^2$)의 페널티를 갖는다. Elastic net은 Ridge 추정과 LASSO 추정을 결합한 절충안으로서, 두 추정 방식의 단점을 보완하기 위해 제안되었다.

$$argmin_{\beta}(-\frac{2}{n}logL(\beta))+\lambda\sum_{k=1}^{K}|\beta_k| \quad \text{(식 2-34)}$$

$$argmin_{\beta}(-\frac{2}{n}logL(\beta))+\lambda\sum_{k=1}^{K}\beta_k^2 \quad \text{(식 2-35)}$$

$$argmin_{\beta}(-\frac{2}{n}log(L(\beta))+\lambda_1\alpha\sum_{k=1}^{K}|\beta_k|+\lambda_2(1-\alpha)\sum_{k=1}^{K}\beta_k^2 \quad \text{(식 2-36)}$$

$L(\beta)$: 회귀계수에 대한 우도함수
$argmin_{\beta}$: $\mathrm{argument\,of\,minimum\,of}\,\beta$
λ_i : $tuning\,parameter$



[그림 2-50] 축소화 방법

③ ROC(Receiver Operation Characteristic) 곡선을 이용한 모델 선정

ROC 곡선은 모형의 타당성을 분류정확도를 기준으로 평가하는 대표적인 방법이며, 데이터를 기반으로 한 로지스틱 회귀 알고리즘과 같은 분류자를 시각화 및 점수화 할 수 있는 유용한 방법이다. 본 연구진은 ROC 곡선을 통해, 재실자 환기 행동의 분류정확도에 대한 민감도(실제 재실자의 환기 시작 행동을 올바르게 예측하는 비율)와 특이도(실제 재실자의 환기 종료 행동을 올바르게 예측하는 비율)의 관계에 따라 분류정확도를 점수화하였다. ROC 곡선은 다음의 두 단계에 따라서 (0,0)에서 (1,1)을 지나는 그래프로 나타낼 수 있다: ① x축(실제 재실자의 환기 시작 행동을 환기 종료로 잘못 예측하는 비율 (1-특이도), y축(실제 재실자의 환기 시작 행동을 정확히 예측하는 비율 (민감도))을 좌표평면에 대응; ② 기준점 c(0~1)에 따른 민감도와 특이도 도출 ((P(x) (환기 시작 확률) > c인 경우, Y=1로 분류, P(x) < c 인 경우, Y=0으로 분류). ROC 곡선의 밑면적을 AUC(Area Under Curve)라고 정의하는데, 이는 모델의 분류정확도를 나타내는 척도이다. 흔히 AUC가 0.5면 무작위 분류기준, 1이면 완벽한 분류정확도, 그리고 AUC가 0.7을 넘을 경우 분류정확도를 어느 정도 확보한 모델로 평가한다.

④ Yonden's index를 이용한 최적기준점 결정

Youden's index는 1950년 Youden에 의해서 제안된 방법으로 특이도와 민감도의 합에서 1을 빼준 값이다([식 2-37] 참조). 일반적으로 Youden's index의 값이 크다면, 분류정확도가 높은 분류모델이라고 할 수 있다.

$$J = 1/2[(TP-FN)/(TP+FN)+(FP-TN)/(TN+FP)] = Sensitivity+Specificity-1$$ --(식 2-37)

J: $Youden's\ index$
TP: $true\ positive\ rate$
FN: $false\ negative\ rate$
FP: $false\ positive\ rate$
TN: $true\ negative\ rate$

Youden's index를 이용하여 최적기준점을 결정하기 위해 모든 기준점에 대응하는 특이도와 민감도를 구하게 되는데, 이는 ROC곡선의 계산방법과 동일하다. 즉, 모든 Youden's index는 ROC곡선의 모든 점에 대해 정의되며, Youden's index의 최대값은 직교좌표의 원점과 (1,1)를 잇는 선분과 ROC곡선 사이의 최대수직거리이다. 최대수직거리가 최대가 되는 ROC곡선 위의 점에서 민감도와 특이도가 결정되며, 이때의 기준점이 최적기준점이 된다. 다음과 같은 과정으로 계산된 최적기준점을 입력하여 최종 환기 자동제어 알고리즘을 결정하게 된다.

⑤ 기계학습을 이용한, 하이브리드 기반의 환기 자동제어 기술 개발

본 연구진은 로지스틱 회귀분석을 기반으로, 하이브리드 기반 창호형 환기시스템의 환기제동제어 알고리즘을 개발하였다. 기 개발 알고리즘은 다음의 3 단계에 따라 수립되었다: ㉮ 단계적 선택법(Stepwise selection)과 축소화 방법(Shrinkage method)을 이용한 모델 구성; ㉯ 창호형 환기시스템의 제어 알고리즘 개발을 위한, 최적 모델 선정; ㉰ 창호형 환기시스템의 자동제어를 위한 최적기준점(Cut-off value) 도출.

㉮ 단계적 선택법(Stepwise selection)과 축소화 방법(Shrinkage method)을 이용한 모델 구성

첫째, 실시간 실내 환경 센서 및 문열림 센서를 통해 수집된 데이터를 바탕으로, 각 설명변수에 대해 Akaike Information Criterion을 토대로 단계적 선택법을 이용한 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 그 결과, 최종적으로 이산화탄소(CO_2) 농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs) 농도, 실내온도가 차례대로 선정되었다 ([표 2-48] 참조).

[표 2-48] 변수 선택법을 이용한 로지스틱 회귀분석 결과

구분	설명변수							AIC
	실내 온도	실내 습도	이산화탄소	총휘발성 유기화합물	초미세 먼지	미세 먼지	상수	
단계 1	-	-	-	-	-	-	0	423.4
단계 2	-	-	0.0055	-	-	-	-5.04	306.8
단계 3	-	-	0.0048	0.0035	-	-	-5.00	296.0
단계 4	0.295	-	0.00444	0.0039	-	-	-12.30	287.7

둘째, 축소화 방법(Shrinkage method)인 Elastic net 추정을 기반으로 로지스틱 회귀분석을 실시한 결과를 살펴보면, 매개변수(α)가 0에서 1로 변화함에 따라, 이산화탄소(CO_2) 농

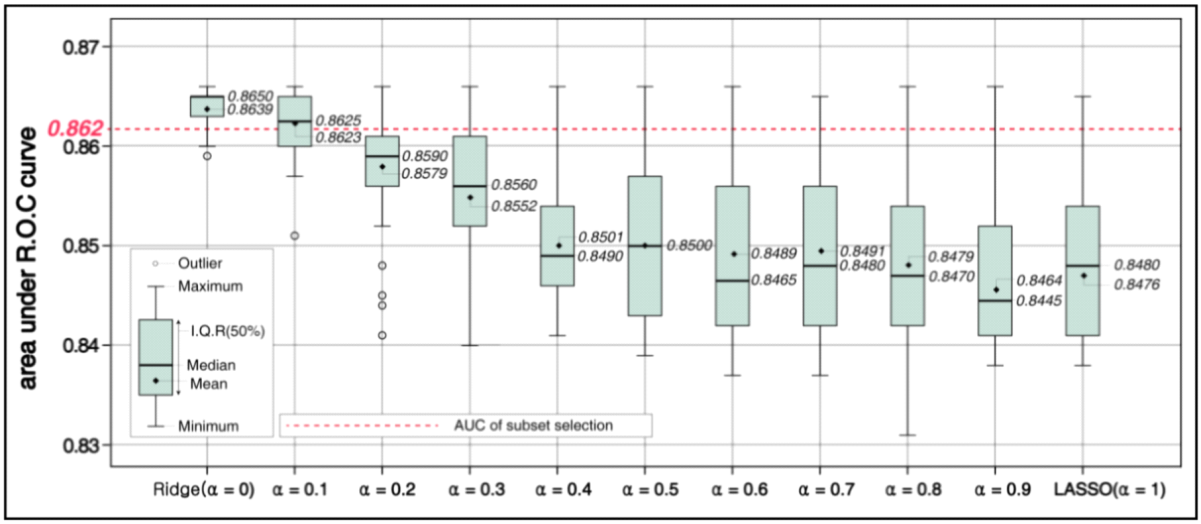
도를 제외한 모든 변수들의 계수가 작아지거나 소거되었으며, 자세한 결과는 [표 2-49]와 같다.

[표 2-49] 축소화 방법(Shrinkage method)를 이용한 로지스틱 회귀분석 결과

매개변수 (α)	설명변수의 회귀계수						
	실내 온도	실내 습도	이산화탄소 (CO_2)	총휘발성유기화합물	초미세먼지	미세먼지	상수항
0 (Ridge)	0.209	0.0369	0.00293	0.00295	-0.01176	0.00349	-9.61
0.1	0.092	0.0167	0.00143	0.00146	-0.00197	0	-4.27
0.2	0.092	0.0113	0.00169	0.00154	0	0	-4.47
0.3	0.059	0.0016	0.00159	0.00124	0	0	-3.30
0.4	0.052	0	0.00177	0.00123	0	0	-3.25
0.5	0.040	0	0.00191	0.00114	0	0	-3.05
0.6	0.024	0	0.00201	0.00100	0	0	-2.70
0.7	0.019	0	0.00221	0.00098	0	0	-2.77
0.8	0.014	0	0.00241	0.00094	0	0	-2.81
0.9	0.008	0	0.00259	0.00089	0	0	-2.83
1 (LASSO)	0	0	0.00264	0.00064	0	0	-2.61

㉰ 창호형 환기시스템의 제어 알고리즘 개발을 위한, 최적 모델 선정

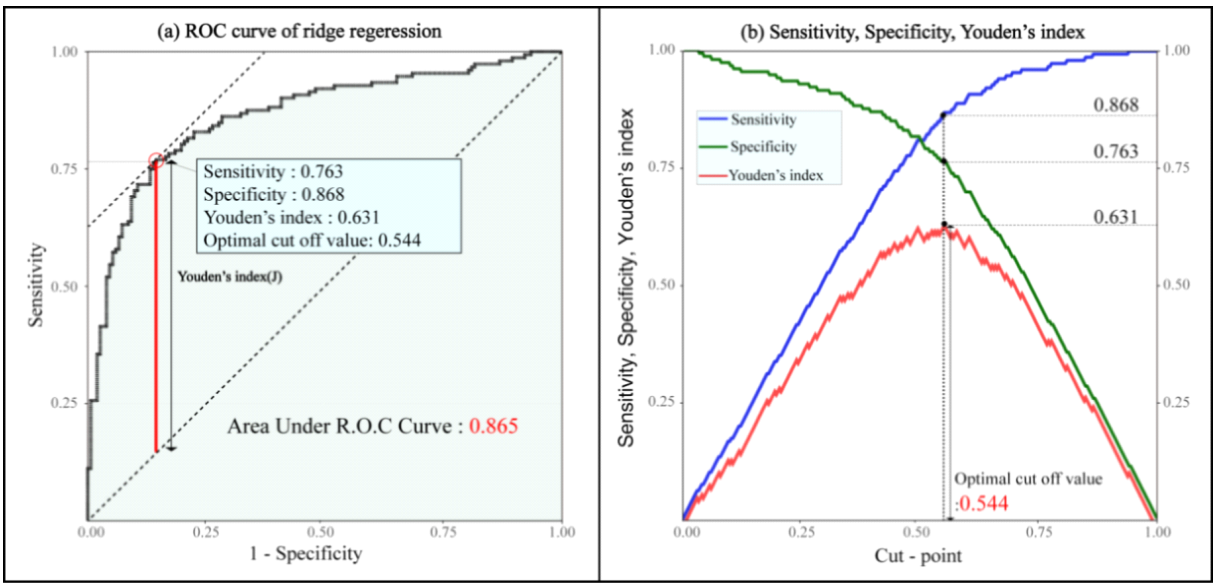
본 연구진은 창호형 환기시스템의 제어 알고리즘 개발을 위해, 앞서 수행한 변수 선택법과 축소화 방법을 기반으로 도출한 모델들을 대상으로, ROC(Receiver Operation Characteristic) 곡선의 AUC(Area Under Curve)비교를 통해 최적 모델을 도출하였다. 축소화 방법인 Elastic net 추정의 AUC 비교 결과, Ridge 추정(α = 0)이 LASSO 추정(α = 1)을 포함한 나머지 Elastic net 추정보다 분류정확도가 우수한 것으로 판단된다. 이는, 기존의 Elastic net 추정은 α값이 커질수록 각 설명변수간의 교호작용를 무시하고 변수를 좀 희소(Sparsity)하게하는 경향이 있지만, 본 연구진이 수집한 데이터의 설명변수들 간에는 어느 정도 교호작용이 존재하기 때문에, 교호작용을 장려하는 Ridge 추정(α = 0)의 AUC 값이 가장 높게 나온 것으로 판단된다. 또한, 단계적 선택법의 AUC 값(0.862)과 비교해보아도 Ridge 추정의 AUC 값이 가장 크게 나온 것으로 분석되었다. 결과적으로, 창호형 환기시스템의 제어 알고리즘으로는 Ridge 추정을 통해 도출된 수식을 활용하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났다 ([그림 2-51] 참조).



[그림 2-51] AUC 비교

㉰ 창호형 환기 시스템의 자동제어를 위한 최적기준점(Cut-off value) 도출

앞의 과정을 통해, 본 연구진은 실시간으로 측정된 설명변수들에 대해, 재실자가 환기 행동을 시작할 확률을 계산할 수 있었다. 나아가 창호형 환기 시스템의 제어를 위한 기준을 세우기 위해, Youden's index를 통해 민감도와 특이도의 합이 최대가 되는 최적기준점을 구하였다 ([그림 2-52] 참조). 결과를 종합하면, 창호형 환기 시스템은 Ridge 추정을 통해 도출된 수식을 기반으로 얻은 P(x)(환기를 시작할 확률) 값이, 0.544보다 높으면 환기를 시작하고, 0.544보다 낮으면 환기를 종료하는 형태로 구동하는 것이 적합한 것으로 나타났다.



[그림 2-52] Youden's index를 이용한 최적기준점 결정

(4) 단위성과 3-3-① 자동제어 장치 개발

(가) 태양광 추적 장치 개발

1차 연도에 본 연구진은 IoT 기반의 다기능 창호제품의 태양광 블라인드 추적을 위해 '모니터링/제어 시스템 – 주 제어기(Main Controller) – 인쇄회로기판(PCB) – 태양광 블라인드'로 구성된 추적 장치 개발을 완료하였다. 따라서 2차 연도에는 태양광 추적 장치 개발을 위한 연구로서, 모니터링/제어 시스템에 적용될 태양광 추적 알고리즘에 대한 개발 및 보완을 진행하였다.

