

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D / 20CTAP-C152916-02

에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발 최종보고서

2021. 01. 20.

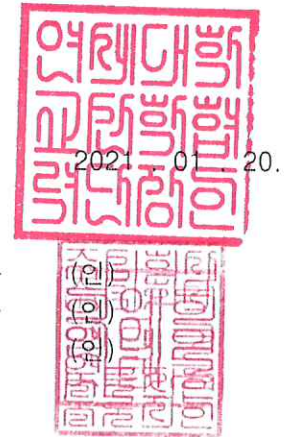
주관연구기관 / 연세대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)이에이엔테크놀로지

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발’(연구개발 기간 : 2019. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.



주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이 충 용
공동연구기관명 : (주)이에이엔테크놀로지 (대표자) 신 지 웅
참 여 기 관 명 : (주)이에이엔테크놀로지 (대표자) 신 지 웅

주관연구기관책임자: 홍 태 훈
공동연구기관책임자: 신 지 웅
참여기관책임자: 신 지 웅

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C152 916-02	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. ~ 2020.12.31.	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발			
연구책임자	홍 태 훈	해당단계 참여연구원 수	총: 16명 내부: 13명 외부: 3명	해당단계 연구비	정부: 206,000천원 민간: 69,000천원 계: 275,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 18명 내부: 15명 외부: 3명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 124,000천원 계: 494,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	연세대학교 산학협력단			참여기업명: (주)이에이엔테크놀로지	
국제공동연구	상대국명: 해당사항 없음			상대국 연구기관명: 해당사항 없음	
위탁연구	연구기관명: 해당사항 없음			연구책임자: 해당사항 없음	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당사항 없음
-------------------------	---------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호			-	-		-	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약 ■ 연구 목표 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어(P2P energy trading Business model Evaluation Software; P2P-BES) 개발 ■ 세부 목표 1. 커뮤니티 기반 '분산형 발전의 기술성 평가 기술' 개발 2. 커뮤니티 기반 '에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술' 개발 3. 커뮤니티 기반 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술' 개발	보고서 면수 66쪽
---	---

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구에서는 커뮤니티 기반의 「분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어(P2P energy trading Business model Evaluation Software; P2P-BES)」를 개발하고자 한다. ○ P2P-BES는 기존 분산형 에너지 사업 모델의 방식을 단방향 거래에서 양방향 거래로 확대함과 동시에, 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델에 따른 경제성 및 사업성에 대한 종합적인 평가를 가능하게 하는 통합 소프트웨어로서, 정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 모두에게 맞춤형 에너지 거래 솔루션을 제공할 수 있다. ○ 본 연구는 에너지 프로슈머를 통한 전력거래시장의 확대를 위한 방안으로, 분산형 태양광 발전에 대한 기술성, 경제성 및 사업성을 복합적으로 고려하여 현실적인 솔루션을 제공할 수 있는 통합 소프트웨어를 개발하고자 한다. 이를 위하여, 본 연구는 다음과 같이 크게 3개의 부문으로 구성된다. ○ 첫째, 커뮤니티 기반 '분산형 발전의 기술성 평가 기술' 개발 ○ 둘째, 커뮤니티 기반 '에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술' 개발 ○ 셋째, 커뮤니티 기반 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술' 개발																																						
연구개발성과	○ 본 연구의 최종성과물인 「분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어(P2P-BES)」는 분산형 태양광 발전의 기술성뿐만 아니라, 양방향 전력거래 사업 모델에 따른 경제성 및 사업성에 대한 종합적인 평가를 가능하게 하는 통합 소프트웨어이다. ○ 본 연구에서는, 최종성과물에 대한 기술성숙도(Technical Readiness Level; TRL) 유형을 '소프트웨어'로, 최종목표를 실험 단계(부품/시스템 성능 검증)인 '4단계'로 수립하였다. <연구개발성과 유형> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구시설 · 장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트웨 어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr> <tr> <th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr> </tbody> </table>											구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨 어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	성과 (N/Y)	Y	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N
구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨 어	화합물	생명자원		신품종																													
								생명 정보	생물 자원	정보	실물																												
성과 (N/Y)	Y	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N																												
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 연구의 최종성과물은 분산형 태양광 발전에 대한 정부의 중장기 정책 수립, 사용자(프로슈머/컨슈머)의 수요 증대 및 민간기업의 투자 유치를 유도하는데 활용할 수 있으며, 궁극적으로, 양방향 에너지 거래에 대한 신(新)시장 창출 및 에너지 프로슈머 활성화에 기여할 수 있다. ○ 본 연구의 최종성과물은 커뮤니티 기반의 분산형 태양광 발전 설비의 보급을 활성화시킴으로써 에너지 자립도를 증가시킬 수 있으며, 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)가 가능한 전력거래시장을 제공함으로써 전력계통에 의존하지 않는 독립적인 에너지 네트워크를 구축할 수 있다.																																						
국문핵심어 (5개 이내)	에너지 프로슈머	분산형 발전	에너지 개인 간 거래	사업 모델	태양광																																		
영문핵심어 (5개 이내)	Energy prosumer	Distributed generation	Peer-to-Peer energy trading	Business model	Solar																																		

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
2. 연구수행내용 및 성과	18
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	54
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	62

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구의 배경

- 1973년의 세계적인 석유파동은 기존의 소수에 의해 독점되는 전력시장 구조의 위기대처능력에 의문을 품게 만들었으며, 그 결과 1980년대 이후 대규모 중앙 발전소와 더불어 전력수요가 많은 곳을 위주로 분산형 발전의 보급이 확산되기 시작하였다. 분산형 발전은 전력 수요지 근처에 위치함으로써, 기존의 중앙 집중식 발전에 비해 ①생산된 전기를 수요지까지 공급하는데 필요한 인프라 구축 및 운영 비용을 대폭 절감할 수 있고, ②송배전 과정에서 무효전력으로 인한 에너지 손실도 줄일 수 있으며, ③광역정전을 방지해 전력계통의 신뢰성을 높일 수 있다.
- 분산형 발전이 늘어남에 따라, 기존의 에너지 생산자 및 소비자의 구분이 점차 사라지고, 에너지 소비자가 생산자의 역할도 하는 ‘에너지 프로슈머’의 개념이 점차 대두되고 있다. 에너지 프로슈머의 등장에 따른 전력시장의 변화는 다음과 같다.

구분	현재	미래
에너지흐름	▪ 단방향	▪ 양방향
계통	▪ 소수계통을 다수가 이용	▪ 다수 계통을 다수가 이용
	▪ 계층적 구조	▪ 네트워크 구조
소비자역할	▪ 에너지 소비	▪ 에너지 생산, 소비, 저장
공급자역할	▪ 에너지 공급, 거래, 고객관리, 요금청구	▪ 리스크관리, 거래, 고객관리, 요금청구, 자산관리, 컨설팅
소비자 가격	▪ 고정적, 연료비에 따라 변동	▪ 변동성 증가
리스크부담	▪ 공급자	▪ 프로슈머, 중개사업자

- 제 21차 유엔기후변화협약 당사국총회에서 합의된 파리기후변화협약을 통해, 신(新)기후체제 [POST-2020]가 출범하였고, 우리나라는 2030년 BAU 대비 37% 감축목표를 설정하였다. 이에 대응하기 위해, 우리나라는 2030년 에너지 신산업 확산전략이라는 중장기 정책대안 수립하였다. 본 전략에서는 ①현재 한국전력공사에서 일괄적으로 생산 및 공급하던 전력시장에서 누구나 전력을 생산하고 팔 수 있는 개인 간 거래 시장의 개설, ②소규모 도지역을 중심으로 마이크로 그리드 활성화를 통한 전력 자체수급 등 기존 에너지 산업의 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 에너지 분야의 과감한 혁신이 요구되는 본 시점에서, 국가 중장기 정책에 부합하는, 커뮤니티 기반의 에너지 수급 및 거래를 위한 전략이 수립되어야 한다.

나. 연구개발의 필요성

- 미국에서는 2017년 기준 누적 신재생에너지 설비용량이 230.0GW로 총 발전용량의 19.3%를 차지한다. 반면 우리나라는 2017년 기준 누적 신재생에너지 설비용량이 15.7GW로 총 발전용량의 약 12.9%에 불과하여 아직 미비한 실정이다. 분산형 태양광 발전설비의 설치량을 증가시키기 위해서는 분산형 태양광 발전설비를 설치한 에너지 프로슈머에 대한 적절한 보조금 지원, 수익성 분석 및 평가 등의 전략이 건물 또는 커뮤니티 기반으로 수립되어야 하나, 아직까지는 이러한 전략 수립 지원을 위한 통합 기술 또는 시스템이 미흡한 실정이다.
- 현재 국내에서 시행되고 있는 신재생에너지 발전설비를 통한 전력거래방법은 크게 상계거래제도(자가용)와 전력수급계약(자가용, 발전사업용)으로 나눌 수 있다. 이는 모두 한국전력공사와 거래하는 방식으로, 같은 전력망으로 연결되어 있더라도 개인 간 거래가 불가능하며, 전력거래가격 역시 한국 전력공사에서 정한다는 한계점이 있다. 한편, 2016년부터 실증단지에서 프로슈머 이웃 간 전력거래를 시범운영하였으나, 시범사업단계를 넘어 산업화단계로 확장하기 위해서는, 프로슈머와 컨슈머

가 상생할 수 있는 자생적 시장 생태계가 조성되어야 한다.