지난 1차 연도에 본 연구진은 7차 프로토타입 모델의 발전량을 최대화할 수 있는, 다음의 3가지의 태양광 추적 방식을 개발하였다: ① 위치 • 시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식; ② 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식; ③ 하이브리드(위치 • 시간& 태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식. 첫째, 위치 • 시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식은, 태양광 블라인드가 설치된 위치와 시간에 따라, 태양의 고도 및 방위각을 산정하여, 블라인드 슬랫의 각도를 조절할 수 있다. 이 방식의 경우, 태양의 고도와 방위각에 대한 정확한 계산이 필요할 뿐만 아니라, 미리 계산된 각도로 블라인드 슬랫을 조절하기 때문에 창호 스틸 프레임으로 인해 발생하는 음영효과에 취약하다. 둘째, 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식은, 추적 주기마다 생산 발전량을 직접 측정하여, 가장 많은 발전량을 생산할 수 있는 각도로 블라인드 슬랫을 조절하는 방식이다. 그러나, 생산되는 발전량이 적을 경우, 회전범위 각도별 발전량 차이를 감지하지 못해 태양광 추적의 오작동이 발생할 수 있다. 마지막으로, 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식은, 앞서 말한 두 가지 방식을 혼합한 방식이다.

본 연구에서는 실시간으로 기후요소를 고려한 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 추가로 개발하여 IoT 기반의 다기능 창호제품의 발전량을 최대로 생산하고자 하였다. 기후요소를 고려한 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 개발하기 위한 프레임워크는 다음과 같이 3 단계로 구성된다: ① 1단계: 데이터베이스 구축; ② 2단계: 태양광 발전량에 영향을 미치는 기후요소의 선정; ③ 3단계: 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 태양광 추적 알고리즘 개발.

▪ 1단계: 데이터베이스 구축

본 연구에서는 기후요소를 고려한 하이브리드(위치 • 시간&태양광 발전량) 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘을 개발하기 위하여, 태양광 발전량 생산에 영향을 미치는 다양한 기상요소와 그에 따라 생산된 발전량 데이터를 수집하였다. 먼저, 문헌조사를 통해 일반적으로 태양광 발전량에 영향을 미치는 다양한 기후요소들(기온, 상대습도, 미세먼지 농도, 강수량, 운량, 일사량, 일조시간, 강수량, 풍속)을 선정하였다. 그 중, 일사량과 일조시간에 대한 정보는 실시간으로 제공받지 못하기 때문에 제외하였다. 또한, 풍속의 경우, 태양광 블라인드가 유리 내부에 설치되기 때문에 영향을 받지 않을 것으로 판단되어 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 총 5가지 기후요소(기온, 상대습도, 미세먼지 농도, 강수량, 운량)를 독

립변수로 설정하였다 ([표 2-50] 참조). 정의된 독립변수 중 기온, 상대습도, 미세먼지 농도 정보는 프로토타입 모델에 부착된 센서를 통해 직접 수집하였으며, 강수량과 운량 정보는 한국의 기상청에서 수집하였다. 또한, 종속변수는 앞서 설명한 두 가지 태양광 추적 방식(위치 • 시간&태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식)을 적용하여 생산된 발전량으로 정의하고, 실험을 통해 수집하였다. 본 실험은 아래의 [표 2-51]과 같이 진행하였다.

[표 2-50] 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 태양광 추적 알고리즘 개발을 위한 변수의 정의

구분		관측 주기	척도유형	수집 방법
독립변수	기온(°C)	1초	비율척도	프로토타입 모델을 활용한 수집
	상대습도(%)	1초	비율척도	
	미세먼지 농도($\mu g/m^3$)	1초	비율척도	
	강수량(mm)	1분	비율척도	한국 기상청
	운량(%)	1시간	비율척도	
종속변수	위치 • 시간 기반의 양방향(2축) 추적 방식을 적용하여 생산된 발전량(Wh)	1초	비율척도	프로토타입 모델을 활용한 수집
	태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 추적 방식을 적용하여 생산된 발전량(Wh)	1초	비율척도	

[표 2-51] 데이터 수집을 위한 실험의 개요

구분	세부사항
실험 기간	2017.09.22. - 2017.11.04 (30 days)
실험 시간	10:00 - 16:00 (6 hours)
설치 위치	연세대학교 공학원 (위도 37.33° , 경도 126.56°)
설치 방향	남 (180°)
측정 요소	전류 (mA), 전압 (V), 전력 (W)
	기온 (°C), 상대습도 (%), 미세먼지 농도 ($\mu g/m^3$)
추적 범위	-6° to +6° (좌-우), 0° to 60° (상-하)
추적 방식	위치·시간 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식
	태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 방식
추적 주기	4분

▪ 2단계: 태양광 발전량에 영향을 미치는 기후요소 선정

본 연구에서는 태양광 발전량에 영향을 미치는 기후요소를 선정하기 위하여, 기후요소와 태양광 블라인드를 통해 생산된 태양광 발전량간의 상관관계 분석을 수행하였다. 상관관계 분석은 연속적인 속성을 가지고 있는 두 변수 간의 상호연관성에 대해 통계적 유의성을 검증해주는 통계분석 기법으로, 'IBM SPSS Statistics 23.0' 소프트웨어 프로그램을 활용하여 수행하였다. 먼저, 수집된 기후요소와 태양광 발전량 데이터에 대해 정규성 검정(Kolmogorov-Smirnov Test)을 수행한 결과, 모두 정규분포를 따르지 않았기 때문에, 비모수 통계방법인 스피어맨(Spearman) 상관분석을 수행하였다. 또한, 분석에 활용된 상관계수

는 변수간의 상관관계의 크기를 나타내는 값으로 -1에서 +1사이의 값을 가지며, ±1의 경우 상관관계가 가장 크며, 0의 경우 상관관계가 전혀 없음을 나타낸다. 본 연구의 분석에 활용된 상관계수는 의사결정나무분석(DT)에서 활용될 변수 도출을 위해 수행되었기 때문에, 변수간의 관련성 유무의 확인을 위해서만 활용되었다.

▪ 3단계: 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 태양광 추적 알고리즘 개발

본 연구에서는 기존의 위치·시간 및 태양광 발전량 기반의 양방향(2축) 태양광 추적 알고리즘의 장점을 취합하고, 기후요소를 고려한 하이브리드 기반의 태양광 추적 알고리즘을 개발하기 위하여, 의사결정나무분석(DT)을 활용하여 기후요소에 대한 기준 값을 설정하고자 하였다. 의사결정나무분석(DT)은 집단을 변수에 따라 분류하는 데이터 마이닝 기법 중 하나로, 분류하는 방식에 따라 3가지(ID3(Iterative Dichotomizer 3), CARTs(C4.5, classification and regression trees), CHAID(chi-squared automatic interaction detection))로 나뉠 수 있다. 본 연구에서는 한 달간 분 단위로 구축된 대형 데이터를 사용하기 때문에, 많은 변수들을 대상으로 각 노드에서 분할을 지원하며 누락되는 값을 처리하는 장점이 있는 CHAID 방식을 활용하였다. 또한, 2단계에서 태양광 발전량 생산에 영향을 미치는 기후요소로 선정된 변수(기온, 상대습도, 미세먼지 농도, 강수량, 운량)와 시간을 의사결정나무분석(DT)의 독립변수로 활용하였다. 본 연구에서는 의사결정나무분석(DT)을 사용하여 태양광 발전량을 기후요소 및 시간에 따라 그룹화 하여, 기후요소에 따른 최적의 태양광 추적 방식을 선정하기 위한 구체적인 기준 값(Threshold)을 설정하였다.

(나) 유/무선 네트워크 기술을 이용한, 환기 자동 제어 장치 개발

본 연구에서는 앞서 구축한 실시간 실내·외 모니터링 시스템을 통해 수집된 환경 데이터를 기반으로 실내 환경을 평가하여, 7차 프로토타입 모델의 환기를 자동 제어하는 시스템을 랩뷰(LabVIEW) 기반으로 개발하였다. 본 연구에서 개발한 웹/스마트기기 기반의'실시간 실내·외 환경 모니터링 및 창호형 환기 제어 시스템(Ver 1.0)'의 유저 인터페이스는 다음의 3부분으로 구성되어 있다: ① Part B-1. 환기 제어 설정; ② Part B-2. 실내·외 환경 평가 시, 고려 대상 선정; ③ 환기 현황 ([그림 2-26] 참조).

① Part B-1. 환기 제어 설정

사용자가 화면에서 'Ventilation On'을 클릭한 경우에만, 실시간 실내·외 환경 평가를 통해 환기의 필요성을 판단하여, 7차 프로토타입 모델의 환기시스템이 구동된다. 또한, 본 시스템에서 환기 제어를 위해 적용한 알고리즘에 따라, 최대 자연환기 및 기계환기 시간을 사용자가 설정할 수 있도록 하였다 ([그림 2-26] 참조). 예를 들어, 사용자가 자연환기 최대 시간을 3분, 기계환기 최대 시간을 5분으로 설정하였고 실내 환경 평가를 통해 시스템 상에서 환기가 필요한 것으로 판단된 경우, 먼저 자연환기가 설정한 3분 동안 진행된다. 그 이후 다시 실내 환경을 평가하여 개선이 되지 않았을 경우, 환기량이 부족한 것으로 판단하여 기계환기를 5분 동안 구동하는 방식으로 작동된다 ([그림 2-26]의 Part B-1 참조).

② Part B-2. 실내·외 환경 평가 시, 고려 대상 선정

'Ventilation Mode Selection'에서 'User Mode'를 선택한 경우, 사용자가 환기 구동을 위해 고려하고자하는 환경 요소(온·습도, 미세먼지 등)를 선택할 수 있다. 또한, 'User Mode'가 아닌 'General Mode'를 선택할 경우, 본 연구진이 실시간 온·습도 및 실내 공기질 모니터링 지표로 선정하였던 5 가지 실내 환경 요소(온·습도, 미세먼지, 이산화탄소(CO_2), 총휘발성유기화합물(TVOCs))를 모두 고려하여 7차 프로토타입 모델의 환기 작동여부를 판단한다 ([그림 2-26]의 Part B-2 참조).

③ Part B-3. 환기 현황

마지막으로, 'Part B-3. 환기 현황' 부분에서는 기 개발 시스템인 '실시간 실내·외 환경 모니터링 및 창호형 환기 제어 시스템 (Ver 1.0)'을 기반으로 제어된 7차 프로토타입 모델의 환기 현황을 제시한다. 즉, 하루를 기준으로 환기가 구동된 총 시간과 더불어, 자연환기 및 기계환기가 구동된 시간을 구분하여 사용자에게 제공해준다 ([그림 2-26]의 Part B-3 참조).

(5) 단위성과 3-3-②: 자동제어 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

(가) 태양광 추적 장치를 적용한 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가

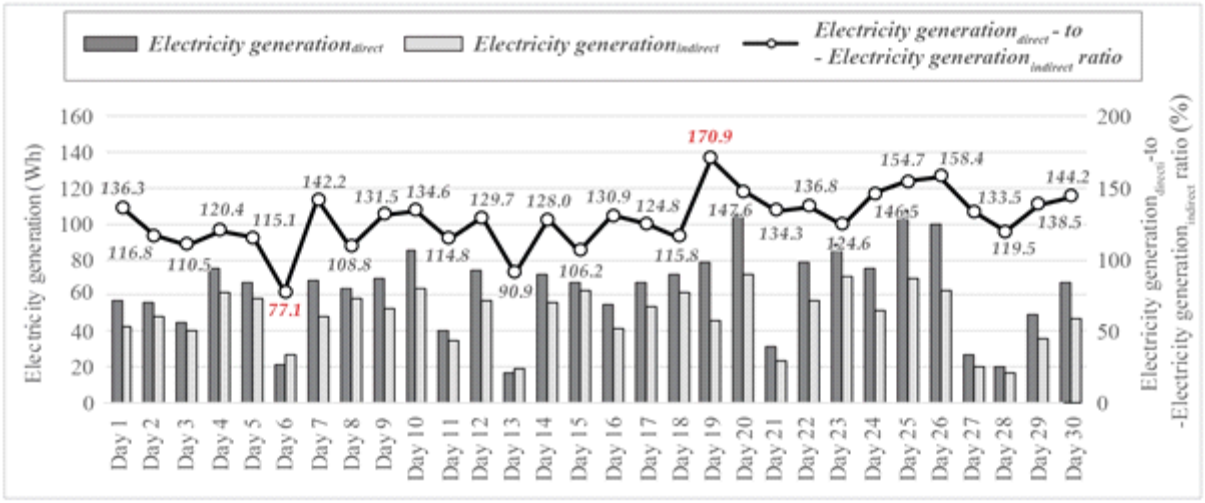
① 태양광 추적 방식을 고려한 기술적 성능 분석결과

본 연구에서는 태양광 추적 방식을 고려하여 7차 프로토타입 모델의 기술적 성능을 분석하였다. [그림 2-53]은 다른 추적 방식에 따른 발전량을 알아본 실험결과이다. [그림 2-53]에 따르면, 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델이 위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델보다 발전량 측면에서 6일, 13일을 제외하고 항상 높았다. 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델 대비 위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델의 비율은 최소 77.1%(6일)에서 최대 170.9%(19일)로 나타났다. 게다가, 기상조건에 관계없이 위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델보다 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델의 평균 발전량이 더 높았으며, 기상조건이 맑음(clear)에서 흐림(mostly cloudy)로 갈수록 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델 대비 위치·시간 기반의 추적 방식의 비율은 135.1%에서 102.7%로 감소하였다 [그림 2-54]. 결과적으로, 음영효과를 최소화하는 발전량 기반의 추적 방식이 태양의 위치를 고려해 계산된 각도로만 움직이는 위치·시간 기반의 추적 방식보다 전기에너지를 더 많이 생산할 수 있음을 알 수 있다.

② 태양광 추적 방식을 고려한 경제적 성능 분석결과

본 연구에서는 태양광 추적 방식을 고려하여 7차 프로토타입 모델의 기술적 성능을 분석하였다. 태양광 추적 방식과 별개로, 경제적 성능은 동일한 태양광 패널을 적용한 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델과 위치·시간 기반의 추적 방식의 생산단가는 243,969원으로 동일하

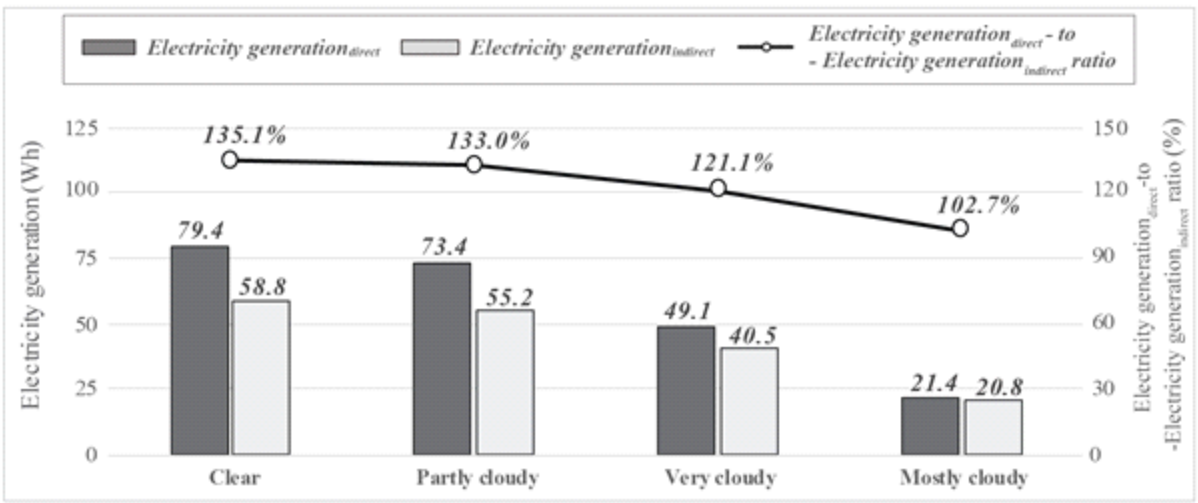
였다. 그러므로, 태양광 추적 방식에 따라 7차 프로토타입 모델의 경제적 성능은 차이가 없는 것으로 분석되었다.