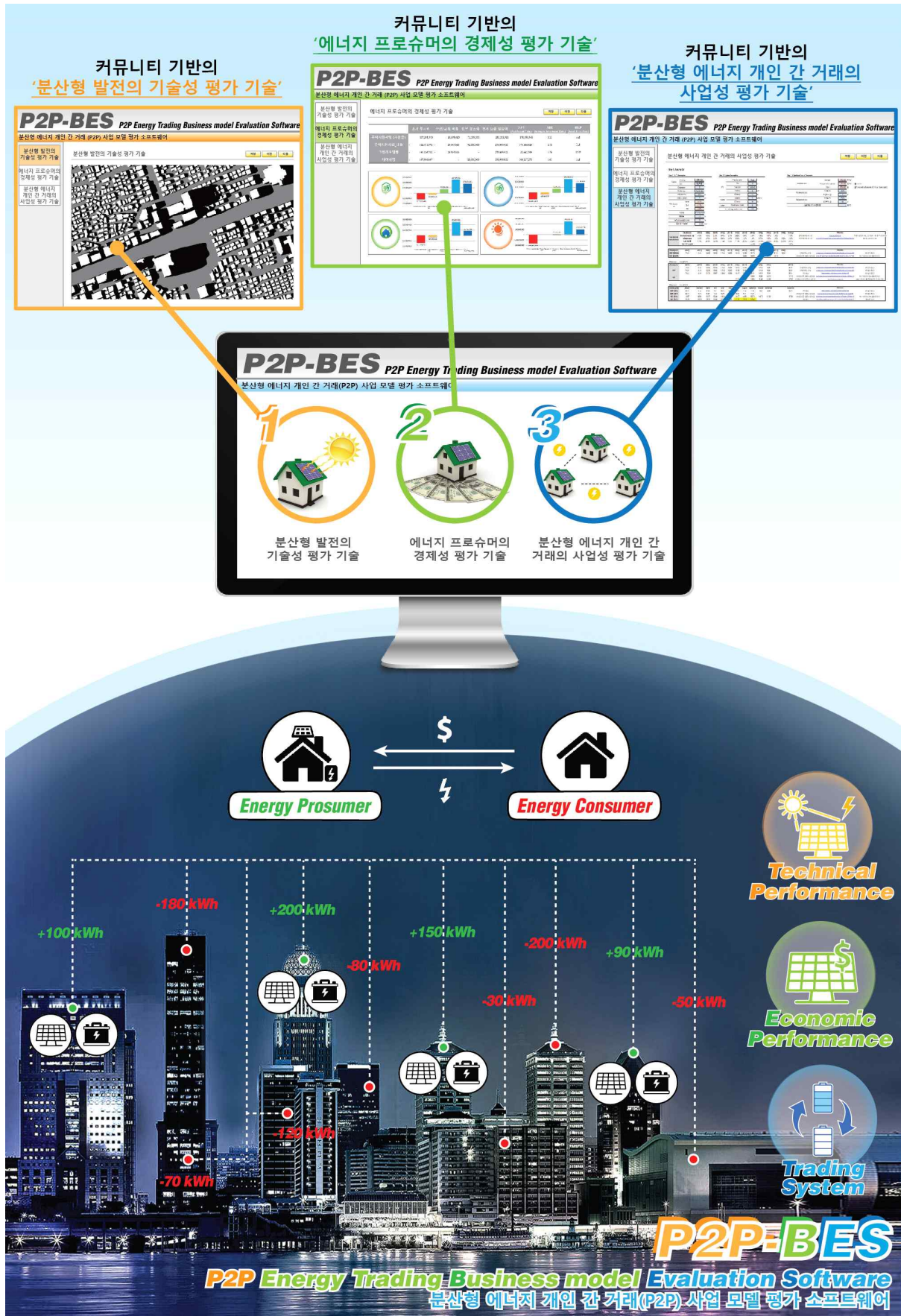
- 이와 같이, 에너지 프로슈머를 통한 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 시장을 확장하고 활성화시키기 위해서는, 분산형 태양광 발전설비의 기술성 및 경제성 평가를 통해 설치를 적극적으로 지원해야 하며, 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델에 따른 사업성 및 에너지 자립도 평가를 통해 정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 모두에게 맞춤형 솔루션을 제공할 수 있는 통합 소프트웨어가 필요하다.



다. 연구개발의 목표

- 기존의 태양광 발전 사업 모델은, ①기술적 이유(정확한 태양광 발전량 예측의 어려움), ②경제적 이유(초기투자비에 대한 부담 및 수익성 확보의 불확실성), ③사업적 이유(분산형 에너지 발전을 통한 전력거래의 한계 및 제한적인 거래대상)로 인하여, 건물에서의 도입범위가 제한될 수밖에 없는 한계점이 있다. 즉, 기존 태양광 발전 사업 모델을 이용하여, 전체 건물 태양광 발전 잠재량 중에서, 일부분만을 활용하고 있는 상황이다.
- 따라서, 건물 태양광 발전 잠재량 활용을 극대화하고, 에너지 프로슈머를 통한 전력거래시장의 확대를 위해서는, 기존 태양광 발전 사업 모델의 도입범위를 단일 건물에서 커뮤니티 단위로 확대함과 동시에, 다음의 세 가지 측면을 복합적으로 고려하여 현실적인 솔루션을 제공할 수 있는 통합 소프트웨어를 개발해야 한다. 첫째, 건물 특성 및 음영을 고려한 실질적인 태양광 발전량을 평가함으로써, 에너지 프로슈머를 통한 전력거래의 적용범위를 검토해야 한다. 둘째, 에너지 프로슈머뿐만 아니라 컨슈머의 수익구조를 함께 분석하여, 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 프로슈머/컨슈머의 수익성을 평가해야 한다. 셋째, 최종적으로, 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 사업성을 평가함으로써, 정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 맞춤형 에너지 거래 솔루션을 제공해야 한다.
- 이를 통해, 커뮤니티 기반의 분산형 태양광 발전 설비의 보급을 활성화시킴으로써 에너지 자립도를 증가시킬 수 있으며, 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)가 가능한 전력거래시장을 제공함으로써 전력계통에 의존하지 않는 독립적인 에너지 네트워크를 구축할 수 있다.





[그림 1-1]. 연구의 개념도

라. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

(1) 국내·외 정책현황

(가) 국내 정책현황

- 전 세계적으로 기후 변화가 이슈화 되면서, 기존의 선진국 중심의 대응에서 개발도상국까지 포함한 신(新)기후체제[POST-2020]가 수립되었다. 이러한 국제적 흐름에 따라, 에너지 시장의 무게중심이 기존 화석연료에서 신재생 에너지로 빠르게 이동하고 있다. 이러한 에너지 패러다임 전환에 따라, 국내에서는 대규모의 에너지 신(新)시장을 창출하고, 분야별 에너지 신(新)산업을 확산시키기 위한 계획을 수립하고 있다.
- 국내에서 신재생 에너지 발전 비중을 높이고 분산형 에너지를 확산시키기 위하여, 시행 중인 주요 정책은 다음과 같다.
 - **2030 에너지 신산업 확산전략('15.11):** 신(新)기후체제[POST-2020] 대응 및 에너지 신(新)산업 확산을 위한 전략으로, 산업통상자원부에서 2030년까지 총 100조 원 규모의 에너지 신(新)시장 및 총 50만 개의 일자리를 창출하고, 총 5,500만 톤의 온실가스를 감축하는 것을 목표로 발표하였다. 본 전략은 기존 전력 시스템의 효율을 높이고 다양한 사업자가 참여 가능한 에너지 시장을 조성하는 등의 방안을 담고 있다. 특히, 다음과 같이 총 4 가지 분야(에너지 프로슈머, 전력, 수송, 산업)별 전략을 제시하고 있다.
 - ① 에너지 프로슈머: 누구나 에너지를 생산하고 판매할 수 있는 시장 조성 및 활성화
 - ② 전력 분야: 저탄소 발전을 중심으로 전력 산업 확대
 - ③ 수송 분야: 2030년까지 순수 전기차 100만대 이상 확산
 - ④ 산업 분야: 온실가스 감축을 위한 친환경 공정으로의 전환
 - **프로슈머-이웃간 전력거래 실증사업('16.3):** 산업통상자원부와 한국전력공사에서 시행중인 실증사업으로, 이를 통해 에너지 프로슈머 사업의 확장성을 검토하고 있으며, 추후 다양한 건물 유형에 설치된 태양광 및 풍력 발전설비에서 생산된 소규모 전력을 자유롭게 팔 수 있는 '에너지 프로슈머 전력거래시장'을 신설하여 운영할 계획이다.
 - **재생에너지 3020 이행방안('17.12):** 산업통상자원부에서 2030년까지 재생에너지 발전량 비중 20% 달성을 목표로 발표하였다. 특히, 발표된 계획안은 태양광 및 분산형 에너지 발전에 무게가 실려있으며, 주요 내용은 다음과 같다.

구분	세분	주요내용
국민참여 확대	도시형 태양광	- 상계거래제도 개선 - 제로에너지건축물 인증 의무화
	협동조합 등 소규모 사업	- 한국형 FIT - REC 가중치 혜택
	농촌태양광	농촌진흥구역 내 태양광 발전시설 설치
지자체 주도의 계획입지제도 도입	-	- 신재생 에너지 발전설비 지구 조성 - 지역 주민 및 협동조합에 우선권 부여
대규모 프로젝트 추진	-	일정비율 이상의 주민 참여시 인센티브를 부여

(나) 국외 정책현황

- 유럽연합(EU), 중국, 일본 등 주요국들에서는 신재생 에너지의 역할 확대가 경제 성장과 화석 연료에 대한 수요 감소를 위한 가장 효율적인 방안임을 인식하고, 기존의 수력 중심의 신재생 에너지 공급 구조에서 태양광 및 풍력의 역할이 증가하는 구조 전환이 이루어지고 있다(세계 에너지현안 인사이트, 2018).
- 특히, 남부유럽, 독일 등 선진국에서는 CO₂ 배출량 감축, 에너지 전환 등의 성공에 에너지 프로슈머의 역할이 매우 중요하다고 판단하였으며, 관련 연구소 혹은 국제기구에서는 관련 정책의 가이드라인, 권고사항, 규제 프레임워크 및 프로슈머 보호 방안 등에 대한 연구 결과를 제시하였다(독일경제구조연구소, 2017; 독일연방경제에너지부, 2016; 에너지 커뮤니티, 2018).
- 특히, 주요 선진국에서의 신재생 에너지 및 에너지 프로슈머 관련 정책 동향은 다음과 같다. 이때, 에너지 프로슈머 관련 지원 정책은 크게 재무적 지원과 비재무적 지원으로 나눌 수 있다(에너지경제연구원, 2017).

국가	신재생 에너지 관련 정책	에너지 프로슈머 관련 정책
독일	• 미래 에너지 경제정책(Energiewende): 2010년부터 추진된 에너지 전환 정책으로, 신재생 에너지 확대를 통한 탈원전화 및 탈석탄화를 목표로 함. • 에너지 구상 2010: 2050년까지의 단계적 에너지 기후변화 목표를 제시하여, 재생에너지 이용 확대를 위한 구체적인 정책목표를 설정함.	• 발전차액지원제도(FIT)의 경매제도로의 전환 및 주택용 태양광 연계 에너지저장장치(ESS)에 대한 보조금 지급 등 재무적 지원뿐만 아니라, 신재생 에너지 발전 비용을 소비자에게 전가하는 재생에너지부담금 정책 등을 통해 에너지 프로슈머로의 전환을 유도하고 있음.
미국	• 연방 정부 차원: 발전세액공제(PTC) 및 투자세액공제(ITC) 등의 세액공제를 기반으로, 재생에너지 도입 또는 관련 기술 개발, 상업화 등을 실시하는 개인, 기업, 연구기관 등을 지원함. • 주 정부 차원: 재생에너지의무화제도(RPS) 및 상계거래제도 등을 기반으로, 재생에너지 확산을 위한 정책목표를 제시함.	• 주 정부의 주도 하에 비재무적 지원, 즉 상계거래제도 축소 및 폐지, 일정 시간대에 전력 사용량이 일정수준을 넘어갈 때 부과되는 demand charge 요금제 도입 등을 통하여, 주택용 태양광 연계 에너지저장장치(ESS) 설치를 통한 에너지 프로슈머로의 전환을 유도하고 있음.
일본	• 제4차 에너지기본계획: 재생에너지 발전 비중 확대, 발전설비 효율제고, 에너지절약 강화 등을 통한 가격 안정화 및 온실가스 감축 달성을 목표로 함. • 장기(2050년) 에너지 정책 방향: 재생에너지 보급 및 확산을 지속하는 동시에, 원자력의 점진적 감축 및 에너지 효율 증진을 도모하고자 함.	• 발전차액지원제도(FIT) 가격 인하, 지방자치체의 에너지 지산지소 지원 사업, 비화석가치 거래시장 신설 등의 비재무적 지원을 통해 에너지 프로슈머 확대를 촉진하고 있음.

(2) 국내·외 기술현황

(가) 국내 기술현황

- 현재 국내에서의 분산형 발전을 통한 에너지 프로슈머들은 ①한국전력공사와의 계약을 통한 상계거래제도 또는 자가용 전력수급계약(PPA), 및 ②프로슈머 이웃간 전력거래 중 한 가지를 선택하여 잉여전력을 거래할 수 있다(아래 표 참조).

분류	발전용량	거래방법
상계거래제도	신재생 10kW 이하/ 태양광 1MW 이하	• 자가소비 후 잉여전력을 한전에 공급하고 전기요금과 상계하여 정산
자가용 전력수급계약(PPA)	신재생 10kW 초과, 1MW이하	• 자가소비 후 잉여전력을 한전에 계통한계가격(SMP)으로 판매하여 현금으로 정산
프로슈머 전력거래	태양광 1MW 이하 (발전사업자 제외)	• 자가소비 후 잉여전력을 이웃 소비자에게 판매 • 이웃 간의 동의를 거쳐 한전과 1년 단위로 협약 체결 후 월 단위 상계를 통한 정산

- 하지만, 2017년에 에너지 프로슈머 전력거래 시장을 신설하여 이웃 간 전력거래를 허용할 예정이었으나, 지리적(동일 배전망에 위치한 이웃 소비자에게 판매) 및 물리적(동일한 기종의 변압기를 사용해야 함) 한계점과, 전력 발전과 판매를 겸업할 수 없도록 하는 전기사업법이 개정되지 않으면서, **실질적으로 프로슈머 이웃간 전력거래는 실증사업 수준에 그치고 있다.**

(나) 국외 기술현황

- 유럽연합(EU), 영국, 독일, 네덜란드, 미국 등 주요국에서는 에너지 프로슈머의 경제성을 보장하기 위하여, 국가별로 **다양한 형태의 전력거래 방식 및 사업 모델을 개발하여 운영**하고 있다.
- 특히, 이러한 국가들에서는 정부의 정책적 투자나 지원에 의한 단방향 전력거래가 아닌, **에너지 시장과 전기가격체계 등에 의한 양방향 전력거래의 형태를 가지는 사업 모델**도 다양하게 제시되고 있다 (아래 표 참조).

분류	주요내용	해외사례	
상계거래	프로슈머는 전력회사 수전량에서 발전량을 차감한 양에 대해서만 요금 지불	유럽	• 상계거래제도 뿐만 아니라, Net Billing, Self-Consumption 등 시행
		미국	• 상계거래제도의 문제점 대두로 인해, 일부 지역에서는 단계적으로 상계거래제도 축소
이웃 간 거래 (P2P Trading)	프로슈머는 자신이 생산한 전력을 전기요금 부담이 큰 이웃에게 판매	피클로 (영국)	• 고객의 계량기 데이터 및 선호도, 전력 생산자의 발전비용 및 상호 간 거래범위 등을 고려하여, 프로슈머와 소비자를 연결(30분 간격)
		반데브론 (네덜란드)	• 세계 최초의 웹 기반 P2P 전력거래 플랫폼 • 프로슈머와 소비자는 단기(1년) 또는 중기(3년)로 계약기간을 선택하여 약정 체결
		소넨 커뮤니티 (독일)	• 독일의 에너지저장장치(ESS) 제조업체에서 제공 및 운영하는 전력거래 플랫폼 • 자사 ESS 설치 고객을 대상으로 소비자들을 연결하여 잉여전력을 온라인으로 공유 • FIT보다 높게, 전기요금보다 낮게 거래가격 설정
		엘로하 (미국)	• 메사추세츠 주 기반의 스타트업 회사인 엘로하에서 제공 및 운영하는 전력거래 플랫폼 • 엘로하는 주택용 고객에게 태양광 발전설비를 무료로 설치해 주고, 이에 대한 수익 공유 • 엘로하는 소비자에게 전력회사보다 저렴한 요금으로 태양에너지 이용권을 판매
도매시장 참여	프로슈머는 중개사업자를 통해 거래시장에 참여하여 생산전력을 판매	독일	• 직접거래제도 참여자는 FIT가 아닌 도매가격+시장프리미엄으로 정산
		미국	• 스케줄 관리자: 전력시장 입찰 시행, 전력시장 및 계통 운영데이터 제공 • 분산자원 공급자: 소규모 분산전원의 모집, 계량 및 정산 운영

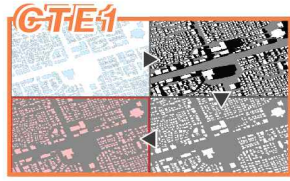
마. 연구 개발 목표 및 내용

(1) 연구 개발의 최종 목표 및 최종 성과물

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	<u>에너지 프로슈머 활성화</u>를 위한, 커뮤니티 기반의 <u>분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어</u> 개발 - 최종성과물의 기술성숙도: <u>4단계(실험)</u> - 최종성과물의 성격: <u>분산형 태양광 발전의 기술성</u>뿐만 아니라, 양방향 전력거래 사업 모델에 따른 <u>경제성 및 사업성에 대한 종합적인 평가</u>를 가능하게 하는 <u>통합 소프트웨어</u> <u>정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 모두에게 맞춤형 에너지 거래 솔루션</u>을 제공
세부 목표	- 커뮤니티 기반 <u>‘분산형 발전의 기술성 평가 기술’</u> 개발 - 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>지리적 분석</u> - 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>태양광 발전량 예측 기술</u> 개발 <u>에너지저장장치(ESS) 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 최적운영전략 수립</u> - 커뮤니티 기반 <u>‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’</u> 개발 - 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>수익구조 분석</u> - 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>생애주기비용 분석 기술</u> 개발 - 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>균등화발전단가 분석 기술</u> 개발 - 커뮤니티 기반 <u>‘분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술’</u> 개발 - 프로슈머-컨슈머의 <u>경제성에 따른 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략</u> 수립 - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 <u>에너지 자립도 분석</u> - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 <u>사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어</u> 개발

(2) 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

구분	연구착수	연구종료	단계별 설명
기초연구	TRL 1	☐	TRL 1 이론적 연구단계 TRL 2 기술적 개념정립 단계 TRL 3 실험적 증명 단계 TRL 4 실험실 성능평가 단계 TRL 5 유사환경 시험 단계 TRL 6 유사환경 기술시범 단계 TRL 7 실제환경 시제품 데모 단계 TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계 TRL 9 현장적용/사업화 단계
단계	TRL 2	☒	
실험 단계	TRL 3	☐	
	TRL 4	☒	
시작품 단계	TRL 5	☐	
	TRL 6	☐	
실용화 단계	TRL 7	☐	
	TRL 8	☐	
사업화 단계	TRL 9	☐	

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 (P2P-BES)	TRL 2 단계	TRL 4 단계	- (연구시작시) TRL 2 단계 최종성과물(P2P-BES)의 2가지 핵심기술요소(CTE) 기능을 구현하고, 최종 환경과 유사한 상태에서 기본적인 S/W의 성능을 시험하였다. 구체적인 내용은 다음과 같다. ▪ CTE 1: 분산형 발전의 기술성을 평가하기 위하여, 강남구에 위치한 27,774건의 건물 DB를 이용한 태양광 발전 잠재량 평가를 수행하였음. 이를 통해, 주변 건물의 영향을 고려한, 실질적인 잠재량 평가를 수행함. ▪ CTE 2: 분산형 발전의 경제성을 평가하기 위하여, 국가 수준의 분산형 태양광 발전 사업 모델 정보를 이용한 분산형 태양광 발전설비의 경제성·환경성 평가를 수행함.   최종성과물(P2P-BES)의 개발 목적을 충족하고, S/W 결과의 정확도 및 신뢰도 성능을 향상시키기 위하여, 빅데이터의 활용 및 사례분석을 수행하였다. 구체적인 내용은 다음과 같다. ▪ CTE 1: 국가지리정보 DB와 지리정보시스템을 통해, 분산형 발전의 기술성 평가 결과의 정확도와 신뢰도를 향상시킴. ▪ CTE 2: 국가정보(국가 경제지표 및 정책)와 자치구별 정보(보조금 및 이차지원 등)을 고려하여, 분산형 발전의 경제성 평가 결과의 정확도와 신뢰도를 향상시킴.   - (연구종료시) TRL 4 단계 본 연구에서는, 최종성과물(P2P-BES)의 기술성숙도 3단계 및 4단계 달성 계획을 다음과 같이 수립하였다. 첫째, 3단계 달성을 위하여, ① 비교 및 분석을 통한 소프트웨어의 핵심기술요소 개발 및 ② 연구실 환경에서 모델링 및 시뮬레이션을 통한 기본 알고리즘 검증 실시한다. 둘째, 4단계 달성을 위하여, ① 일부 데이터를 대상으로 소프트웨어의 개별적인 기능 및 모듈에 대한 평가 및 시험/테스트 및 ② 실험실 환경에서의 시험/테스트 결과 분석을 실시한다. 구체적인 내용은 다음과 같다. ▪ CTE 1: ‘분산형 발전의 기술성 평가 기술’의 평가 및 시험/테스트를 통하여, 태양광 발전량 예측 모델의 정확성을 입증할 계획임. ▪ CTE 2: ‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’의 평가 및 시험/테스트를 통하여, 프로슈머/컨슈머의 전력거래에 따른 수익성 평가 모델의 타당성을 입증할 계획임. ▪ CTE 3: ‘분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술’의 평가 및 시험/테스트를 통하여, 양방향 전력거래에 대한 사용자 맞춤형 엑셀기반의 시스템을 개발할 계획임.