[그림 2-53] 태양광 추적 방식에 따른 발전량 비교

③ 태양광 추적 방식을 고려한 기술적·경제적 성능 종합분석결과

본 연구에서는 태양광 추적 방식을 고려하여 7차 프로토타입 모델의 기술적·경제적 성능을 분석하였다. 각 태양광 추적 방식이 적용된 프로토타입 모델의 실험기간 동안의 총 발전량과 생산단가를 활용하여 비용 대비 이익을 계산하였다. 그 결과, 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델의 비용 대비 이익 (130원/Wh)이 위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델의 비용 대비 이익 (166원/Wh)보다 21.4% 더 저렴하게 전기를 생산할 수 있는 것으로 분석되었다 [표 2-52].



[그림 2-54] 태양광 추적 방식에 따른 발전량 비교 (날씨별 분류)

[표 2-52] 태양광 추적 방식을 고려한 7차 프로토타입 모델의 기술적·경제적 성능분석

	발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델	위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델
총 전기에너지 발전량 (Wh)	1,901.5	1,462
생산단가 (원)	243,969	243,969
비용 대비 이익 (원/Wh)	128	166

결과적으로, 기술적 성능 측면에서는, 최대 발전량을 직접 추적하는 위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델이 태양의 위치에 따라 고정된 값으로 움직이는 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델보다 우수한 것으로 나타났다. 태양광 추적 방식에 따른 생산단가는 차이가 없기 때문에, 기술적·경제적 성능측면에서 위치·시간 기반의 추적 방식을 적용한 모델이 발전량 기반의 추적 방식을 적용한 모델보다 더 우수한 결과를 나타냈다. 따라서, 동일한 가격에 더 많은 전기를 생산할 수 있는 발전량 기반의 추적 방식이 7차 프로토타입 모델에 더 적합한 태양광 추적 방식으로 결정되었다.

④ 7차 프로토타입 모델 현장적용에 대한 사업성 검토

본 연구에서는 결정된 최적의 태양광 패널 유형과 태양 추적 방식을 사용하여, 신규 및 기존 건물에 적용 할 수 있는 7차 프로토타입 모델의 최적 설계를 제안했다. 현장 적용성을 평가하기 위하여, 본 연구에서는 대한민국 서울에 위치한 5가지 종류의 건물(공동주택, 업무시설, 교육시설물, 판매시설, 방송·통신시설)을 대상으로 사업성 검토를 수행하였다. 모든 분석대상건물의 데이터(건물유형, 주소, 면적, 층수, 층고, 전기에너지 사용량, 사진)는 건축물 공공데이터 개방을 통해서 수집하였다. 본 연구의 사업성 검토는 두 가지 관점에서 진행되었다: ㉮ 미시적 관점에서의 사업성 검토; ㉯ 거시적 관점에서의 사업성 검토.

㉮ 미시적 관점에서의 사업성 검토

본 연구에서는 7차 프로토타입 모델을 실제 건물의 창 면적에 적용하여 전력 발전량 및 전기에너지 자급율을 평가하였다. 건물 수준에서 발전량과 전기 자급율을 계산하기위해서, 건물 유형에 따라, 5개씩 총 25개의 분석대상 건물을 선정하였다. 본 연구에서 7차 프로토타입 모델을 오직 건물의 남측 창 면적에 적용하였다고 가정한 후, 전력 발전량과 전기에너지 자급율을 계산하였다. 첫 번째로, 개별 건물의 남측 창 면적에 대한 정보를 설계도나 사진으로부터 수집한 뒤, [식 2-38]을 통해, 7차 프로토타입 모델의 월 전력 발전량을 계산하였다. 두 번째로, 각 건물의 월 전력 발전량을 월 전기에너지 사용량으로 나눠 건물의 전기에너지 자급율을 계산하였다([식 2-39] 참고).

$$\text{월간 전력 발전량}(Wh) = \text{남향 창의 면적}(m^2) \times \frac{\text{프로토타입모델의 월간 전력 발전량}(Wh)}{\text{프로토타입모델의 면적}(m^2)} \text{--(식 2-38)}$$

$$\text{전기에너지 자급율} = \frac{\text{월간 전력 발전량}(Wh)}{\text{월간 전기에너지 사용량}(Wh)} \times 100 \text{----------(식 2-39)}$$

$$\text{남향 창의 면적}(m^2) = \text{남향 벽의 면적}(m^2) \times \text{벽에 대한 창의 면적} \text{----------(식 2-40)}$$

$$\text{남향벽의 면적}(m^2) = \sqrt{\frac{\text{총 바닥 면적}(m^2)}{\text{바닥의 개수}} \times \frac{1}{\text{장단변비}}} \times \text{장단변비} \times \text{건물높이}(m) \text{-------(식 2-41)}$$

㉯ 거시적 관점에서의 사업성 검토

거시적 관점에서 서울의 모든 건물의 창 면적에 7차 프로토타입 모델을 적용하여 도시 수준의 발전량 및 전기에너지 자급율을 평가하였다. 미시적 관점에서의 사업성 검토와 마찬가지로, 프로토타입 모델을 건물의 남측 창 면적에 적용한 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 서울의 모든 건물의 창 면적을 계산하기 용이하도록 건물을 직육면체 모양으로 가정했다. 첫 번째로, 모든 분석대상 건물의 남측 창 면적을 산정하기 위해 건물의 정보데이터를 활용하여 평균 창 면적비(window to wall ratio)와 장단변비(length to width ratio)를 계산하였다. [식 2-40]을 통하여 남측 창 면적은 남측 벽 면적과 창 면적비를 곱하여 계산하였다. 이때, 남측 벽 면적은 연면적, 층수, 장단변비를 활용하여 계산하였다 ([식 2-41] 참고). 7차 프로토타입 모델이 실제 건물에 적용되었을 때의 월 전기에너지 발전량을 계산하였으며, 이를 활용하여 전기에너지 자급율을 산정하였다 ([식 2-39] 참고).

⑤ 7차 프로토타입 모델 현장적용에 대한 사업성 검토결과

7차 프로토타입 모델 (mono-Si기반의 태양광패널 그리고 발전량 기반의 추적 방식)의 최적 설계를 검증하기 위해, 본 연구에서는 2가지 관점에서 사업성 검토를 수행하였다. ㉮ 미시적 관점에서의 사업성 검토결과; ㉯ 거시적 관점에서의 사업성 검토결과.

이를 위해, 서울의 건물 정보 데이터를 건물의 종류 (아파트, 업무시설, 교육시설물, 판매시설 및 방송 통신시설)에 따라 수집하였다. 그 결과, 서울의 총 건물 23,337개 중 시스템 오류 및 전자 데이터 유효성으로 누락된 데이터를 제외하고 총 16,720개 건물에 대한 건물 정보 데이터를 대상으로 사업성 검토분석을 실시하였다.

㉮ 미시적 관점에서의 사업성 검토결과

첫째로, 미시적 관점에서 사업성 평가를 수행하기 위해 건물 수준에서의 발전량 및 전기에너지 자급율을 계산하였다 ([표 2-53] 참고). 건물의 바닥 면적과 창 면적에 따라 전기에너지 사용량과 발전량이 달라질 수 있기 때문에, 영향의 정도를 파악하기 위하여, [표 2-53]에서는 바닥 면적 대비 창 면적비도 함께 제시하였다. [표 2-53]에서 볼 수 있듯이, 7차 프로토타입 모델을 분석 대상건물에 적용함으로써 생산되는 전기에너지 발전량은 한 달 동안 평균 2,607kWh, 최대 4,989kWh로 나타났으며, 그에 따른 전기에너지 자급율은 평균 5.77%, 최대 20.25%로 나타났다. 높은 전기에너지 자급율을 나타내는 상위 5개 케이스의 건물 유형은, 케이스 6(교육시설물)을 제외하고 모두 아파트로 나타났다.

게다가, 케이스 4를 제외한 모든 건물에서는 바닥 면적 대비 창 면적비가 10% 이상으로 나타났다. 이 분석결과에 따라, 바닥 면적에 비해 넓은 창 면적을 갖는 건물에서는 7차 프로토타입 모델을 설치할 수 있는 면적이 넓어지기 때문에, 전기에너지 사용량에 비해 높은 전력 발전량

을 기대할 수 있으므로 전기에너지 자급율이 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 특징은 건물 유형 중 바닥 면적에 비해 넓은 창 면적을 갖는 아파트에서 주로 나타났다.

[표 2-53] 건물 유형별 월 전력 발전량 및 전기에너지 자급율

케이스	건물 유형	월 전기에너지 사용량 (kWh)	월 전력 발전량 (kWh)	창 면적 대비 바닥 면적비(%)	전기에너지 자급율(%)
Case 1	아파트	14,318	1,100	4.88	7.68
Case 2		14,386	2,762	12.31	19.20
Case 3		14,924	2,629	11.52	17.62
Case 4		10,870	1,543	6.72	14.19
Case 5		23,405	3,426	15.53	14.64
Case 6	교육시설물	24,642	4,989	15.58	20.25
Case 7		69,351	3,319	6.92	4.79
Case 8		25,643	2,188	6.89	8.53
Case 9		18,258	2,001	5.89	10.96
Case 10		15,362	497	3.15	3.23
Case 11	업무시설	88,733	956	3.40	1.08
Case 12		57,082	2,660	9.62	4.66
Case 13		57,255	1,719	6.23	3.00
Case 14		68,052	1,533	5.27	2.25
Case 15		75,177	776	2.65	1.03
Case 16	판매시설	125,028	4,117	3.61	3.29
Case 17		352,008	5,714	5.35	1.62
Case 18		462,109	5,231	6.05	1.13
Case 19		411,091	5,404	3.68	1.31
Case 20		153,864	2,018	2.77	1.31
Case 21	방송·통신시설	590,626	880	0.86	0.15
Case 22		234,335	2,454	4.80	1.05
Case 23		3,963,732	3,658	2.75	0.09
Case 24		2,467,214	737	1.86	0.03
Case 25		267,851	2,870	8.81	1.07
평균		384,213	2,110	6.28	5.77

㉯ 거시적 관점에서의 사업성 검토결과

두 번째로, 거시적 관점에서 사업성 평가를 수행하기 위해 도시 수준에서의 전력 발전량 및 전기에너지 자급율을 분석하였다. 이를 위하여 우선 건물의 남향 창 면적에 영향을 미칠 수 있는 평균 창 면적비와 평균 장단변비를 각 건물 유형별로 계산하였다. 특정 건물 유형의 창 면적비와 평균 장단변비가 클수록, 7차 프로토타입 모델을 적용할 수 있는 남향 창 면적이 넓어지기 때문에, 더 많은 양의 전력을 생산할 수 있어 전기에너지 자급율 측면에서 유리하다.

[표 2-54]에 따르면, 남향 벽 면적을 산정하는 장단변비는 건물 유형 중 교육 시설에서 6.2%로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 아파트가 3.4%로 크게 나타났다. 따라서, 장단변비에 따라 계산되는 남향 벽 면적은 교육 시설과 아파트가 다른 건물 유형(업무시설, 판매시설 및 방송·통신시설)보다 크게 나타났다. 한편, 실제로 7차 프로토타입 모델을 설치할 수 있는 면적을 산정하는 창 면적비는 판매시설이 48.3%로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 아파트가 45.3%로 크게 나타났다. 이는 판매시설과 아파트는 건물의 벽 면적의 45% 이상에 7차 프로토타입 모델을 설치할 수 있음을 의미한다.

이러한 결과를 토대로, 남향 창 면적을 산정하여, 서울시에 위치한 16,720개 건물에 대한 월간 전기에너지 사용량, 월 전력 발전량, 전기에너지 자급율을 계산하였다 ([표 2-55] 참조). 본

연구에서는 전기에너지 자급율이 건물 유형에 따라 상이하게 나타나는 이유를 분석하기 위하여, 창 면적비를 추가적으로 계산하였다. 월 전기에너지 사용량 및 월 전력 발전량 데이터가 정규 분포를 따르지 않았으므로, 각 항목의 중앙값을 사용하였다.

[표 2-54] 건물유형별 창 면적비 및 장단변비

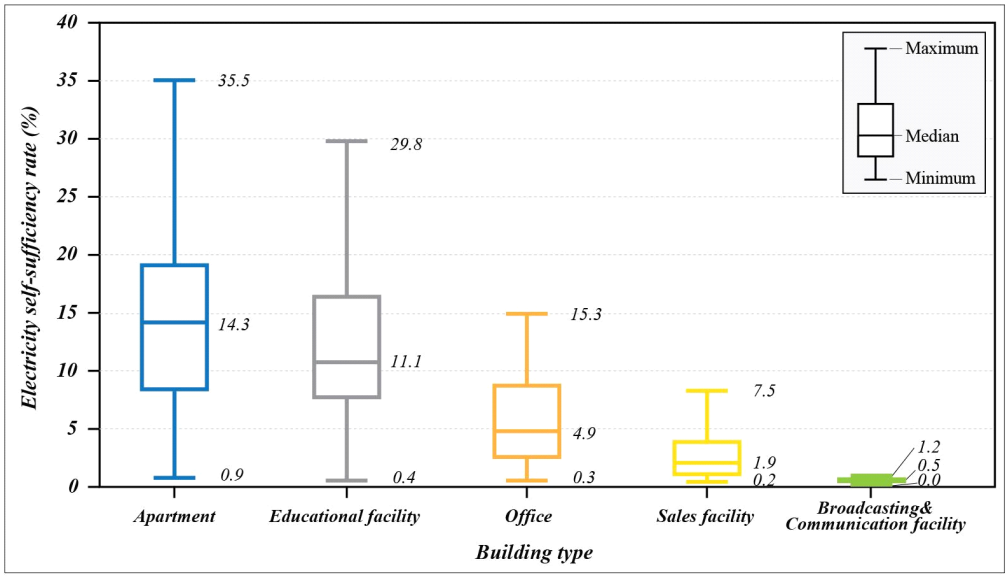
건물유형	창 면적비 (%)	장단변비 (%)
아파트	45.3	3.4
교육시설물	38.1	6.2
업무시설	41.7	1.3
판매시설	48.3	1.8
방송·통신시설	35.3	1.3

[표 2-55] 서울시 건물에 대한 월 전기에너지 사용량, 월 전력 발전량, 전기에너지 자급율

건물 유형	건물 수	월 전기에너지 사용량(kWh)	월 전력 발전량(kWh)	바닥 면적 대비 창 면적비 (%)	전기에너지 자급율 (%)
아파트	7,414	8,592	1,297	11.19	14.3
교육시설물	2,905	16,610	1,552	13.60	11.1
업무시설	6,017	17,150	806	7.86	4.9
판매시설	323	82,216	1,697	6.67	1.9
방송·통신시설	61	221,090	1,419	4.76	0.5