구분	세부내용	
성과물 내용	커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어(P2P energy trading Business model Evaluation Software; P2P-BES) 개발	
성과물의 성격	제품 개발: 커뮤니티 기반 ‘분산형 발전의 기술성 평가 기술’, 커뮤니티 기반 ‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’, 그리고 커뮤니티 기반 ‘분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술’을 통합한 ‘분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어(P2P-BES)’ 개발	
목표 설정 근거	「분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어(P2P-BES)」는 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델에 따른 경제성·사업성을 <u>종합적으로 평가하는 통합 소프트웨어</u>로서, 정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 맞춤형 에너지 거래 솔루션을 제공할 수 있는 제품임. - 현재 기술성숙도 2단계(TRL 2: 기초연구)까지 완료하였으며, <u>최종 기술성숙도 4단계(TRL 4: 실험)를 목표로 함</u>.	
연구기간	21개월(1차년도: 2019년(9개월), 2차년도: 2020년(12개월))	
연구비	약 370 백만원(21개월, 정부출원금)이 소요될 것으로 예상됨.	
연구자의 역량	본 주관연구기관은 최근 5년간 상위 10% 해외저널 포함, SCI/SSCI/SCIE급 저널에 <u>게재 또는 게재확정 논문 86편, 특허등록 15건(국내: 13건, 해외: 2건), 특허출원 4건, 기술이전 3건, 소프트웨어 등록 10건</u> 등 실용적 성과를 달성하였음. 이 중에서, <u>본 연구 수행과 관련된 논문 2건, 특허 3건 및 기술이전 1건</u> 실적은 아래와 같음.	
	구 분	목 록
	논문	- Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis, Applied Energy (2017). - A bottom-up approach for estimating the economic potential of the rooftop solar photovoltaic system considering the spatial and temporal diversity, Applied Energy (2018).
	특 허	등 록 - 에너지 자립형 공동주택에서의 분산형 태양광 발전에 대한 기술적·경제적·정책적 평가 시스템 및 방법(국내, 10-1911403) - 태양광 발전량을 극대화할 수 있는 복합식 태양광 추미 방법, 이를 이용한 태양광 추미 장치 및 태양광 발전 블라인드 시스템(해외(미국), 9,660,571) 출 원 - LCC 및 LCCO₂를 분석하여 건축물에 대한 최적의 설계 대안을 결정하는 시스템 및 방법(10-2011-0026352)
	기술 이전	건축물 친환경 유지관리 평가기법 (LCC & LCCO₂) (2016.01.22.)
자료수집의 한계	- 에너지저장장치(ESS) 적용에 따른 분산형 태양광 발전에 대한 분석을 위한, <u>건물 시간별 에너지 사용량 정보 부재</u> - 에너지 프로슈머의 경제성 분석을 위한, <u>태양광시스템의 비용정보 및 공동주택별 전기요금 계약정보(중합계약과 단일계약) 부재</u> - 에이전트 기반 모델링(ABM)을 활용한 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 및 실효성 검증을 위한, <u>에너지 거래 영향 요인 정보 부재</u>	
현 단계의 기술수준의 한계	- 기존의 분산형 태양광 발전 사업 모델(상계거래제도, 전력수급계약, 대여사업 등) 분석 뿐 만 아니라, <u>새로운 사업 모델(프로슈머 이웃 간 전력거래 등) 개발을 위한 분석 소프트웨어 부재</u> - 개별 건물 단위의 단방향 분산형 에너지 사업 모델에 대한 경제성 평가 방식을 개선하기 위한, 커뮤니티 단위의 양방향 분산형 에너지 사업 모델 평가 소프트웨어 부재 - 실질적인 분석 및 평가를 기반으로, <u>사용자(정부, 프로슈머/컨슈머, 사업자) 모두에게 맞춤형 에너지 거래 솔루션을 제공할 수 있는 오픈형 통합 소프트웨어 부재</u>	

(3) 연차별 연구 개발 목표 및 내용

(가) 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(연세대):

핵심성과 1: 커뮤니티 기반 '분산형 발전의 기술성 평가 기술'

- 분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 지리적 분석

핵심성과 2: 커뮤니티 기반 '에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술'

- 에너지 프로슈머의 경제성 평가를 위한 수익구조 분석

핵심성과 3: 커뮤니티 기반 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술'

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략 수립 및 에너지 자립도 분석

- 공동연구기관(이에이엔):

핵심성과 3: 커뮤니티 기반 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술'

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략 수립 및 에너지 자립도 분석

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(연세대):

핵심성과 1: 분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 지리적 분석

- 지리정보시스템(GIS) 기반 건물 특성 및 일사량 DB 구축
 - 지리정보시스템(GIS) 기반 건물 특성(위치, 면적, 높이 등) DB 구축
 - 일사량(연별, 월별, 일별, 시간별) DB 구축
- 음영기복도(Hillshade) 분석을 활용한 분산형 태양광 발전 가용 옥상 면적 산출
 - 시간별 태양의 고도 및 방위각을 고려한 음영기복도(Hillshade) 분석
 - 시간별 옥상 음영 면적을 고려한 분산형 태양광 발전 가용 옥상 면적 산출

핵심성과 2: 에너지 프로슈머의 경제성 평가를 위한 수익구조 분석

- 분산형 태양광 발전의 경제성 평가를 위한 영향요인 도출
 - 분산형 태양광 발전의 경제성 평가를 위한 비용항목(설치비, 유지관리비 등) 도출
 - 분산형 태양광 발전의 경제성 평가를 위한 수익항목(발전수익, 지원제도 등) 도출
- 분산형 태양광 발전 목적(자가용, 발전 사업용)에 따른 프로슈머 수익구조 분석
 - 자가용 분산형 태양광 발전에 대한 프로슈머 수익구조 분석
 - 발전 사업용 분산형 태양광 발전에 대한 프로슈머 수익구조 분석

핵심성과 3: 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략 수립 및 에너지 자립도 분석

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 에너지 자립도 분석
 - 프로슈머-컨슈머 매칭에 따른 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략 수립
 - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 에너지 자립도 분석

- 공동연구기관(이에이엔):

핵심성과 3: 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략 수립 및 에너지 자립도 분석

- 프로슈머 및 컨슈머 전력 패턴에 따른 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 시나리오 생성
 - 프로슈머 전력 생산 패턴에 따른 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 시나리오 생성
 - 컨슈머 전력 소비 패턴에 따른 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 시나리오 생성

(나) 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(연세대):

핵심성과 1: 커뮤니티 기반 '분산형 발전의 기술성 평가 기술'

- 분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 태양광 발전량 예측 기술 개발

핵심성과 2: 커뮤니티 기반 '에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술'

- 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 경제성 평가를 위한 생애주기비용 분석 기술 개발

핵심성과 3: 커뮤니티 기반 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술'

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발

- 공동연구기관(이에이엔):

핵심성과 3: 커뮤니티 기반 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술'

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(연세대):

핵심성과 1: 분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 태양광 발전량 예측 기술 개발

- 현재 국내 기술수준을 고려한 분산형 태양광 발전량 예측 및 평가
 - 현재 국내 기술수준(변환효율 등)에 대한 현황 조사
 - 현재 국내 기술수준(변환효율 등)을 고려한 분산형 태양광 발전량 예측 및 평가
- 에너지저장장치(ESS) 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 최적운영전략 수립
 - ESS 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 경제성(수익성) 및 환경성(에너지 자립도) 평가
 - ESS 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 경제성 및 환경성을 고려한 ESS 운영전략 수립

핵심성과 2: 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 경제성 평가를 위한 생애주기비용 분석 기술 개발

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 생애주기비용 분석 기술 개발
 - 에너지 프로슈머의 경제성 평가를 위한 생애주기비용 분석 기술 개발
 - 에너지 컨슈머의 경제성 평가를 위한 생애주기비용 분석 기술 개발
- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 균등화발전단가 분석 기술 개발
 - 에너지 프로슈머의 경제성 평가를 위한 균등화발전단가 분석 기술 개발
 - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 균등화발전단가 비교 및 분석

핵심성과 3: 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발

- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발
 - 정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 맞춤형 그래픽 유저 인터페이스 및 소프트웨어 개발
- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 및 실효성 검증
 - 에이전트 기반 모델링(ABM)을 활용한 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 및 실효성 검증

- 공동연구기관(이에이엔):

핵심성과 3: 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발

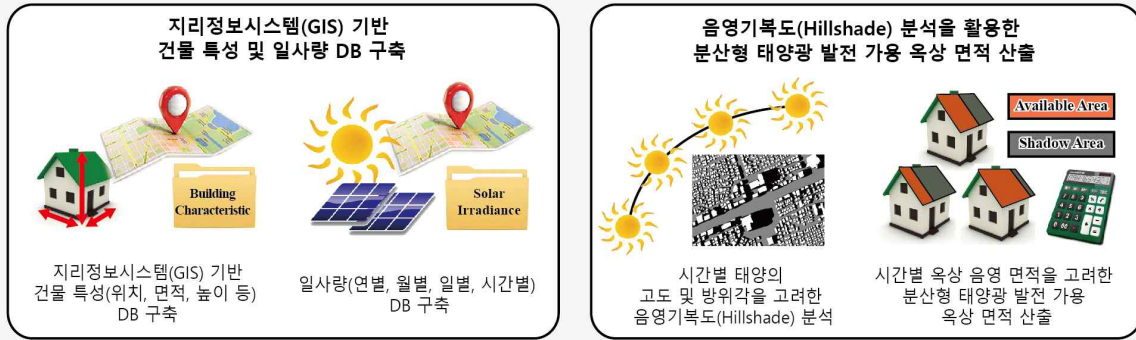
- 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발
 - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 사업성 통합 분석 및 평가 기술 개발

핵심성과 1

커뮤니티 기반
'분산형 발전의 기술성 평가 기술'