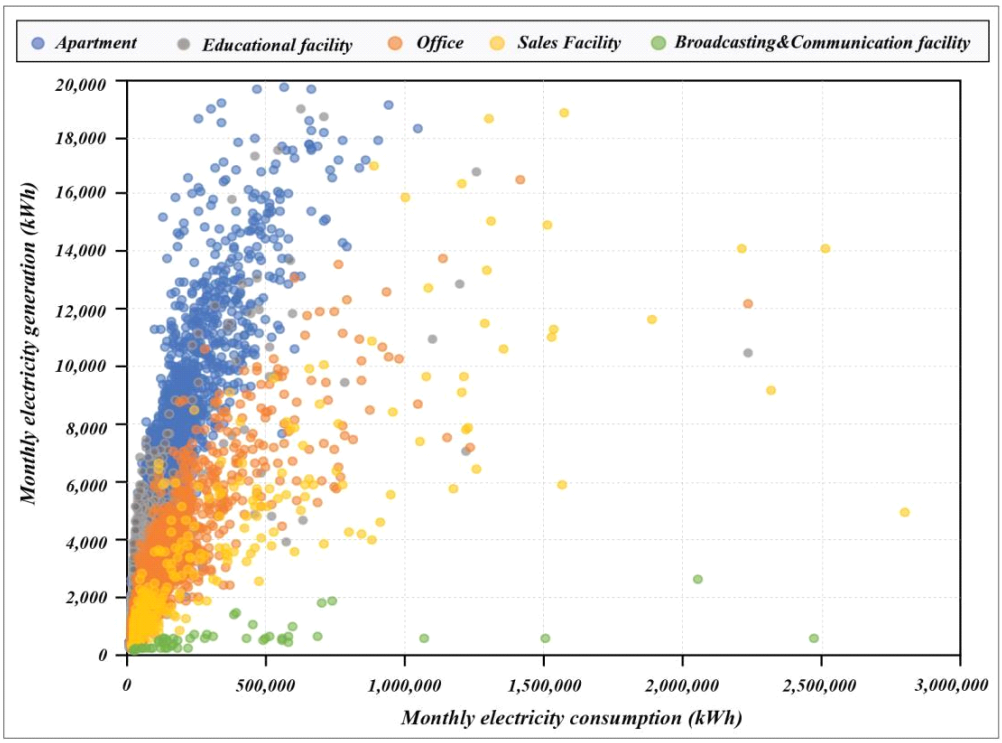
사업성 검토 결과에 대해 이해를 돕기 위해, [그림2-55]은 건물 유형별 전기에너지 자급율에 대한 상자도표를 나타내며, [그림 2-56]은 건물 유형에 따른 전기에너지 사용량 대비 전력 발전량 분포를 나타낸다.

[그림 2-55]과 같이, 7차 프로토타입 모델이 건물의 남향 창에 적용되었을 때, 평균 전기에너지 자급율은 아파트, 업무시설, 교육시설물, 판매시설, 방송·통신시설 순으로 높게 나타났다. 첫 번째로, 월 전기에너지 사용량이 8,592kWh로 가장 작고, 바닥 면적 대비 창 면적비는 11.19%로 두 번째로 큰 아파트의 평균 전기에너지 자급율이 가장 높은 것으로 분석되었다 ([표 2-55], [그림 2-55]의 파란색 상자도표)



[그림 2-55] 건물 유형별 전기에너지 자급율(상자도표 분석)

채광을 위하여 주로 넓은 창 면적의 아파트는, 본 연구에서 개발된 7차 프로토타입 모델을 설치할 수 있는 면적이 넓어 월 전력 발전량이 높은 반면, 비교적 월 전기에너지 사용량이 적게 나타났다 ([그림 2-56]의 파란색 원). 이는 본 연구에서 개발된 7차 프로토타입 모델을 아파트에 적용하는 경우, 전기에너지 자급율 측면에서 가장 높은 효율을 보인다고 볼 수 있다. 다음으로, 교육 시설의 전기에너지 자급율은 아파트보다 3.2 % 낮았지만, 두 번째로 높은 전기에너지 자급율을 보였다. 교육 시설물의 월 전력 발전량은 모든 건물 유형 중 가장 높은 바닥 면적 대비 창 면적비로 인하여 아파트보다 19.7 % 더 높게 나타났으나, 월 전기에너지 사용량은 아파트보다 93.3% 더 높게 나타났다. 따라서, 전기에너지 자급율 측면에서 교육 시설물이 아파트보다 효율이 낮게 나타났다.



[그림 2-56] 건물 유형별 전기에너지 사용량 대비 전력 발전량 분포

세 번째로, 업무시설의 전기에너지 자급율은 아파트보다 9.4% 더 낮았으며, 세 번째로 높은 전기에너지 자급율을 보였다. 업무시설의 경우, 바닥 면적 대비 창 면적비가 교육 시설물보다 5.74 % 작아 월 전력 발전량이 교육 시설물보다 48.1% 낮게 나타난 반면, 월 전기에너지 사용량은 교육 시설물보다 3.25 % 높게 나타났다. 위와 같은 이유로, 전기에너지 자급율 측면에서 업무시설은 아파트와 교육 시설물보다 효율이 낮은 것으로 분석되었다.

네 번째로, 판매 시설의 전기에너지 자급율은 업무시설보다 3.0 % 더 낮게 나타났다. 판매 시설의 창 면적비와 장단변비는 모두 업무시설보다 높아 7차 프로토타입 모델을 적용할 수 있는 면적이 업무시설보다 넓게 나타났다. 따라서, 업무시설보다 월 전력 발전량은 110.5 % 많은 것

으로 분석되었다. 그럼에도 불구하고, 판매 시설의 바닥 면적 대비 창 면적비가 업무시설보다 1.19 % 작게 나타나, 넓은 바닥 면적으로 인한 전력부하가 크기 때문에 월 전기에너지 사용량이 업무시설보다 379.7 %나 크게 나타났다. 위와 같은 이유로, 전기에너지 사용량이 높은 판매시설은 전기에너지 자급율 측면에서 아파트, 교육 시설물 및 업무시설보다 효율이 낮은 것으로 분석되었다.

마지막으로, 방송·통신시설은 전기에너지 자급율이 0.48 %로 건물 유형 중 가장 낮았다. 창면적비가 건물유형 중 가장 낮게 나타났음에도 불구하고, 월 전력 발전량은 세 번째로 높게 나타났다. 그러나, 방송장비, 조명 및 기자재 등 다양한 설비로 인해, 전력을 많이 사용하는 방송·통신설비의 월 전기에너지 사용량은 넓은 바닥 면적으로 인해 전력부하가 많은 판매시설보다도 168.9% 더 크게 나타났다. 위와 같은 이유로, 전기에너지 사용량이 극도로 높은 방송 통신시설은 자급율 측면에서 건물 유형 중 가장 효율이 낮은 것으로 분석되었다.

결론적으로, 본 연구에서 제시된 7차 프로토타입 모델의 최적 설계가 대한민국 서울에 위치한 모든 건물의 남향 창에 적용될 경우, 건물 유형별 전력 생산 및 사용 패턴에 따라 전기에너지 자급율이 다르게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서, 7차 프로토타입 모델을 건물에 설치할 때, 건물 유형 별 특성(남향 창, 전력 발전량 및 전기에너지 사용량 등)을 고려하여 7차 프로토타입 모델에 적절하게 설치하는 것이 중요하다.

(나) 환기 자동 제어 장치를 적용한 프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장적용평가

① 실내 환경권고기준에 따른 자동환기 제어알고리즘의 성능평가

본 연구에서는 수집된 데이터, 그리고 분류모델인 자동환기제어알고리즘의 적용가능성을 검증하기 위해서, 공인된 실내환경권고기준에 얼마나 부합하여 작동하는지를 분석하였다. 즉, 실내환경변수가 권고기준을 초과하였을 때 환기를 작동하고, 권고기준 이하가 되었을 때 환기를 종료하는 성능을 준수율을 바탕으로 확인할 것이다. 실내환경권고기준은 과거의 역학조사나 과거 실험을 통해 얻어진 데이터를 기반으로 제시되었으며, 실내환경이 기준을 초과한 경우에는 재실자의 건강에 악영향을 미칠 수 있다. 실내환경권고기준은 크게 두 가지로 분류할 수 있다: ㉮ 실내 온열환경 기준; ㉯ 실내 공기질 권고기준

㉮ 실내 온열환경 기준: 실내 온열환경 기준은 재실자가 선호하는 온열환경을 조성하기 위해 물리적 환경요소(예: 실내온도, 실내습도)들을 제한하고 조정하는 것을 목적으로 한다. 과거 연구에서는, 물리적 환경요소들을 통합한 하나의 지표에 초점을 두었으며, 온열환경의 지표로서 주로 예상 불만족도(PPD)를 주로 활용하였다. 예상 불만족도(PPD)는 온열환경에 불만족한 재실자의 비율을 정량적으로 예측한 개념이다. ASHRAE Standard 55에 따르면 재실자 개인이 만족하는 온열환경의 예상 불만족도(PPD)는 10%이다. 그러나 보통의 건물에서는 90%의 만족도는 거의 달성하지 못하며, 최대 만족도는 80%이다. 그 이유는 인체에서 국부적으로 인지되는 열적 불만족이 반영되기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는, 재실자가 열적 안정감을 느끼는 실내 온열환경기준을 예상 불만족도(PPD)<20%로 설정하였다([표 2-56] 참조).

㉰ 실내 공기질 권고기준: 실내 공기질 권고기준은, 실내공간에서의 신선한 공기의 확보와 각종 실내공기 오염물질로 인한 재실자의 건강상 위해를 효과적으로 줄이는 것을 목적으로 한다. 실내 공기질 권고기준은 실내 공기오염물질의 농도를 제어할 수 있도록, 각 물질마다 개별의 권고기준을 정하는 것이 중요하다. 실내 공기 오염물질은 환기나 공기청정기로 제어할 수 있기 때문에 적시에 관리할 수 있도록, 보다 정확하고 세세한 기준점이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는, 대한민국 교육부에서 공고한 학교보건법에 따라서 이산화탄소(CO_2) 농도의 권고기준을 1000ppm으로, 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도를 400ppb로 정하였다. 또한 독일 연방 환경청(German Environment Agency) 기준에 따라 미세먼지(PM10)농도의 기준점을 50$\mu g/m^3$로, 초미세먼지(PM2.5)농도의 기준점을 25$\mu g/m^3$로 정하였다([표 2-56] 참조).

[표 2-56] 실내환경변수 및 실내공기질 권고기준

실내환경변수	권고기준
Percentage of dissatisfied	< 20 (%)
이산화탄소(CO_2)농도 기준	< 1000 (ppm)
총휘발성유기화합물(TVOCs)농도 기준	< 400 (ppb)
미세먼지(PM10)농도 기준	< 50 ($\mu g/m^3$)
초미세먼지(PM2.5)농도 기준	< 25 ($\mu g/m^3$)

② 실내환경권고기준에 따른 실시간 모니터링 데이터 평가

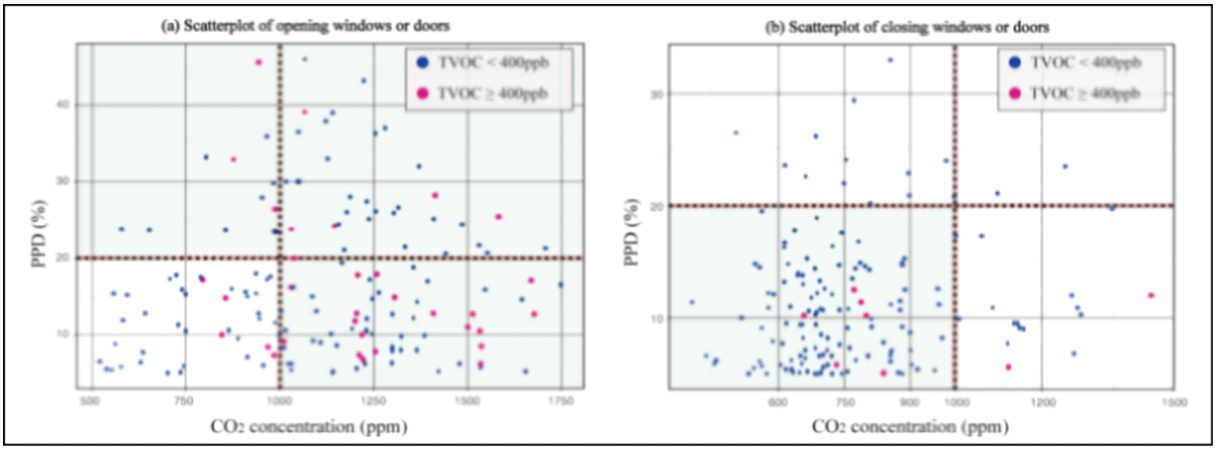
공인된 실내환경권고기준과 비교하여, 수집된 모니터링데이터의 준수율을 평가하였다. 환기를 시작하고 종료할 시점에 측정의 각각의 실내환경변수가 각 권고기준에 부합하는지에 대한 준수율을 분석하였다([표 2-57] 참조).

[표 2-57] 실내환경권고기준에 따른 모니터링데이터의 준수율

실내환경권고기준		재실자 환기 행동				준수율
		환기 시작 (n=152)		환기 종료 (n=152)		
PPD	기준	20% ↑	20% ↓	20% ↑	20% ↓	59.2%
	데이터	43	109	15	137	
이산화탄소 농도	기준	1000ppm ↑	1000ppm ↓	1000ppm ↑	1000ppm ↓	76.9%
	데이터	100	52	18	134	
총휘발성유기 화합물 농도	기준	400ppb ↑	400ppb ↓	400ppb ↑	400ppb ↓	58.8%
	데이터	35	117	8	144	
미세먼지 농도	기준	50$\mu g/m^3$ ↑	50$\mu g/m^3$ ↓	50$\mu g/m^3$ ↑	50$\mu g/m^3$ ↓	47.6%
	데이터	8	144	15	137	
초미세먼지 농도	기준	25$\mu g/m^3$ ↑	25$\mu g/m^3$ ↓	25$\mu g/m^3$ ↑	25$\mu g/m^3$ ↓	47.3%
	데이터	49	103	57	95	

모니터링한 재실자의 환기행동과 비교하였을 때, 이산화탄소(CO_2)농도는 가장 높은 76.9 %의 준수율을 보였으며 예상 불만족도(PPD)와 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도는 59.2 %

와 58.8%의 준수율을 보였다. 반면에 미세먼지(PM10)농도, 초미세먼지(PM2.5)농도의 준수율은 50% 미만으로 나타났다. 즉, 환기를 시작할 때, 예상 불만족도(PPD), 이산화탄소(CO_2)농도, 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도는 실내환경에서 권고기준 이하로 떨어지는 경향이 있으나, 반대로 미세먼지(PM10)농도나 초미세먼지(PM2.5)농도는 오히려 권고기준을 초과하여 준수율이 50% 이하로 나타났다. 결과적으로 이산화탄소(CO_2)농도가 재실자의 환기행동에 가장 큰 영향을 주는 주요한 요인임을 알 수 있다. 보다 상세한 분석을 위해 준수율이 높은 3가지의 실내환경요인인 예상 불만족도(PPD), 이산화탄소(CO_2)농도 그리고 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도를 산점도로 표현하였다.



[그림 2-57] 환기 시작시점 및 종료시점의 예상 불만족도(PPD)및 이산화탄소(CO_2) 농도의 산점도

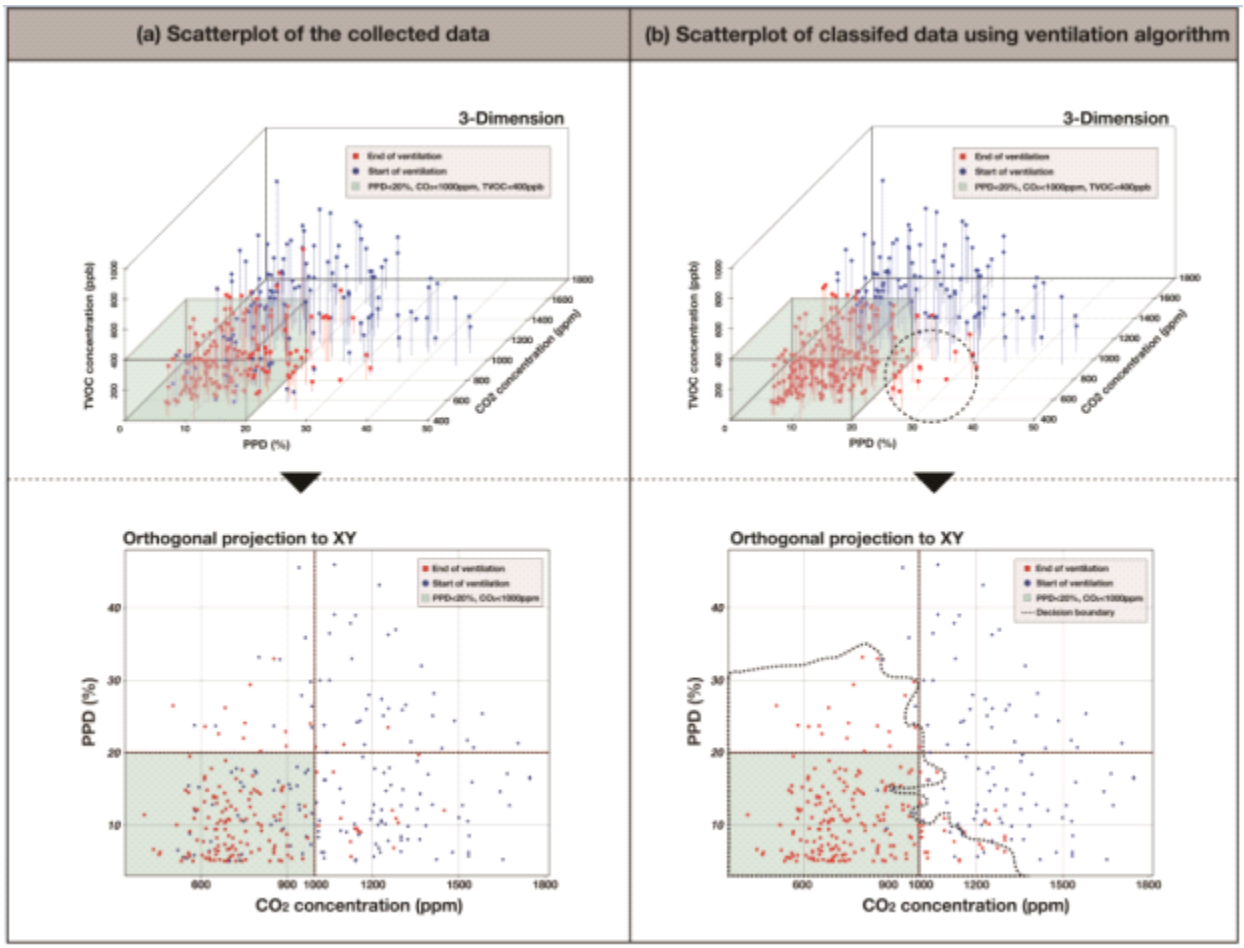
첫 번째로, [그림 2-57 (a)]는 환기를 시작하는 시점의 예상 불만족도(PPD)와 이산화탄소(CO_2)농도의 산점도이다. 그림의 녹색부분은 두 실내환경변수 중 하나가 권고기준을 초과했으므로 재실자가 알맞게 환기를 시작한 구역이다. 반대로 [그림 2-57 (b)]의 흰색부분은 권고기준을 초과하지 않았음에도 불구하고 재실자가 환기를 시작한 구역이다. 총 41/152 (26.97%)의 데이터가 흰색부분에 존재하였다. 41/152 (26.97%)의 데이터 중 총휘발성유기화합물(TVOCs)권고기준 (>400ppb)를 초과한 데이터인 7/152을 제외하면 총 34/152개 (22.37%)의 데이터가 산출된다.

즉, 3가지의 실내환경변수가 권고기준 한 변수라도 초과해도 환기를 시작한다고 가정하면, 전체 준수율은 77.63%이다. 두 번째로, [그림 2-57 (b)]는 환기를 종료할 시점의 예상 불만족도(PPD)와 이산화탄소(CO_2)농도의 산점도이다. 그림의 녹색부분은 실내환경권고기준을 준수하여 재실자가 알맞게 환기를 종료한 구역이다. 구역 내에서 총휘발성유기화합물(TVOCs)농도의 기준치를 초과한 데이터를 제외하면 115/152 (75.66%)의 데이터가 존재하였다. 즉, 실내환경권고기준에 따르면 환기를 종료하였을 때의 준수율은 75.66%이다.

③ 실내환경권고기준에 따른 자동환기 제어알고리즘의 성능

본 연구진은 자동환기제어알고리즘을 활용하여 환기를 제어할 경우, 실내환경권고기준에 의거하여 작동하는지에 대한 준수율을 분석하였다. 이를 위해, 실내환경권고기준에 따라, 모

니터링한 환경변수와 자동환기제어알고리즘을 통해 분류한 환경변수를 [그림 2-57]에서 표현하였다.



[그림 2-58] 모니터링 및 자동환기제어알고리즘을 통해 분류한 실내환경변수의 3차원 산점도

첫 번째로 [그림 2-58 (a)]는 모니터링한 실내환경변수의 3차원 산점도이다. 그림의 녹색부분은 환경변수들이 모두 실내환경권고기준을 준수한 구역이다. 환기를 시작하였을 때는 약 77.6%의 준수율을 보였다. 그리고 환기를 종료하였을 경우에는 75.6% 준수율을 보였다.

두 번째로, [그림 2-58 (b)]는 자동환기제어알고리즘을 통해 분류한 실내환경변수의 3차원 산점도이다. [그림 2-58 (b)]의 Decision boundary 안에 포함된 구역은 실내환경권고기준을 준수하였다. 환기를 시작하였을 때는 99%의 준수율을 보였다. 반대로 환기를 종료했을 때는 72.9%의 준수율을 보였다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

(1) 연구 목표

구분	내용
최종 목표	▪ 제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(IoT) 기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호 제품 개발 - 최종성과물의 기술성숙도: 8단계(실용화) - 최종성과물의 계획: '○○대학교'에서 실제 현장 적용 평가 계획
세부 목표	핵심성과 1. IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산기술' 개발 ▪ 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 ▪ 환기 시스템 크기, 유량, 필터를 고려한, '최적 설계 및 생산 기술' 개발 ▪ '최적설계 및 생산기술별' 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가
	핵심성과 2. IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발 ▪ 실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가 기술' 개발 ▪ 실시간 실내 공기질 및 온·습도 '모니터링 및 평가 기술' 개발 ▪ 웹/스마트기기 기반 '모니터링 장치'의 개발 · 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가
	핵심성과 3. IoT 기반 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발 ▪ 전력생산 최대화를 위한, '태양광 추적 기술' 개발 ▪ 실내 공기질 최적화를 위한, '환기 자동 제어 기술' 개발 ▪ 웹/스마트기기 기반 '자동제어 장치'의 개발 · 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가

(2) 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	• 박막 태양광 패널별 전력생산 효율의 최대화를 위한 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 • 창호형 환기 시스템의 실내 환기 성능을 최대화 할 수 있는 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	장비·장치	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온)	3	8
2	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	• '실시간 태양광 발전량 모니터링'을 위한 모니터링 지표 및 센서 네트워크 기술 개발 • '실시간 실내 공기질 및 온·습도 모니터링'을 위한 모니터링 지표 및 센서 네트워크 기술 개발	장비·장치	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온) · 공동 (Hong Kong PolyU)	3	8
3	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	• 태양광 추적 방식별 전력생산 효율의 최대화를 위한 '자동 제어 기술' 개발 • 실내 환기 방식별 실내 공기질 최적화를 위한 '자동 제어 기술' 개발	장비·장치	주관 (연세대) · 공동 (핸즈온) · 공동 (Hong Kong PolyU)	3	8

나. 목표 달성 여부

(1) 성과점검기준표 [총괄]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							목표 양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 타당성 분석	①	시나리오에 대한 경제성·환경성 분석	2건	2건	분석결과	보고서·논문게재	5	논문 : 2건 학술대회 : 1건 시제품 : 2건
공동			A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 프로토타입 모델 개발	②	프로토타입 모델 개발	1건	1건	프로토타입 모델	프로토타입 모델 개발	10	
주관			A-2	환기 시스템의 타당성 분석	①	시나리오에 대한 경제성·환경성 분석	2건	2건	분석결과	보고서·논문게재	5	
공동			A-2	환기 시스템의 프로토타입 모델 개발	②	프로토타입 모델 개발	1건	2건	프로토타입 모델	프로토타입 모델 개발	10	
주관			A-3	프로토타입 모델의 성능평가 및 실제 현장 적용 평가	①	성능평가	2건	2건	평가결과	보고서	5	
주관	B	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표 수립	①	모니터링 및 평가 지표	1건	1건	전문가 검증	보고서	5	학술대회 : 2건 시제품 : 1건
			B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	1건	1건	건수	보고서	10	
			B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 지표 수립	①	모니터링 및 평가 지표	1건	1건	전문가 검증	보고서	5	
			B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	1건	1건	건수	보고서	10	
공동			B-3	실시간 모니터링 장치 개발	①	장치 개발	1건	1건	건수	프로토타입 모델	5	
주관			B-3	실시간 모니터링 성능평가 및 실제 현장 적용 평가	②	성능평가	2건	2건	평가결과	논문게재	5	
주관	C	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	C-1	지역별/일별 태양광의 위치 DB 구축	①	기존 DB 수 증가율	166건	166건	건수	보고서	5	논문 : 1건 시제품 : 1건 인력양성 : 1건 소프트웨어 : 2건
			C-1	기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	1건	1건	소프트웨어	프로그램 등록	5	
			C-2	기계학습을 이용한 환기 자동제어 알고리즘 개발	①	알고리즘 개발	1건	1건	소프트웨어	프로그램 등록	5	
공동			C-3	자동제어 장치 개발	①	장치 개발	1건	1건	건수	프로토타입 모델	5	
주관			C-3	자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	②	성능평가	2건	2건	평가결과	보고서·논문게재	5	
계											100	논문 : 3건 시제품 : 4건 학술대회 : 3건 인력양성 : 1건 소프트웨어 : 2건

목표			목표 건수	달성 건수
양적 달성도 (사업연계지표)	1	국내·외 학술지 게재논문 건수 (SCI(E))	3	5
	2	시제품 제작 건수	4	7
	3	학술대회 발표 건수	3	7
	4	인력양성	1	2
	5	소프트웨어 등록 건수	2	3
	6	특허 등록 건수	-	1
	7	현장시험 건수	-	7

(2) 성과점검기준표 [1차년]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							목표 양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 타당성 분석	①	시나리오에 대한 경제성·환경성 분석	2건	2건	분석 결과	보고서	10	논문 : 1 건 시제품 : 1 건
공동			A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 프로토타입 모델 개발	②	프로토타입 모델 개발	1건	1건	프로토타입 모델	프로토타입 모델 개발	30	
주관	B	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표 수립	①	모니터링 및 평가 지표	1건	-1건	전문가 검증	보고서	10	학술대회 : 1 건
			B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	1건	1건	건수	보고서	20	
주관	C	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	C-1	지역별/일별 태양광의 위치 DB 구축	①	기존 DB 수 증가율	166건 (100%)	166건	건수	보고서	10	인력양성 : 1 건
주관	C		C-1	기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	-	1건	특허	특허	20	-
계											100	논문 : 1 건 시제품 : 1 건 학술대회 : 1 건 인력양성 : 1 건

목표			목표 건수	달성 건수
양적 달성도 (사업연계지표)	1	국내·외 학술지 게재논문 건수 (SCI(E))	1	1
	2	시제품 제작 건수	1	1
	3	학술대회 발표 건수	1	2
	4	인력양성	1	1
	5	특허 등록 건수	-	1

(3) 성과점검기준표 [2차년]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							목표 양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	A-2	환기 시스템의 타당성 분석	①	시나리오에 대한 경제성·환경성 분석	2건	2건	분석 결과	보고서	10	논문 : 1 건 시제품 : 1 건
공동			A-2	환기 시스템의 프로토타입 모델 개발	②	프로토타입 모델 개발	1건	2건	프로토타입 모델	프로토타입 모델 개발	20	
주관	B	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 지표 수립	①	모니터링 및 평가 지표	1건	1건	전문가 검증	보고서	10	학술대회 : 1 건
			B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	1건	1건	건수	보고서	20	
			B-3	실시간 모니터링 장치 개발	①	장치 개발	-	1건	건수	프로토타입 모델	10	
주관	C	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	C-1	기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발	②	알고리즘 개발	1건	2건	소프트웨어	프로그램 등록	10	소프트웨어 : 2 건
			C-2	기계학습을 이용한 환기 자동제어 알고리즘 개발	①	알고리즘 개발	1건	1건	소프트웨어	프로그램 등록	10	
			C-3	자동제어 장치 개발	①	장치 개발	1건	1건	건수	프로토 타입 모델	10	
계											100	논문 : 1 건 시제품 : 1 건 학술대회 : 1 건 소프트웨어 : 2 건

목표			목표 건수	달성 건수
양적 달성도 (사업연계지표)	1	국내·외 학술지 게재논문 건수 (SCI(E))	1	2
	2	시제품 제작 건수	1	3
	3	학술대회 발표 건수	1	2
	4	인력양성	-	1
	5	소프트웨어 등록 건수	2	3
	6	현장시험 건수	-	1

(4) 성과점검기준표 [3차년]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							목표 양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	A-3	프로토타입 모델의 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	①	성능 평가 (태양광 발전량 및 실내 공기질 개선 효과 제시)	2건	2건	평가 결과	보고서	20	학술대회 : 1 건
공동	B	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	B-3	실시간 모니터링 장치 개발	①	장치 개발	1건	1건	건수	프로토 타입 모델	20	시제품 : 1 건
주관			B-3	실시간 모니터링 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	②	성능 평가 (실시간 모니터링 및 평가 가능여부 검증)	2건	2건	평가 결과	보고서	20	
공동	C	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	C-3	자동제어 장치 개발	①	장치 개발	1건	1건	건수	프로토 타입 모델	20	논문 : 1 건 시제품 : 4 건
주관			C-3	자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	②	성능 평가 (IoT 기술을 이용한 태양광 추적 및 실내 환기 장치의 자동제어 기능 검증)	2건	2건	평가 결과	보고서· 논문게재	20	
계											100	논문 : 1 건 학술대회 : 1 건 시제품 : 2 건