분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 지리적 분석

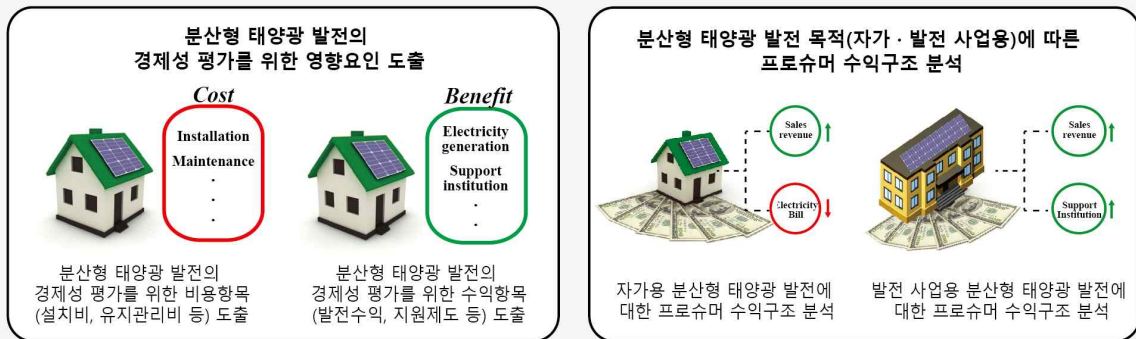


핵심성과 2

커뮤니티 기반
'에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술'



에너지 프로슈머의 경제성 평가를 위한 수익구조 분석

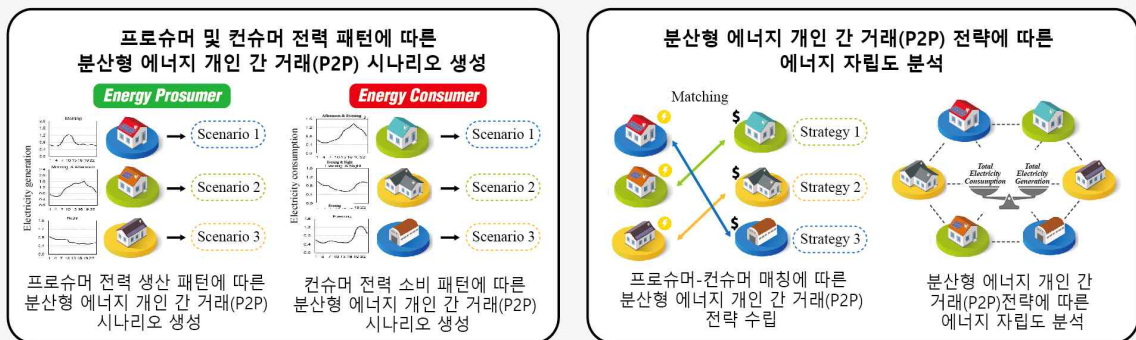


핵심성과 3

커뮤니티 기반
'분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가기술'



분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략 수립 및 에너지 자립도 분석



[그림 1-2]. 1차 연도 연구내용

핵심성과 1

커뮤니티 기반
'분산형 발전의 기술성 평가 기술'



분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 태양광 발전량 예측 기술 개발

현재 국내 기술수준을 고려한
분산형 태양광 발전량 예측 및 평가

현재 국내 기술수준(변환효율 등)에
대한 현황조사

현재 국내 기술수준(변환효율 등)을
고려한 분산형 태양광 발전량
예측 및 평가

에너지저장장치(ESS) 적용에 따른
분산형 태양광 발전의 최적운영전략 수립

ESS 적용에 따른 분산형 태양광
발전의 경제성(수익성) 및
환경성(에너지 자립도) 평가

ESS 적용에 따른 분산형 태양광
발전의 경제성 및 환경성을 고려한
ESS 운영전략 수립

핵심성과 2

커뮤니티 기반
'에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술'



에너지 프로슈머 및 컨슈머의 경제성 평가를 위한 생애주기비용 분석 기술 개발

분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른
생애주기비용 분석 기술 개발

에너지 프로슈머의 경제성 평가를
위한 생애주기비용 분석 기술 개발

에너지 컨슈머의 경제성 평가를
위한 생애주기비용 분석 기술 개발

분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른
균등화발전단가 분석 기술 개발

에너지 프로슈머의
경제성 평가를 위한 균등화발전단가
분석 기술 개발

분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)
전략에 따른 균등화 발전단가
비교 및 분석

핵심성과 3

커뮤니티 기반
'분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의
사업성 평가기술'



분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발

분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의
사업성 통합 평가 기술 및 소프트웨어 개발

분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)
전략에 따른 사업성 통합 분석 및
평가기술 개발

정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자
맞춤형 그래픽 유저 인터페이스 및
소프트웨어 개발

분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의
사업성 및 실효성 검증

에이전트 기반 모델링(ABM)을 활용한
분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 및 실효성 검증

[그림 1-3]. 2차 연도 연구내용

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구 개발의 추진전략 · 방법 및 추진체계

(1) 연구 개발 추진 전략 및 방법

(가) 본 연구진의 know-how 활용

- 본 연구기관은 게재 또는 게재 확정된 SCI/SSCI/SCIE급 논문 133편, 특허등록 21건, 특허출원 17건, 기술이전 4건, 소프트웨어 등록 26건 등을 포함한 본 연구진이 개발한 각종 분석 기법 및 유지관리 관련 know-how를 적극 활용
 - 지리정보시스템 (Geographical information system)
 - 시뮬레이션 기법 (Simulation)
 - 전과정평가 기법 (Life cycle assessment)
 - 생애주기비용분석 기법 (Life cycle cost analysis)
 - 데이터마이닝 기법 (Data mining)
 - 에이전트 기반 모델링 (Agent-based modeling)

(나) 기술정보 수집

- 본 연구진에서 기 수행한 연구과제를 통해 축적된 기술자료 및 방법의 적극 활용
 - 옥상 태양광 발전설비 설치에 따른 태양광 잠재량 및 발전량 예측 모델
 - 분산형 태양광 발전 사업 모델에 따른 경제성 및 환경성 평가 모델
- 기상청, 한국에너지공단 신·재생에너지센터, 한국전력 등 분산형 태양광 발전 관련 정보의 공유가 가능한 네트워크 조성
- 미국, 일본 등 선진국의 관련 연구 기관을 방문하여 최신 자료 수집

(다) 전문가 확보

- 과제 관련 연구소 전문가, 국내외의 교수들로 자문단을 구성하고 이들의 상호방문 연구를 통하여 정보교류 활용을 극대화
- 실용화 가능한 연구 개발을 위하여, 건설사업관리 회사 및 시설물 유지관리 회사, 에너지 전문 회사, 태양광 컨설팅 회사 등과 긴밀한 협력관계를 유지, 실질적인 적용 방안을 논의할 수 있도록 함
- 연구 프로젝트의 원활한 수행과 업무 연속성을 위하여 대학 연구실의 연구인력 확충 및 장기적으로 참여할 수 있는 박사 후 과정 적극 활용

(라) 국내 연구기관 및 기업과의 협력

- 연구개발을 위한 데이터의 원활한 확보를 위하여, 공공기관(한국에너지공단 신·재생에너지센터, 한국전력 등)과 협력관계를 형성
- 연구개발 성과를 널리 보급하기 위하여 국가 연구 기관과 협력관계를 형성
- 제품 개발 및 실효성 검증을 진행할 수 있도록 관련 국내 기업과 협력관계를 형성
- 국내 타 연구기관(대학, 연구소 등) 및 대기업 부설 연구소를 활용하여 실무적 차원의 니즈(Needs)를 도출

(마) 외국 전문기관과의 협력

- 미국의 Brookhaven National Laboratory(BNL), Purdue University, University of Maryland(UMD), Oklahoma State University(OSU), Florida International University(FIU), 호주의 University of New South Wales(UNSW), 싱가포르의 National University of Singapore(NUS) 등 여러 외국 기관 및 대학과의 연구 협력
- 외국 연구기관의 연구원 초청 및 본 연구진 파견을 통한 국제적 연구 교류
- 외국 연구기관과의 협력 연구 결과에 대한 상호 교환



(2) 연구 개발 추진 체계

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발	주관연구책임자 (홍태훈)외 총 17명

기관별 참여 현황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	-	-
중견기업	-	-
중소기업	1	3
대 학	1	15
국공립(연)	-	-
출 연 (연)	-	-
기 타	-	-

주관연구기관명
에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발
연구책임자 (홍태훈)외 14명
담당기술개발내용
핵심성과 1. 커뮤니티 기반 ‘ <u>분산형 발전의 기술성 평가 기술</u> ’ 개발 ■ 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>지리적 분석</u> ■ 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>태양광 발전량 예측 기술</u> 개발 핵심성과 2. 커뮤니티 기반 ‘ <u>에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술</u> ’ 개발 ■ 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>수익구조 분석</u> ■ 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>생애주기비용 분석 기술</u> 개발 핵심성과 3. 커뮤니티 기반 ‘ <u>분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술</u> ’ 개발 ■ 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 <u>분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)</u> 전략 수립 ■ 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 <u>사업성 통합 평가 소프트웨어</u> 개발

공동연구기관명
에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발
연구책임자 (신지웅)외 2명
담당기술개발내용
핵심성과 3. 커뮤니티 기반 ‘ <u>분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술</u> ’ 개발 ■ 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 <u>전력 패턴</u>에 따른 <u>시나리오</u> 생성 ■ 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 <u>사업성 통합 평가 기술</u> 개발

(3) 연구 개발 추진 일정

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책 임 자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	계 획수립 및 데이터 수집													25,000	홍태 훈 (연세대)
2	DB 구축													24,500	홍태 훈 (연세대)
3	경제성 영향 요인 도출													25,000	홍태 훈 (연세대)
4	프로슈머 수익구조 분석													25,000	홍태 훈 (연세대)
5	전력 생산 및 소비 패턴에 따른 시나리오 생성													20,000	신지웅 (이에이엔)
6	프로슈머-컨슈머 매칭에 따른 거래전략 수립													50,000	홍태 훈 (연세대)
2차년도															
1	태양광 발전량 예측 및 평가													25,000	홍태 훈 (연세대)
2	에너지저장장치 적용에 따른 운영전략 수립													32,000	홍태 훈 (연세대)
3	생애주기비용 및 균등화발전 단가 분석													64,000	홍태 훈 (연세대)
4	분산형 태양광 발전의 기술성 및 경제성 통합 분석													25,000	홍태 훈 (연세대)
5	분산형 에너지 거래 사업성 평가 기술 개발													20,000	신지웅 (이에이엔)
6	사업성 평가 소프트웨어 개발 및 보완													46,900	홍태 훈 (연세대)