목표			목표 건수	달성 건수
양적 달성도 (사업연계지표)	1	국내·외 학술지 게재논문 건수 (SCI(E))	1	2
	2	시제품 제작 건수	2	3
	3	학술대회 발표 건수	1	3
	4	현장시험 건수	-	6

(5) 핵심 연구 성과별 설명 (핵심성과 1)

핵심성과 1		
성과명	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	
정의	▪ 단위성과 1-1: 비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계(mono-Si) 및 CIGS계 박막 태양광 패널의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 ▪ 단위성과 1-2: 환기 시스템 크기, 유량, 필터를 고려한, '최적설계 및 생산 기술' 개발 ▪ 단위성과 1-3: '최적 설계 및 생산 기술별' 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	
목적	▪ 단위성과 1-1 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품 개발 시, 최대 전력생산 효율을 갖는 설계 및 생산기술의 개발이 필수적임. 본 연구는 박막 태양광 패널(비결정질 실리콘계(a-Si), 결정질 실리콘계 (mono-Si) 및 CIGS계)의 유형, 크기, 블라인드 간격, 전기 회로 방식 등 다양한 영향요인을 검토하여, 최적 설계 및 생산 기술을 개발하고자 함. ▪ 단위성과 1-2 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품 개발 시, 최적 실내 환기 성능을 갖는 설계 및 생산기술의 개발이 필수적임. 본 연구는 환기시스템의 크기, 유량, 필터 등 다양한 영향요인을 검토하여, 최적 설계 및 생산 기술을 개발하고자 함. ▪ 단위성과 1-3 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 실용화를 위하여, 설계 및 생산 기술에 대한 성능/경제성 평가 및 실제 현장 적용 평가를 수행하고자 함.	
관련 분야 기술 발전 기여도	(기존기술 수준) ▪ 기존 건물에 적용되는 태양광 시스템은 옥상·외피(벽면)에 적용을 목적으로 설계·생산됨. ▪ 기존 건물에 적용되는 환기 시스템은 매립형(덕트형) 방식이 대부분을 차지하고 있음. (개발기술 수준) ▪ 태양광 패널과 블라인드의 결합을 통한 차양 기능과 태양광 발전 기능을 모두 가능하게 함. ▪ IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은 신·기축 건물에 모두 적용 가능하며, 태양광 블라인드의 자체 생산 전력을 이용한 환기 시스템 가동이 가능함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	홍태훈(연세대학교), 강현웅(핸즈온테크놀러지)	
소요기간	▪ [단위성과 1-1] 2016.10.24 ~ 2017.06.27. (1차년도) ▪ [단위성과 1-2] 2017.06.28 ~ 2018.04.27. (2차년도) ▪ [단위성과 1-3] 2018.04.28 ~ 2019.04.27. (3차년도)	
성과달성 확인방법	▪ 박막 태양광 패널별 설계 시나리오에 대한 경제성·환경성 분석 (보고서, 논문게재) ▪ 박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 프로토타입 모델 개발 (프로토타입 모델) ▪ 환기 시스템의 설계 시나리오에 대한 경제성·환경성 분석 (보고서, 논문게재) ▪ 환기 시스템의 프로토타입 모델 개발 (프로토타입 모델) ▪ 프로토타입 모델의 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가 (보고서)	
성과달성에 따른 정량적 성과	논문	SCI(E) : 3건
	시제품	3건
	S/W	0건
	특허 출원/등록	0건
	신기술	0건
	기타	발표 : 2건
		현장 적용: 2건

(6) 핵심 연구 성과별 설명 (핵심성과 2)

핵심성과 2		
성과명	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	
정의	▪ 단위성과 2-1: 실시간 태양광 발전량 '모니터링 및 평가' 기술 개발 ▪ 단위성과 2-2: 실시간 실내 공기질 '모니터링 및 평가' 기술 개발 ▪ 단위성과 2-3: 웹/스마트기기 기반 '모니터링' 장치의 개발 · 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	
목적	▪ 단위성과 2-1 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품 개발 시, 실시간 태양광 발전량 모니터링 기술의 개발이 필수적임. 태양광 발전량 모니터링 지표 및 센서 네트워크 기술을 개발하고자 함. ▪ 단위성과 2-2 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품 개발 시, 실시간 실내 공기질 모니터링 기술의 개발이 필수적임. 실내 공기질 모니터링 지표 및 센서 네트워크 기술을 개발하고자 함. ▪ 단위성과 2-3 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 실용화를 위하여, 실시간 모니터링 및 평가 기술에 대한 성능평가 및 실제 현장 적용 평가를 수행하고자 함.	
관련 분야 기술 발전 기여도	(기존기술 수준) ▪ 옥상형 태양광 시스템에 적용하고 있는 고가의 태양광 모니터링 시스템임. ▪ 기존 매립형(덕트형) 환기 장치는 실내 온·습도를 측정하는 수준이며, 실내 공기질에 대한 모니터링 및 평가는 이루어지지 않고 있음. ▪ 기존 창호형 환기 장치의 대부분은 단순히 실내·외 환기만 가능한 수준임. (개발기술 수준) ▪ IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은 소프트웨어 프로그래밍을 통해, 저가의 태양광 모니터링 시스템을 개발하고자 함. ▪ IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은 실시간 실내 공기질 모니터링을 통한 실내 공기환경을 평가하고자 함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	홍태훈 (연세대학교), 강현웅 (핸즈온테크놀러지), Wang Shengwei (Hong Kong Polytechnic University)	
소요기간	▪ [단위성과 2-1] 2016.10.24 ~ 2017.06.27. (1차년도) ▪ [단위성과 2-2] 2017.06.28 ~ 2018.04.27. (2차년도) ▪ [단위성과 2-3] 2018.04.28 ~ 2019.04.27. (3차년도)	
성과달성 확인방법	▪ 태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표 (보고서) ▪ 태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘 개발 (보고서) ▪ 실내 공기질 모니터링 및 평가 지표 수립 (보고서) ▪ 실내 공기질 모니터링 및 평가 알고리즘 개발 (보고서) ▪ 실시간 모니터링 장치 개발 (프로토타입 모델) ▪ 실시간 모니터링 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가 (보고서)	
성과달성에 따른 정량적 성과	논문	SCI(E) : 0건
	시제품	2건
	S/W	0건
	특허 출원/등록	0건
	신기술	0건
	기타	발표 : 4건
		인력양성: 1건
		현장 적용: 2건

(7) 핵심 연구 성과별 설명 (핵심성과 2)

핵심성과 3		
성과명	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	
정의	▪ 단위성과 3-1: 전력생산 최대화를 위한, '태양광 추적' 기술 개발 ▪ 단위성과 3-2: 실내 공기질 최적화를 위한, '환기 자동 제어' 기술 개발 ▪ 단위성과 3-3: 웹/스마트기기 기반 '자동제어' 장치의 개발·성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	
목적	▪ 단위성과 3-1 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품 개발 시, 전력생산 효율의 최대화 를 위한 태양광 추적 기술 개발이 필수적임. 이를 위해, 본 연구는 하이브리드(위치·시간 기반 / 태양광 발전량 기반) 기반 방향(2축) 태양광 추적 기술을 개발하고자 함. ▪ 단위성과 3-2 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품 개발 시, 재실자를 고려한 최적 실내 공기환경을 제공하기 위한 자동 제어 기술 개발이 필수적임. 이를 위해, 본 연구는 기계학습을 이용한 환기량/실내 공기질 기반의 환기 자동제어 기술을 개발하고자 함. ▪ 단위성과 3-3 : IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 실용화를 위하여, 자동 제어 기술에 대한 성능평가 및 실제 현장 적용 평가를 수행하고자 함.	
관련 분야 기술 발전 기여도	(기존기술 수준) ▪ 옥상형 태양광 시스템에 적용할 수 있는 고가의 태양광 추적 시스템임. ▪ 기존 창호형 환기 장치의 대부분은 실내 공기환경에 대한 정보를 고려하지 않고, 환기 여부를 결정하는 방식임. (개발기술 수준) ▪ IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은 소프트웨어 프로그래밍을 통해 개발된 저가의 소형 태양광 추적 시스템임. ▪ IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품은 실시간 실내 공기질 모니터링 및 평가 정보를 이용하여, 재실자를 고려하여 환기 시스템을 자동 제어하는 방식임.	
성과달성 책임자 (소속기관)	홍태훈 (연세대학교), 강현웅 (핸즈온테크놀러지), Wang Shengwei (Hong Kong Polytechnic University)	
소요기간	▪ [단위성과 3-1] 2016.10.24 ~ 2017.06.27. (1차년도) ▪ [단위성과 3-2] 2017.06.28 ~ 2018.04.27. (2차년도) ▪ [단위성과 3-3] 2018.04.28 ~ 2019.04.27. (3차년도)	
성과달성 확인방법	▪ 지역별/일별 태양광의 위치 DB 구축 (보고서) ▪ 기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발 (프로그램 등록) ▪ 기계학습을 이용한 환기 자동제어 알고리즘 개발 프로그램 등록) ▪ 자동제어 장치 개발 (프로토타입 모델) ▪ 자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가 (보고서, 논문게재)	
성과달성에 따른 정량적 성과	논문	SCI(E) : 2건
	시제품	2건
	S/W	3건
	특허 등록	1건
	신기술	0건
	기타	발표 : 1건
		인력양성: 1건
		현장 적용: 2건

다. 목표 미달성 시 원인 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

해당사항 없음.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발성과의 활용방안

<table>
<tr><th>구 분</th><th>내 용</th></tr>
<tr><td>기술
수요
처</td><td>본 연구의 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은, ① 제로에너지빌딩 구현을 위한, 자체전력 생산 효과, ② 재실자의 편의성·쾌적성·건강성 향상을 위한 최적의 실내 공기질 개선 효과를 모두 제공한다. 또한, 기존의 창호를 통해 위 모든 기능을 수행한다는 점에서, 신·기축 건물(주택, 교육시설물 등)에 모두 적용이 가능하다. 이를 기반으로, 다음과 같은 기술수요처를 고려해 볼 수 있다.
▪ 지자체: 지자체에서 관리하는 공공건물(관공서, 교육시설물 등)에 대한 에너지 자립도 및 실내 공기질 향상을 목적으로 하는 기술 수요처.
▪ 자가사용자: 개인 소유 건물(주택, 빌딩 등)의 에너지 자립도 및 실내 공기질 향상을 목적으로 하는 기술 수요처.
▪ 사업자: 태양광 발전 및 공기질 개선 사업을 통해, 수익을 창출하는 것을 목적으로 하는 기술 수요처.
 

에너지 자립도 및 실내 공기질 향상 / 에너지 자립도 및 실내 공기질 향상 / 태양광 발전 및 공기질 개선 사업을 통해 수익창출 / 에너지 자립도 · 실내공기질 향상 및 수익창출</td></tr>
<tr><td>현장
적용
방안</td><td>본 연구의 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은, 국내 실제 현장 적용을 통해, 생애주기비용과 환경비용 분석을 수행하고자 하며, 최종적으로 상용화 기반을 마련하고자 한다. 세부적인 수행 계획은 다음과 같다.
▪ 1단계: 실제 현장 적용을 위한, ○○대학교(주관 연구기관) 및 ○○건설(참여기관)과의 MOU 체결.
▪ 2단계: 최종성과물의 실제 현장 (① ○○대학교(주관 연구기관), ② ○○건설(참여기관)) 적용.
▪ 3단계: 실제 현장에 적용된 최종 성과물의 생애주기 및 환경 비용 분석을 통해, 상용화 기반 마련.
 

MOU 체결 / 'IoT 기반의 다기능 스마트 창호' 제품의 실제 현장 적용 / 실제 현장에 적용된 'IoT 기반의 다기능 스마트 창호' 제품의 생애주기 및 환경 비용 분석 / 'IoT 기반의 다기능 스마트 창호' 제품의 상용화 기반 마련</td></tr>
<tr><td>신산
업창
출</td><td>신(新)기후체제(POST-2020)의 출범과 함께, 우리나라는 2030년 온실가스 BAU 대비 37% 감축목표를 수립하였으며, 이에 대한 선제적 대응을 위해, 2030년 에너지 신산업 확산전략이라는 중장기 정책대안을 수립하였다. 본 전략에서는, 에너지 프로슈머, 분산형 청정에너지, ICT 융합, 온실가스 감축을 핵심 유도기술로 정의하고 있다. 본 연구에서 제안하는 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은, ① 창호를 통한 분산형 태양광 발전이 가능, ② IoT 기술의 융합을 통한, 최적의 실내 공기질 제공, ③ 에너지 프로슈머 및 온실가스 절감을 통한, 제로에너지빌딩 구현 등 다양한 신산업 창출에 기여할 수 있다.
▪ 그린리모델링 및 에너지절약전문기업(Energy Saving Company) 사업: 최종성과물을 요소기술(태양광 발전, 실내 공기질 개선 등)로 활용 가능.
▪ 대여 사업: 태양광 발전 및 공기질 개선 관련 대여 사업을 통한 신사업 창출 가능.
▪ 컨설팅 사업: 태양광 발전 및 실내 공기질 개선을 위한, 컨설팅을 수행하는 신사업 창출 가능.
 

그린리모델링사업 및 ESCO사업에 활용 / 'IoT 기반의 다기능 스마트 창호' 제품 대여 사업 / 태양광 발전 및 실내 공기질 컨설팅 사업 / 'IoT 기반의 다기능 스마트 창호' 제품 대여 및 컨설팅 사업을 통한 신산업 창출</td></tr>
</table>

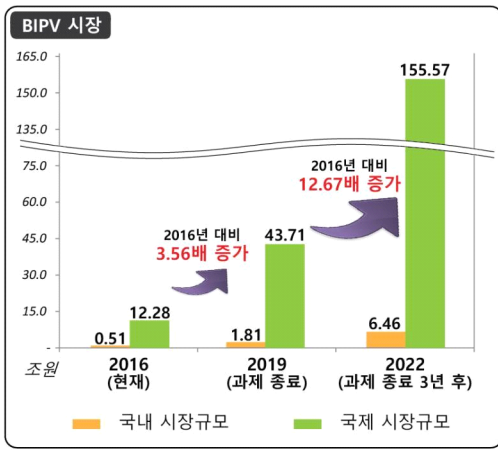
나. 연구개발성과의 활용방안

구분	내 용
산업적 측면	**기술의 시장성 (미래 BIPV 시장 확대 전망)**

▪ 국제 BIPV 시장의 경우, 2016년 시장 규모는 약 12조 2,813억원으로, 연평균 성장률 52.68%을 적용하였을 때, 2019년(과제 종료시) 43조 7,109억원(2016년 대비 3.56배), 2022년(과제 종료 3년 후) 155조 5,738억원(2016년 대비 12.67배)으로 예상됨.

▪ 국내 BIPV 시장의 경우, 2016년 시장 규모는 약 5,096억원으로, 세계시장 성장률과 동일하게 예측했을 때, 2019년(과제 종료시) 1조 8,138억원(2016년 대비 3.56배), 2022년(과제 종료 3년 후) 6조 4,556억원(2016년 대비 12.67배)으로 예상됨.

* 출처: 1) Building Integrated Photovoltaics Market 2012 (Nano market), 2) 신재생에너지 보도자료(에너지관리공단)

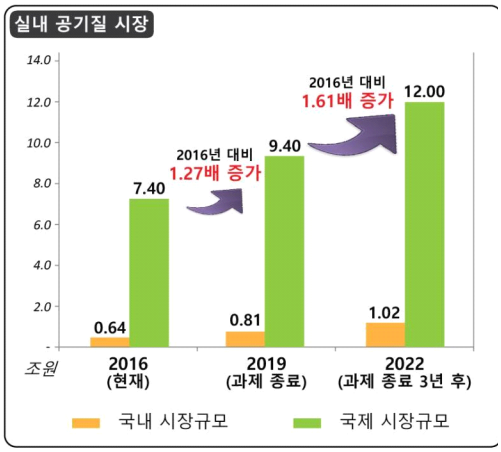


기술의 시장성 (미래 실내 공기질 시장 확대 전망)

▪ 국제 실내 공기질 시장(모니터링+환기시스템 시장)의 경우, 2016년 시장 규모는 약 7조4천억원으로, 연평균 성장률 8.3%을 적용하였을 때, 2019년(과제 종료시) 9조 4천억원(2016년 대비 1.27배), 2022년(과제 종료 3년 후) 12조원(2016년 대비 1.61배)으로 예상됨.

▪ 국내 실내 공기질 시장의 경우, 2016년도 시장 규모는 약 6,351억원으로, 세계시장 성장률과 동일하게 예측했을 때, 2019년(과제 종료시) 8,068억 원(2016년 대비 1.27배), 2022년(과제 종료 3년 후) 1조 247억원(2016년 대비 1.61배)으로 예상됨.

* 출처: 1) Global Indoor Air Quality Market 2016-2020 (Research and Markets), 2) 실내 공기질 관리 기본계획 2009~2013 (국토해양부 등 관계부처 합동).

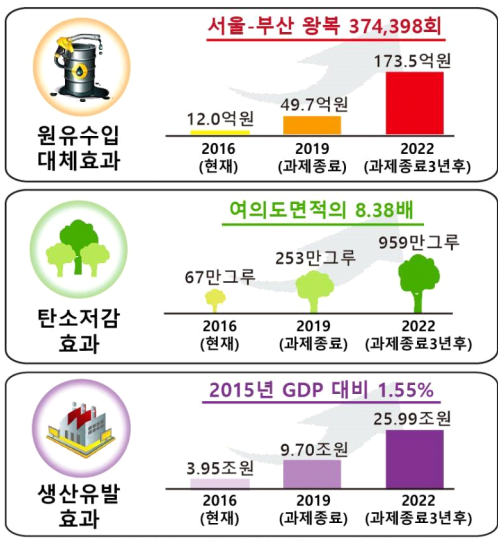


수입대체·산업유발 효과 (실내 공기질 시장 및 BIPV 시장 확대 전망 반영)

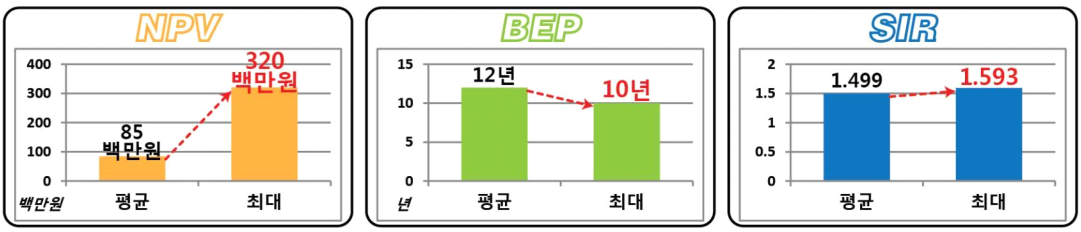
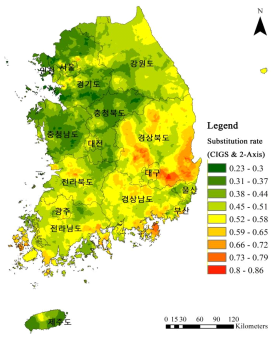
▪ 원유수입대체효과는 2019년 45억 7천만 원, 2022년 173억 5천만원이 예상됨. 2022년 대체량은 일반 승용차(연비 11km/L)가 서울-부산을 374,398회 왕복할 수 있는 양임.

▪ 탄소저감효과는 20년생 잣나무 기준(산림청 발표자료 CO_2 흡수량: 0.00453tCO_2)으로 2019년 253만 그루, 2022년 959만 그루를 대체하는 효과가 예상됨. 2022년 추정치는 여의도 면적(840만m^2)의 8.38배에 나무를 심어 얻은 탄소저감 효과와 동일함.

▪ 생산유발효과는 특정 제품 생산에 따른, 타 산업에 직·간접적으로 유발된 생산 효과를 의미함. 국내 실내 공기질 및 BIPV 시장 확대에 의한 생산유발 효과는 2019년 9조 7,000억 원, 2022년 25조 9,894억 원으로 예상됨. 이는, 2015년 GDP(2015년 국제통화기금 발표) 대비 1.55%에 해당하는 수준임.

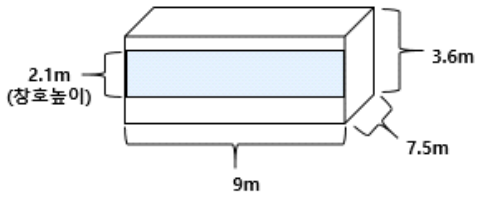


출처: 규제영향분석서(지식경제부), 산업연관분석표(한국은행)

<table>
<tr><th>구 분</th><th>내 용</th></tr>
<tr><td rowspan="6">경제적 측면</td><td colspan="2">생애주기(25년)비용 분석 (사례: 전국 초등학교 5,418 개교 대상)</td></tr>
<tr><td>분석 목표</td><td>▪ 전국에 위치한 초등학교를 대상으로, 본 연구의 최종성과물을 각 학급의 외측 창호에 적용했을 경우, 생산되는 경제적 효과를 생애주기비용 관점에서 분석하였다.</td></tr>
<tr><td>분석 대상</td><td>▪ 전국 5,418개 초등학교 대상 (총 109,574 학급(교실), 2,070,948.6 m^2 의 창 면적)</td></tr>
<tr><td>분석 조건</td><td>▪ 최종성과물의 유닛 정보: 사이즈=760mm(가로)*910mm(높이)*150mm(폭), 패널 용량(mono-Si: 117.08W/m^2), 패널 효율(mono-Si: 14.5%%), 손실률(3%), 추적방식=2축 추적방식, 환기 효율(임펠러 38mm Fan: 7.5 CFM/Unit), 환기 요구 전력(0.84W/Unit).
▪ 최종성과물의 유닛 가격: 약 34만원
- 패널 비용 (mono-Si: 80,000원/Unit), 프레임 비용 (50.000원/Unit), 태양광 컨트롤러 (20,000원/Unit), 에너지 저장장치 (80,000원/Unit), 서보모터 (54,000/Unit)), 센서 (11,111원/Unit), IoT기반 모니터링 시스템(20,000원/Unit), 환기 시스템(환기 팬 및 필터, 28,960원/Unit).
▪ 설치규모: 한 학급(창 면적: 9m(가로)*2.1m(높이)) 당, 총 18개 Unit 설치.
▪ 수익요소: (태양광 패널을 통한 총 전력 생산량) - (하루 6시간 환기 시스템 운영 및 제어에 소요되는 전력)을 최종성과물을 통한 최종 전력 생산량으로 설정하였다.</td></tr>
<tr><td>분석 지표</td><td>▪ 각 학교별, 생애주기관점에서의 현가(Net-Present-Value; NPV), 투자비용 회수기간(Break-Even-Point; BEP), 비용편익비(Saving-to-Investment Ratio; SIR)를 분석지표로 설정하였다.</td></tr>
<tr><td>분석 결과</td><td>▪ ① NPV: 전국 5,418개 초등학교 대상, 평균 NPV=84,623,970원, 최대 NPV=320,090,000원
▪ ② BEP: 전국 5,418개 초등학교 대상, 평균 BEP=12년, 최소 BEP=10년
▪ ③ SIR: 전국 5,418개 초등학교 대상, 평균 SIR=1.499, 최대 SIR=1.593
▪ 전국 5,418 개 모든 초등학교에서, 최종성과물의 경제적 타당성이 확보되었다. 결과적으로, NPV(25년) 측면에서, 총 458,492,670,000원의 경제적 순이익(=에너지절감비-유지관리비-초기투자비)이 발생할 것으로 분석된다.
 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">사회적 측면</td><td colspan="2">지역별 에너지 자립도 (사례분석: 전국 초등학교 5,418 개교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">▪ 전국 5,418개 초등학교를 대상으로, 최종성과물을 설치하였을 때, 생산되는 최종 전력 생산량(하루 6시간 환기 시스템 운영 및 제어에 소요되는 전력은 제외)을 기반으로, 지역별 에너지 자립도를 분석하였다.
▪ ① 남부지방(전라도, 경상도 등 2,580개교) 에너지 자립도: 평균 23%, 최대 80%.
▪ ② 북부지방(서울, 경기도 등 2,838개교) 에너지 자립도: 평균 17%, 최대 49%.
▪ 결과적으로, 최종성과물을 적용할 경우, 최대 80% 이상 에너지 자립형 건물을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.
* 초등학교의 전력소비량 구성비: 플러그부하(39.5%), 조명(36.0%), 난방(15.0%), 냉방(9.4%), 온수(0.1%)
* 출처: 1) Energy Policy, 2014, 73, 356-367. 2) Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014, 22(4), 462-478.
 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">실내 공기질 개선 효과 (사례분석: 초등학교 1개 학급 기준)</td></tr>
<tr><td colspan="2">▪ 전 세계적으로, 공기오염에 따른 사망자 수는 연간 700만 명에 달하며, 이 중 61.4%(430만 명, 전체 사망인구 중 13.3%)는 실내 공기질 오염이 주 원인으로 보고된다.
▪ 초등학교의 한 학급에 최종성과물을 설치할 경우(18개의 Unit 설치), 에너지 자립도 향상(평균 20%, 최대 80%)과 동시에, 환기기준(488CMH=21.6CMH/인(학교보건법 시행규칙)*22.6인(평균 초등학교 학급 인원))의 170%(832CMH)를 달성할 수 있을 것으로 분석되었다.
* 출처: 1) American Academy of Allergy Asthma & Immunity
 
</td></tr>
</table>

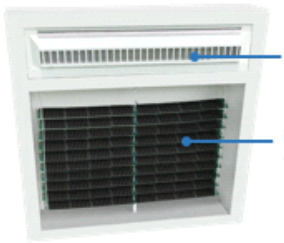
구분	내 용
발전량·환기량성능측면	**최종성과물의 순 발전량 평가**

국내 교실의 표준 규격 및 학교 당 교실 수



- 교실 표준 규격: 9m*7.5m*3.6m
- 교실 당 표준 창문 규격: 9m*2.1m
- 한 학교당 교실 수: 40개

프로토타입 모델의 일일 자체구동전력 및 생산 발전량



- 프로토타입 모델의 일일 발전량: 12.65 Wh/unit
- 프로토타입 모델의 일일 자체구동전력: 10.25 Wh/unit

▪ 초등학교 교실의 표준 규격(9m*7.5m*3.6m), 교실 당 표준 창문 규격(9m*2.1m) 그리고, 평균 학교 당 교실 수(약 40개)의 데이터를 수집한 후, 본 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)의 일일 자체구동전력(환기팬: 7.68Wh/일, 태양광 블라인드: 5.2Wh/일), 일일 발전량(12.65Wh/unit)으로 분석하였을 때, 아래의 표와 같은 순 발전량을 기대할 수 있다.

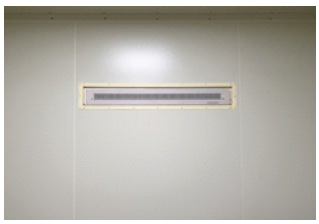
구분	표준 교실의 창에 모두 설치 시	표준 학교의 창에 모두 설치 시
일 발전량(Wh)	705.5	28,221.3
일 발전량(프로토타입모델의 사용전력 제외)(Wh)	623.5	24,941.3
휴대폰 완충 가능 대수(대)	31.2	1,247.1
노트북 완충 가능 대수(대)	8.9	356.3

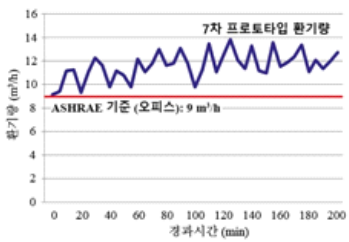
최종성과물의 환기량 평가

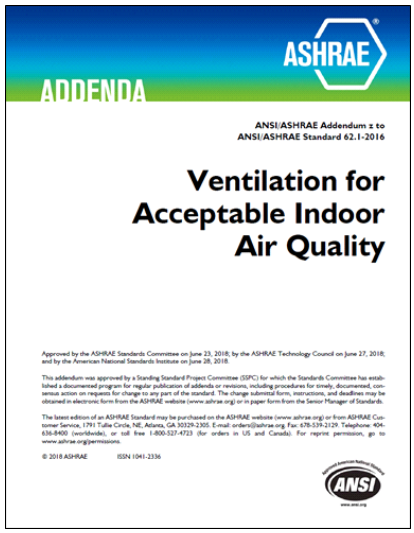
▪ 본 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)의 환기량(m^3/h)측면에서 기존의 요구량을 충족성능에 ASHRAE(미국공조냉동공학회) 기준에 의거하여 분석하였다.

▪ 최종성과물의 환기시스템의 환기량(m^3/h)은 인공기후챔버내에서, 이산화탄소 감쇠법(decay method)을 이용하여 분석하였다.

▪ 분석 결과, 환기시스템의 환기량(m^3/h)은 평균 11.53m^3/h, 최대 13.78m^3/h으로, ASHRAE기준치인 9m^3/h를 상회하는 성능을 기대할 수 있다. 따라서, 본 최종성과물을 설치하였을 때, 단순 자연환기만으로도, 실내 공기질을 요구수준에 맞출 수 있을 것으로 분석된다.