나. 연구 개발 성과

(1) 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호*
1	Determining the Peer-to-Peer electricity trading price and strategy for energy prosumers and consumers within a microgrid	Applied Energy	안중백	261	-	Elsevier	SCI	'20.03	-
2	A new approach for developing a hybrid sun-tracking method of the intelligent photovoltaic blinds considering the weather condition using data mining technique	Energy and Buildings	강현아	209	-	Elsevier	SCI	'20.02	-
3	Determining the optimal trading price of electricity for energy consumers and prosumers	Renewable & Sustainable Energy Reviews	안중백	-	-	-	SCI	-	-
4	Development of the business feasibility evaluation model for a profitable P2P electricity trading by estimating the optimal trading price	Journal of Cleaner Production	안중백	295	-	Elsevier	SCI	'21.05	-
5	A systematic review of the smart energy conservation system: from smart homes to sustainable smart cities	Renewable & Sustainable Energy Reviews	김학평	140	-	Elsevier	SCI	'21.04	-

(2) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The 11 th International Conference on Applied energy (ICAE 2019)	안중백	'19.08	베스테로스	스웨덴
2	The 5 th Applied energy symposium on Low Carbon Cities and Urban Energy Systems (CUE 2019)	안중백, 정승훈	'19.10	샤먼	중국

(3) 특허 성과

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호*	등록 인	등록 일	등록 번호	등록 번호*	
1	전력거래 전략 제공 방법	대한 민국	연세대 학교 산학협 력단	19.12.17	10-2019 -016874 9	-	-	-	-	-	100 %
2	유전자 알고리즘을 이용한 에너지 프로슈머와 에너지 컨슈머의 최적 전력거래가격 결정시스템 및 결정방법	대한 민국	연세대 학교 산학협 력단	20.12.22	10-2020 -018051 6	-	-	-	-	-	100 %

* 연구 개발 성과 관리·유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

(3) 소프트웨어

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자 명	기여율
1	분산형 에너지 개인 간 거래를 위한 최적 전력거래 가격 도출 모델	2020.07.10	연세대학교 산학협력단	2020.12.24	C-2020-05 2909	홍대훈, 안종백, 이민현, 강현아	100%
2	-	-	-	-	-	-	-

(4) 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	안종백	2020	-	○	-	-	○	-	-	-	○	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

다. 연구 수행 내용

(1) 핵심성과 1: 커뮤니티 기반 ‘분산형 태양광 발전의 기술성 평가 기술’

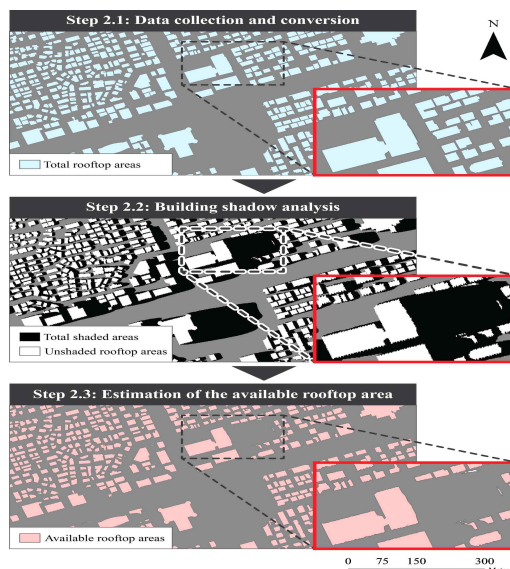
(가) 단위성과 A-1-①: 시간별 일사량 DB 구축

분산형 태양광 발전 시스템의 물리적 잠재량 (physical potential)을 분석하기 위해 서울시의 태양 복사에너지 데이터를 수집했다. 일반적으로 기상청에서 제공하는 태양 복사에너지 데이터는 월 단위로 제공되지만, 본 연구에서는 태양광 패널이 설치될 수 있는 옥상면적을 계산하고 매 시간마다 옥상의 분산형 태양광 발전 시스템의 발전량 (potential)을 추산하기 위해 시간별 태양 복사에너지 데이터가 필요했다. 따라서 본 연구에서는 세계 복사에너지 데이터 센터 (World Radiation Data Centre, WRDC)로부터 무료로 배포되는 2010년부터 2014년까지 5년간의 서울시 시간별 태양 복사에너지 데이터를 참고하여 분산형 태양광 발전 시스템 발전량을 추산하였다.

(나) 단위성과 A-1-②: 지리적 잠재량 평가

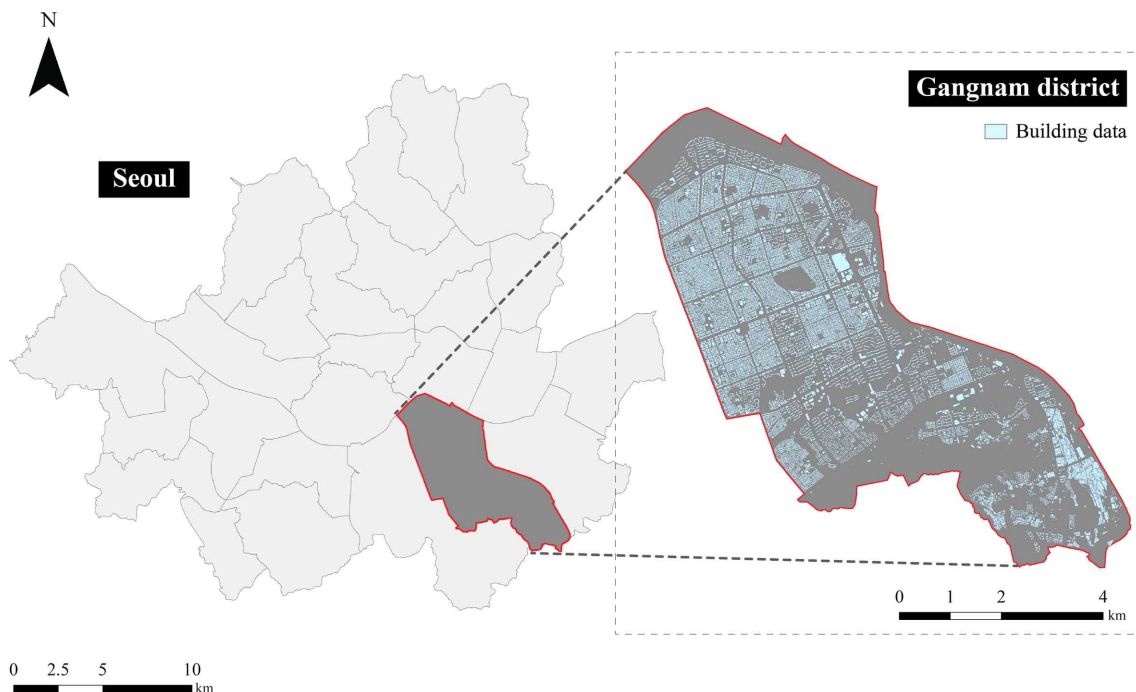
- 분산형 태양광 발전의 지리적 잠재량 분석방법

옥상 분산형 태양광 발전 시스템의 지리적 잠재량을 분석하기 위해 서울시의 태양광 발전 시스템이 설치 가능한 옥상 면적 데이터를 수집했다. 본 연구에서는 지리정보시스템 (GIS) 소프트웨어, ArcMap 10.1을 이용하여 옥상면적 데이터를 다음과 같은 3가지 단계로 추산했다: ① 데이터의 수집 및 변환, ② Hillshade 분석을 통한 건물의 음영분석, ③ 최종 옥상면적 추산 ([그림 2-1] 참조).



[그림 2-1] 분산형 태양광 발전의 지리적 잠재량 분석 단계

① 데이터의 수집 및 변환: 강남구의 건물의 데이터를 수집하고, 이를 hillshade 분석을 가능하도록 변환하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 국토교통부 산하의 공간정보 산업진흥원 (Spatial information industry promotion institute, SPACEN)에서 제공하는 강남구의 건물 데이터들을 수집했다. 제공한 건물 데이터는 SHP형식의 폴리곤 데이터 파일로, 건물의 높이, 면적 등의 정보가 포함되어있다. 결과적으로 총 27,744개의 건물데이터를 태양광 발전 시스템의 지리적 잠재량을 추산하였다 ([그림 2-2] 참조). 만약 건물의 높이가 생략된 데이터의 경우 폴리곤 데이터 파일을 래스터 데이터 파일로 변환하여, 래스터 셀에 0값을 주는 방식으로 건물의 높이를 추산하였다.



[그림 2-2] 강남구의 빌딩 데이터

② Hillshade 분석을 통한 건물의 음영분석: 방위각과 고도를 기반으로 한 Hillshade 분석을 이용하여 주변 건물의 음영 범위를 분석하고 태양광 시스템에 생긴 음영 면적을 추산했다. Hillshade분석을 수행하기 위해서는 ‘건물의 높이가 포함된 래스터 데이터’, ‘수평선 위 태양의 고도’, ‘수평선 위 태양의 방위각’, 3가지의 입력 데이터가 필요하다. 래스터 데이터는 (1) 번 과정을 통해 수집하였다. 태양의 고도와 방위각은 한국천문연구원 (Korea Astronomy & Space Science Institute)에서 제공하는 태양의 고도 및 방위각 계산 프로그램을 통해 수집하였다. 방위각과 고도는 매년, 매일 일정한 주기에 맞춰 변화하므로, 본 연구에서는 매달 15일, 오전 6시부터 오후 7시의 고정적인 분석 시간을 설정하여 고도와 방위각 데이터를 수집하였다.