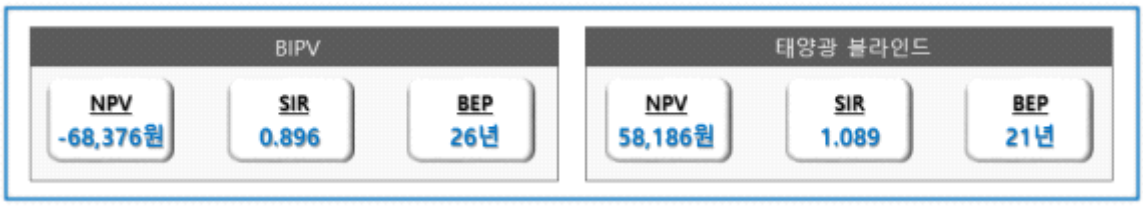


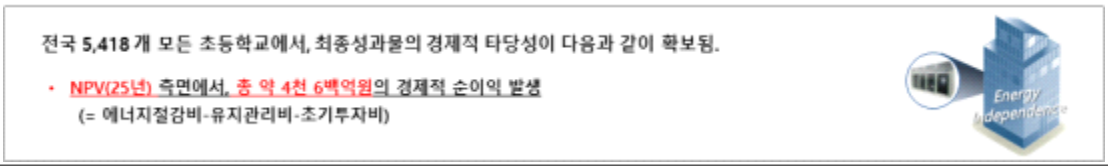




5. 연구개발성과의 향후 목표

가. 연구개발성과의 사업성 및 연구방향

<table>
<tr><th>구 분</th><th>내 용</th></tr>
<tr><td>사업 비교 분석</td><td>
본 연구의 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은, 기존 기술 대비 사업성 측면에 있어 유의한 수준의 경쟁력을 확보하였으며, 기존 기술인 BIPV 대비 가격 및 발전량은 다음과 같다.
▪ 연 단위 발전량 - 최종성과물 : 116,781Wh/m^2 ; BIPV : 80,619Wh/m^2
▪ 단가(1m^{2}당) - 최종성과물 : 613,889원/m^2(패널, 센서, 모니터링 시스템 포함) ; BIPV 552,500원/m^2
▪ 최종성과물이 BIPV 대비 단순 발전량은 1.45배, 단가 대비 발전량은 1.3배 우수함.
▪ 1m^2 단위를 기준으로 하였을 때, 각 항목별 NPV, SIR, BEP는 다음과 같다.


</td></tr>
<tr><td>사업 방향 제시</td><td>
본 연구의 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은, 신·기축 건물(주택, 교육시설물 등)에 모두 적용이 가능하나, 에너지 자립 및 지속적인 공기질 관리가 중요한 교육시설에 적용 시, 높은 설치효과를 기대할 수 있으며 개선효과를 지표화 하는 데 있어서도 용이하다. 따라서 본 연구에서는 전국 5,418개 초등학교에 최종성과물을 적용하고, 이에 대한 결과로 최대 80%의 에너지 자립도 달성 및, 기준치(488CMH) 대비 170%의 환기량 달성을 예상하였다(832CMH). 본 연구의 성과를 가시적으로 확보하고 결과물을 확장하기 위해, 지역별로 시범적용구역을 지정하여 운용하고 지자체별 운용 결과 및 달성 성과를 토대로 하여, 최종성과물의 적용범위를 교육기관에서 공공기관 등으로 확대하는 방향의 전략을 제시할 수 있다.


</td></tr>
<tr><td>유지 관리 및 차후 연구 방향</td><td>
본 연구의 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은, 향후 상용화를 위해 단가 및 성능 외에도 외관, 유지관리, 소음 등에 대해 다음과 같은 측면에서 고려하였다.
▪ 기존 모델 대비(1,345×780×150) 크기 감소를 달성하여(760×910×150), 적용범위 및 설치/시공 성능 개선
▪ IoT 기반 모니터링 및 알고리즘 개선을 통해, 개별 패널 모니터링 및 유지관리능력 확보.
▪ 국토교통부고시 제2017-558호 소음측정기준(KS F 2235를 참고); 기존 모델 대비 소음개선 달성 (실내 측정 기준 40dB 미만).


본 연구의 최종성과물(IoT 기반의 다목적 스마트 창호 제품)은 향후 태양광 패널 발전 효율의 증대 및 경량화에 따라, 현재 수준의 기술 대비 더 높은 성능을 보일 것이며 단가 절감 및 성능 향상으로 인한 최적화는 연구 결과물의 확장 및 고도화에 영향을 미칠 것이다. 또한 본 연구의 핵심 기술인 IoT 기반 모니터링은, 모듈의 발전 효율이 증가할수록 그 중요성이 더 커지며 적용 가능한 범위 또한 증가할 것이다. 따라서 본 연구의 연속성은 확장성 측면에서 모니터링 알고리즘 개선, 경제성 측면에서 패널 교체만으로 즉시 성능향상이 가능한 모듈 최적화에 기반을 둔다.
</td></tr>
</table>

6. 연구개발 추진체계

○ **주관연구기관**: 연세대학교 산학협력단 (타당성 분석, 지표 수립, 알고리즘 개발, 성능평가 담당)

○ **공동연구기관**: ㈜핸즈온테크놀러지 (프로토타입 모델 및 장치 개발 담당)

○ **공동연구기관**: The Hong Kong Polytechnic University (알고리즘 개발, 성능평가 담당)

가. 연구수행 체계도

연구개발과제	
과제명	제로에너지빌딩 구현을 위한, 사물인터넷(IoT) 기반의 태양광 블라인드와 능동형 환기시스템을 통합한 다기능 스마트 창호 제품 개발

기 관 별 참 여 현 황

구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	1	12	35
대 학	2	23	
국공립(연)	-	-	
출 연(연)	-	-	
기 타	-	-	

주 관 연 구 기 관	공 동 연 구 기 관	공 동 연 구 기 관
연세대학교 산학협력단	㈜핸즈온테크놀러지	The Hong Kong Polytechnic University
참 여 연 구 원	**참 여 연 구 원**	**참 여 연 구 원**
주관연구책임자(홍태훈)외 11명	공동연구책임자(강현웅) 외 11명	공동연구책임자(Wang Shengwei) 외 2명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
• IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 - 태양광 블라인드 및 환기 시스템의 타당성 분석, 성능평가 및 실제 현장 적용 평가 • IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발 - 모니터링 및 평가 지표 수립, 알고리즘 개발, 성능평가 및 실제 현장 적용 평가 • IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발 - 태양광 추적 및 환기 자동제어 알고리즘 개발, 자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가	• IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 - 태양광 블라인드 및 환기 시스템의 프로토타입 모델 개발 • IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발 - 실시간 모니터링 장치 개발 • IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발 - 자동제어 장치 개발	• IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발 - 성능평가 및 실제 현장 적용 평가 • IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발 - 모니터링 및 평가 알고리즘 개발, 성능평가 및 실제 현장 적용 평가 • IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발 - 자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가

참 여 기 업
㈜핸즈온테크놀러지, 대림산업㈜, ㈜이에이엔테크놀러지, ㈜한성윈도우

나. 성과 분배

구분	핵심연구성과		단위성과물	
주관 (연세대)	A	IoT 기반의 다기능스마트 창호 제품의 '최적 설계 및 생산 기술' 개발	A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 타당성 분석
공동 (㈜핸즈온테크놀로지)			A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 프로토타입 모델 개발
주관 (연세대)			A-2	환기 시스템의 타당성 분석
공동 (㈜핸즈온테크놀로지)			A-2	환기 시스템의 프로토타입 모델 개발
주광(연세대)/ 공동 (㈜핸즈온테크놀로지)/공동(홍콩폴리텍대학교)			A-3	프로토타입 모델의 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가
주관 (연세대)	B	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '실시간 모니터링 및 평가 기술' 개발	B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표 수립
주관 (연세대)			B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘 개발
주관 (연세대)			B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 지표 수립
주광(연세대)/ 공동 (㈜핸즈온테크놀로지)/공동(홍콩폴리텍대학교)			B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 알고리즘 개발
공동 (㈜핸즈온테크놀로지)/공동(홍콩폴리텍대학교)			B-3	실시간 모니터링 장치 개발
주관 (연세대)/공동(홍콩폴리텍대학교)			B-3	실시간 모니터링 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가
주관 (연세대)	C	IoT 기반의 다기능 스마트 창호 제품의 '자동 제어 기술' 개발	C-1	지역별/일별 태양광의 위치 DB 구축
주관 (연세대)			C-1	기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발
주관 (연세대)			C-2	기계학습을 이용한 환기 자동제어 알고리즘 개발
주광(연세대)/ 공동 (㈜핸즈온테크놀로지)/공동(홍콩폴리텍대학교)			C-3	자동제어 장치 개발
주광(연세대)/ 공동 (㈜핸즈온테크놀로지)/공동(홍콩폴리텍대학교)			C-3	자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가

다. 추진 일정

단위성과물		1차 연도				2차 연도				3차 연도			
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 타당성 분석												
A-1	박막 태양광 패널별 태양광 블라인드의 프로토타입 모델 개발												
A-2	환기 시스템의 타당성 분석												
A-2	환기 시스템의 프로토타입 모델 개발												
A-3	프로토타입 모델의 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가												
B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 지표 수립												
B-1	태양광 발전량 모니터링 및 평가 알고리즘 개발												
B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 지표 수립												
B-2	실내 공기질 모니터링 및 평가 알고리즘 개발												
B-3	실시간 모니터링 장치 개발												
B-3	실시간 모니터링 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가												
C-1	지역별/일별 태양광의 위치 DB 구축												
C-1	기계학습을 이용한 태양광 추적 알고리즘 개발												
C-2	기계학습을 이용한 환기 자동제어 알고리즘 개발												
C-3	자동제어 장치 개발												
C-3	자동제어 성능 평가 및 실제 현장 적용 평가												

붙임. 참고 문헌

[1] 국토교통부, 제1차 녹색건축물 기본계획 (2014)

[2] 환경부, 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안 (2018)

[3] 한국건설기술연구원, 제로에너지건축물 활성화를 위한 제도개선 및 지원방안 연구 (2017)

[4] Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. Energy and buildings, 128, 198-213.

[5] Pless, S., & Torcellini, P. (2010). Net-zero energy buildings: A classification system based on renewable energy supply options (No. NREL/TP-550-44586). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

[6] GhaffarianHoseini, A., Dahlan, N. D., Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., Makaremi, N., & GhaffarianHoseini, M. (2013). Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 1-17.

[7] Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. Building and environment, 40(3), 353-366.

[8] Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications–a review. Applied energy, 115, 164-173.

[9] Adib, R., Murdock, H. E., Appavou, F., Brown, A., Epp, B., Leidreiter, A., ... & Farrell, T. C. (2015). Renewables 2015 global status report. Paris: REN21 Secretariat.

[10] 한국전기산업진흥회, 해외지역별 에너지신산업 유망시장분석 및 수출사업화 지원방안 연구 (2017)

[11] Zhou, B., Li, W., Chan, K. W., Cao, Y., Kuang, Y., Liu, X., & Wang, X. (2016). Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 30-40.

[12] Mumford, J. L., He, X. Z., Chapman, R. S., Harris, D. B., Li, X. M., Xian, Y. L & Chuang, J. C. (1987). Lung cancer and indoor air pollution in Xuan Wei, China. Science, 235(4785), 217-220.

[13] Hernandez, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). Energy and Buildings, 42(6), 815-821.

[14] FreeCleanSolar. <http://www.freecleansolar.com>

[15] 해줌. <http://haezoom.com>

[16] Korea Energy Management Corporation (KEMCO), New & renewable energy white paper (2014)

[17] Korea Communications Agency (KCA), Trends and prospects of CIGS thin-film photovoltaic cell technology (2014)

[18] Korea Institute for Industrial Economics & Trade (KIET), Competition structure analysis and cooperation plan of photovoltaic industry between Korea and China (2013)

[19] C. Park, Market trend of thin-film photovoltaic cell by the technology type, and expect ation of commercialization, Korea Inst Sci Technol Inf (KISTI) Mark Rep, 4 (1) (2014), pp. 3-6

[20] Energy Informative, Solar panels and home energy efficiency <http://energyinformativ e.org>

[21] C. Koo, T. Hong, M. Lee, H.S. Park, Estimation of the Monthly Average Daily Solar Radiation using Geographic Information System and Advanced Case-Based Reasoning, Environ. Sci. Technol. 47 (2013) 4829 - 39.

[22] N. Nassif, S. Kajl, R. Sabourin, Ventilation Control Strategy Using the Supply CO2 Concentration Setpoint, HVAC&R Research 11 (2005) 239 - 62.

[23] I. Holmer, H. Nilsson, G. Havenith, K. Parsons, Clothing convective heat exchange —proposal for improved prediction in standards and models, Ann. Occup. Hyg. 43 (1999) 329 - 37.

[24] M.V. Nielsen, S. Svendsen, L.B. Jensen, Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight, Sol. Energy 85 (2011) 757 - 68.

[25] S. Grynning, A. Gustavsen, B. Time, B.P. Jelle, Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?, Energy Build. 61 (2013) 185 - 92.

[26] Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, Window design guideline for saving energy consumption (2012)

[27] Ministry of Education (ME), Standard classroom design in 1980s (1980)

[28] D.K., Kim, K.C. Yoon, G.S. Choi, K.S. Kim, Evaluation of G-value in accordance with the Change of Glazing and Shading Transmittance, J. Kor. Inst. Arch. Sustain KIAEBS (2010) 180 - 3.

[29] ANSYS FLUENT <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

[30] van Hooff, T., & Blocken, B. (2013). CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO2 gas dispersion from a semi-enclosed stadium. Building and Environment, 61, 1-17.

[31] Li S., A maximum power point tracking method with variable weather parameters based on input resistance for photovoltaic system, Energy Convers. Manag., 106 (2015), pp. 290-299.

[32] Ma J., Man K.L., Ting T.O., Zhang N., Lei C.U., Wong N., A hybrid MPPT method for Photovoltaic systems via estimation and revision method, Proceedings of the IEEE Inter national Symposium on Circuits and Systems (2013), pp. 241-244.

[33] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro, Review of the maximum power point trackin g algorithms for stand-alone photovoltaic systems, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 90 (2006), pp. 1555-1578.

[34] J. Antonanzas, R. Urraca, F.J. Martinez-de-Pison, F. Antonanzas, Optimal solar tracking strategy to increase irradiance in the plane of array under cloudy conditions: a study across Europe, Sol. Energy, 163 (2018), pp. 122-130.

[35] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmee, Seasonal effect of dust on the

degradation of PV modules performance deployed in different climate areas, Renew. Energy, 111 (2017), pp. 105-115.

[36] D.H. Daher, L. Gaillard, M. Amara, C. Ménézo, Impact of tropical desert maritime climate on the performance of a PV grid-connected power plant, Renew. Energy, 125 (2018), pp. 729-737.

[37] Kim, J., Hong, T., Jeong, J., Koo, C., & Kong, M. (2017). An integrated psychological response score of the occupants based on their activities and the indoor environmental quality condition changes. Building and Environment, 123, 66-77.

[38] M. Caramia, P. Dell'Olmo, Multi-objective management in freight logistics: increasing capacity. In Service Level and Safety with Optimization Algorithms, Springer London, London, 2008.

[39] A. Konak, D.W. Coit, A.E. Smith, Multi-objective optimization using genetic algorithms : A tutorial, 91 (2006) 992 - 1007. https://doi:10.1016/j.ress.2005.11.018.

[40] F. Alabsi, R. Naoum, Fitness Function for Genetic Algorithm used in Intrusion Detection System Firas Alabsi, 2 (2012) 129 - 134.

[41] L.S.A. Patricia Cohen, P. Cohen, S.G. West, Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd Edition, 2014.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.