③ 최종 옥상면적 추산: 태양광 발전 시스템 설치가 가능한 옥상면적은 주변 건물의 음영 면적과 부적합한 설치면적을 제외하고 추산되었다. 첫 번째로, 주변 건물로 인한 음영 면적은 태양의 고도와 방위각에 따른 주변 건물의 음영범위에 기초하여 전체 옥상면적에서 제

외되었다. 음영 면적을 배제하기 위해, 주변 건물의 음영이 없는 옥상, 주변 건물의 음영이 존재하는 옥상과 같은 두 가지 조건에 따라 래스터 셀에 공백 값 (null value)을 할당했다. 그 결과, 주변 건물의 음영 면적에 의한 방해 없이 태양광 발전 시스템이 최적의 수준에서 발전할 수 있는 최적의 옥상 면적의 출력 래스터를 Hillshade 분석의 출력 래스터에서 추출할 수 있었다. 두 번째로, 태양광 발전 시스템이 설치가 곤란한 기하적으로 부적절한 옥상 면적을 추가로 제외하였다. 부적합한 옥상 면적을 제외하기 위해 주변 건물로 인한 음영 면적이 없는 옥상면적의 래스터 출력데이터를 폴리곤 데이터로 변환하고 태양광 발전 시스템 설치를 위한 최소 요구사항 아래로 떨어진 폴리곤 데이터를 제거했다. 한국 신재생 에너지 센터에서 제공한 최소설치면적 (고정 추적시스템: 16.5m², 일축 추적시스템: 26.4m², 양축 추적시스템:33m²)을 기반으로 전체 옥상면적에서 설치에 부적합한 면적을 제외하였다. 분산형 태양광 시스템의 지리적 잠재량은 [수식 2-1]을 참조하여 추산할 수 있다.

$$Geographic_{ijk} = TRA - SRA_{ijk} - UIA_{ijk} \text{ ----- [수식 2-1]}$$

TRA : 대상 지역의 총 옥상 면적

SRA_{ijk} : i월 k일 j부터 j+1 시까지의 그림자가 진 옥상 면적

UIA_{ijk} : i월 k일 j부터 j+1 시까지의 부적절한 설치 면적

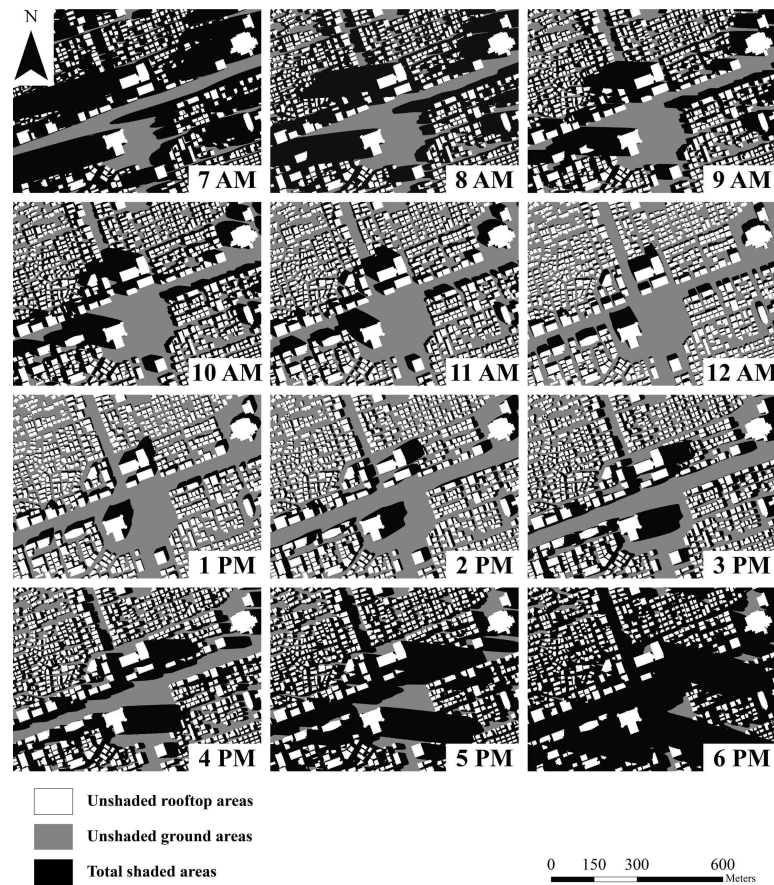
● 분산형 태양광 발전의 지리적 잠재량 분석결과

강남구 건물 옥상의 분산형 태양광 발전의 지리적 잠재량을 분석하였다. [그림 3]은 강남구 건물데이터의 오전 7시부터 오후 6시까지의 Hillshade 음영분석 결과를 나타낸다. [그림 3]의 흰색, 회색 및 검은색 영역은 다음과 같은 의미를 나타낸다. (1) 흰색영역: 태양광 발전시스템이 최적의 발전량을 보이는 음영 면적이 없는 옥상영역, (2) 회색영역: 태양광 발전 시스템을 설치할 수 없는 음영 면적이 없는 옥상영역, (3) 검은색 영역: 태양광 발전시스템이 발전할 수 없는 전체면적이 음영 면적인 옥상. [그림 2-3]에서 보는 바와 같이, 태양광 발전시스템이 최적의 발전량을 보이는 음영 면적이 없는 옥상영역과 발전량이 거의 없는 음영면적의 옥상영역은 오전 7시부터 오후 6시까지 지속적으로 변경된다. [그림 2-4]는 [그림 2-3]의 Hillshade 음영분석 결과에 기초하여 강남구에서 매월 이용가능한 옥상면적을 나타낸다.

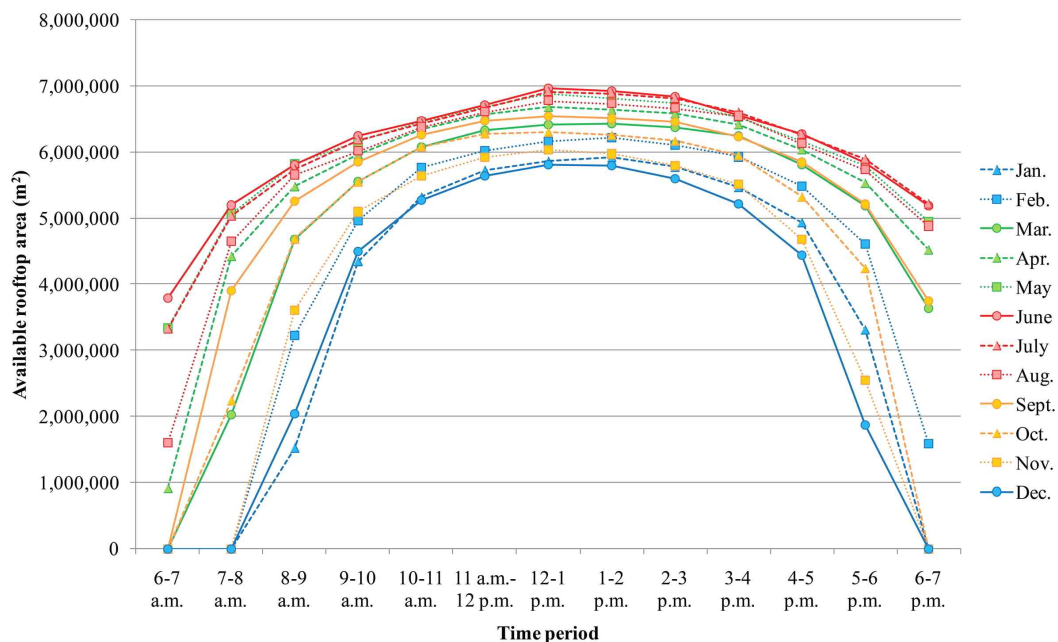
첫 번째로, 강남구의 옥상 태양광 발전시스템의 지리적 잠재량은 태양이 가장 높은 지점에 위치해 있는 오후 12시부터 오후 2시 사이에 가용률 (발전이 가능한 옥상면적 대 전체 옥상면적의 비율)이 77.18%에서 92.74%로 가장 높게 나타났다. 반대로, 태양이 가장 낮은 지점에 위치해 있는 오전 6시부터 오전 7시 사이에는 가용률이 0%에서 50.53%로 비교적 낮게 나타났다.

두 번째로, 강남구의 옥상 태양광 발전시스템의 지리적 잠재량은 모든 달을 통틀어 6월 (가용률: 92.74%)에 가장 높았으며, 6월부터 시간이 지남에 따라 감소하여, 최종적으로 12월 (가용률: 77.33%)에 가장 낮은 가용률을 나타냈다. 계절에 따른 태양 복사에너지의 경향과

유사하게, 지리적 잠재량은 겨울철 정오부터 오후 1시까지 평균적으로 79.09%의 가용률을 보여 낮은 것으로 나타났다. 반면에, 여름철에는 91.63%의 가용률을 보여 상대적으로 높은 것으로 나타났다.



[그림 2-3] 시간별 강남구 건물의 Hillshade 음영분석



[그림 2-4] 옥상 태양광 발전시스템의 지리적 잠재량 분석결과

3) 단위성과 A-2-①: 기술적 잠재량 평가

- 분산형 태양광 발전의 기술적 잠재량 분석방법

태양광 모듈의 효율을 강남구의 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량을 분석하기 위해 정의한다. 태양광 모듈의 효율은 패널의 유형과 태양광 패널의 제조업체에 따라 많은 차이가 있다. 가장 높게 확인된 태양광 패널 모듈의 효율은 22.9%이지만, 상용 태양광 패널의 모듈은 아직 15-18%에서 머물러 있다. 이에 따라 본 연구에서는 강남구 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량을 평가하기 위해 태양광 패널 시장과 산업의 현재 기술 수준을 고려한 15%를 태양광 모듈의 효율로 사용한다.

태양광 모듈의 효율뿐만 아니라, 태양광 패널의 기울기 정도와 패널 배열 사이의 공간 또한 기술적 잠재량에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 실제 태양의 위치를 기반으로 하여 음영 면적이 없는 옥상영역 분석을 하는 것을 중점으로 하였고, 이에 따라 태양광 발전시스템이 건물의 그림자에 의해서 방해받지 않고 최적의 수준에서 성능을 발휘할 수 있는 음영 면적이 없는 영역은 시간에 따라서 큰 폭으로 달라진다.

태양광 발전 시스템은 설치된 후 서비스 수명 내내 한 장소에 긴 시간 동안 고정되어 있어서 태양광 패널의 기울기 정도와 패널 배열 사이의 공간을 고려한 최적의 배치를 찾기 어렵게 만든다. 이에 따라 옥상 태양광 발전 시스템의 기술적 잠재량 평가에 시간대별 지리적 잠재량을 충분하게 반영할 수 있도록, 본 연구에서는 태양광 패널들이 전체 옥상에 기울어지지 않고 수평으로 설치되는 것으로 가정했다. 이러한 방식을 통해 음영이 있는 옥상 영역을 시간 단위로 제외하여 옥상 태양광 발전 시스템의 현실적이고, 실용적인 기술적 잠재량 추정이 가능하도록 하였다.

옥상 태양광 발전 시스템의 기술적 잠재량은 태양 일사량과 사용 가능한 옥상 영역을 변수로 하여 [수식 2-2]를 참조하여 추산할 수 있다.

$$Technical_T = e_{PV} \times \sum_{i=1}^{12} \left(\sum_{j=6}^{18} (ARA_{ij} \times \sum_{k=1}^n SR_{ijk}) \right), \text{ ----- [수식 2-2]}$$

여기에서 $Technical_T$ 는 1년 동안 옥상 태양광 발전시스템의 총 기술적 잠재량 (MWh), e_{PV} 는 태양광 패널 모듈의 효율 (본 연구에서 사용된 태양광 패널 모듈의 효율: 15%), ARA_{ij} 는 i 월 15일에 j 시부터 $j+1$ 시까지 사용 가능한 옥상 영역의 면적 (m^2), SR_{ijk} 는 i 월 k 일의 j 시부터 $j+1$ 시까지의 태양의 일사량 (MWh/m^2), i 는 각각의 월 ($i=1, 2, 3, \dots, 12$), j 는 24시간 형식의 시간 ($j=6, 7, 8, \dots, 18$), k 는 한 달의 일 ($k=1, 2, 3, \dots, 31$), 그리고 n 은 i 월의 전체 일수를 나타낸다.

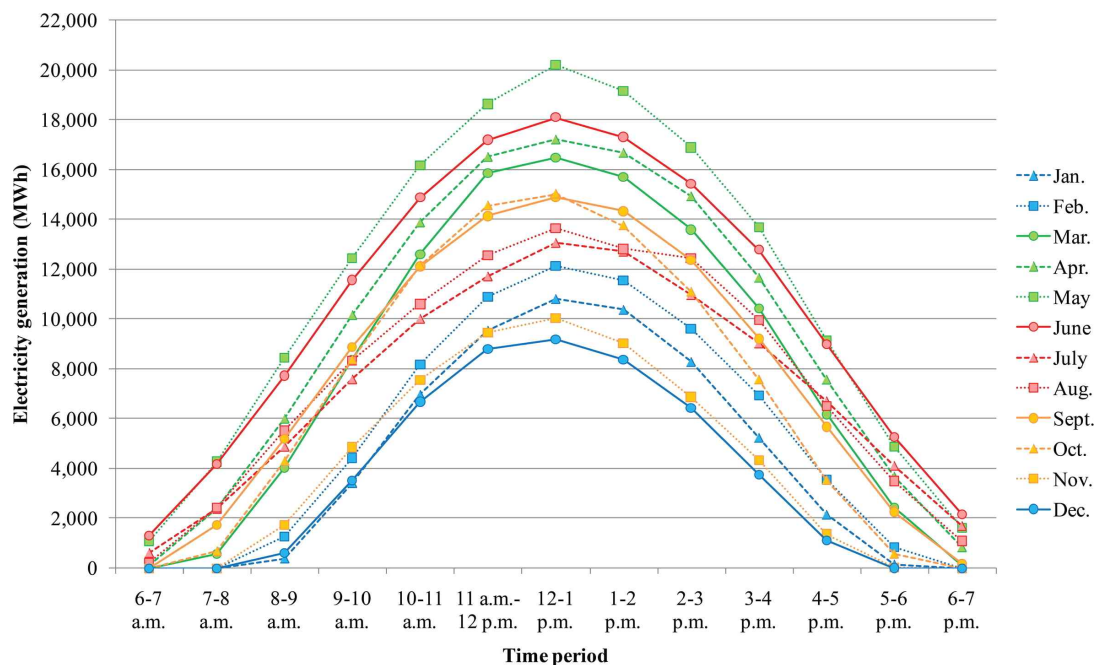
두 값 한 달에 대한 특정 기간 (예: 오전 12시 ~ 오후 1시)의 태양 일사량 합계, 매월 15일 특정 기간 내에 사용 가능한 옥상 영역의 면적을 곱함으로써, 태양광 패널 모듈 효율 (15%), 한 달의 특정 기간 내의 기술 잠재량 (시간당 기술적 잠재량)을 계산할 수 있다. 이 과정이 한 달 동안 오전 6시 ~ 7시부터 오후 6시 ~ 7시까지 모든 기간에 대해 수행되는

경우, 한 달의 기술 잠재량 (즉, 월간 기술 잠재량)을 계산할 수 있다. 이 전체 과정이 1월부터 12월까지 완료되면 연간 기술 잠재량 (즉, 연간 기술 잠재량)을 계산할 수 있다.

결과적으로 본 연구는 특정한 옥상의 특성과 시간별, 월별, 연간 기준으로 1년 내내 변화하는 태양의 위치를 고려하여 현실적이고 실용적인 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량을 계산할 수 있다.

● 분산형 태양광 발전의 기술적 잠재량 분석결과

본 연구에서는 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량을 강남구에 대해 분석하였다([그림 2-5] 참조). [그림 2-5]는 모듈 효율이 15%인 사용 가능한 옥상 구역에 태양광 발전 시스템이 설치되었다고 가정할 때 강남구의 매월 기술적 잠재량을 보여준다.



[그림 2-5] 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량 분석결과

첫 번째로, 강남구의 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량은 $9,177 - 20,207kWh$ 의 값으로, 모든 월에서 태양이 가장 높게 떠있는 때 (정오)인 오후 12시부터 1시까지가 가장 높았다. 한편, 기술적 잠재량은 태양이 동쪽 지평선에서 가장 낮은 지점인 오전 6시에서 7시 사이에 가장 낮았고, 그 값은 지리적 잠재량과 비슷한 0에서 $1,304kWh$ 이다.

두 번째로, 물리적 잠재량과 비슷하게, 옥상 태양광 발전시스템의 기술적 잠재량은 $146,624 kWh$ 로 5월에 가장 높았고, 12월에는 $48,487kWh$ 로 가장 낮았다. 이처럼 기술적 잠재량은 다른 계절에 비해 봄철(즉, 3월, 4월, 5월)에 높은 경향이 있으며, 그 값은 $106,478 - 146,624 kWh$ 인 반면, 겨울철(즉, 12월, 1월, 2월)에는 낮은 경향이 있으며, 그 값은 $48,497kWh$ 이다.

여름과 가을의 기술적 잠재량은 물리적 잠재량과 마찬가지로 서로 다른 경향을 보였다. 여름철 중 6월은 기술적 잠재량이 높았고, 여름철 중 2번째(136,805kWh)인 반면, 7월과 8월은 기술 잠재력이 상대적으로 낮았는데, 그 결과는 각각 여름철 중 5번째(95,339kWh)와 7번째(99,736kWh)로 가장 낮았다. 가을 중 11월은 기술적 잠재량이 낮아 가을철 중 2위로 낮았고, 9월과 10월은 기술적 잠재량이 상대적으로 높아 가을철 중 5번째(101,079kWh), 7번째(91,692kWh)가 가장 높았다.

4) 단위성과 A-2-②: 에너지 저장장치 운영전략 수립

- 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치 운영전략 수립을 위한 DB구축

PV-ESS의 운영전략을 수립하기 위하여, DB를 구축하였다. 첫째, 분석을 위한 기본 정보(지역 및 건물, 전기가격, 시스템 정보) DB를 구축하였다. 지역 및 건물 정보의 경우, 태양광 발전량과 전기사용량에 영향을 미칠 수 있는 위치 정보, 기상 정보, 건물 면적, 전력 소비량에 대한 기본 정보의 DB가 구축되었다. 전기가격 정보의 경우, 시간별 변동 계통한계가격(System Marginal Price; 이하 SMP) 및 REC 가격에 대한 DB를 구축하였다. 시스템 정보의 경우, 공동주택에 설치하는 태양광 발전 시스템 및 에너지 저장장치(Energy Storage System; ESS)에 대한 DB를 구축하였다. 둘째, 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치의 운영전략 최적화를 위하여, 태양광 발전 시스템이 생산한 시간별 태양광 발전량 정보와 건물의 시간별 전기사용량 정보 DB를 구축하였다. 시간별로 달라지는 발전량과 전기사용량을 기반으로 PV-ESS의 최적운영전략을 수립하기 위해, 본 연구에서는 시간별 데이터를 활용해서 분석을 수행하였다. 따라서, 분석을 위해 수집하고자 하는 데이터 중 시간별 태양광 발전량 정보와 건물의 시간별 전기사용량 정보는 충청북도에 위치한 주거용 건물을 대상으로 수집하였다. 구축된 DB는 후속하는 최적화 프로세스와 연계되어 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치의 최적운영전략 수립에 활용된다.

- 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치 운영전략 최적화 모델 개발

앞서 구축된 DB를 바탕으로, 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치의 운영전략 최적화 기술을 개발하였다. 첫째, 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치의 사용 목적을 정의하였다. 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치의 운영전략은 사용자의 목적에 따라 크게 달라질 수 있다. 사용자의 목적은 크게 두 가지 관점으로 분류된다: ① 전기 판매 수익을 최대화하는 경제적 목적, ② 발전량의 자가소비를 최대화하는 환경적 목적. 둘째, PV-ESS 운영전략에 따른 최적화 모델링 기술을 개발한다. 본 연구에서는 최적운영전략을 수립하기 위하여, 제약조건이 있는 목적 함수에 대하여 최적 해를 도출할 때 주로 사용되는 선형 계획법을 활용하였다. 이를 위해, 다양한 수식을 활용하여 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치의 운영에 필요한 구성 요소(전력 시스템, 에너지 저장장치)와 목적 함수(전력 거래를 통한 경제적 수익, 전력의 자가 사용률)에 대한 모델링이 수행되었다. 전력 시스템을 모델링하기 위하여, 전력 시스템에서의 전력 흐름(태양광 발전량, 건물 전력 사용

량, 전력 충전량, 전력 방전량, 전력 구매량, 전력 판매량)에 대한 제약조건을 [수식 2-3~2-8]과 같이 수립하였다. 에너지 저장장치를 모델링하기 위하여, 에너지 저장장치에서의 전력 흐름에 따른 전력 상태에 대한 제약조건을 [수식 2-9, 2-10]과 같이 수립하였다. 목적 함수를 모델링하기 위하여, 전력거래를 통한 수익과 전력의 자가 사용량을 [수식 2-11, 2-12]과 같이 수립하였다. 특히, 본 연구에서는 다목적 최적화를 위하여 목적 함수 중 하나의 목적 함수를 ε 으로 제한하고 나머지 목적 함수를 최대화하는 ε -constraint 방법을 사용하였다.

$$P_{pv,t} = P_{ess,t}^{pv} + P_{market,t}^{pv} + P_{building,t}^{pv}, \forall t \text{ ----- [수식 2-3]}$$

$$P_{building,t} = P_{building,t}^{ess} + P_{building,t}^{pv} + P_{building,t}^{market}, \forall t \text{ ----- [수식 2-4]}$$

$$P_{charge,t} = P_{ess,t}^{pv} + P_{ess,t}^{market}, \forall t \text{ ----- [수식 2-5]}$$

$$P_{discharge,t} = P_{building,t}^{ess} + P_{market,t}^{ess}, \forall t \text{ ----- [수식 2-6]}$$

$$P_{purchase,t} = P_{ess,t}^{market} + P_{building,t}^{market}, \forall t \text{ ----- [수식 2-7]}$$

$$P_{sale,t} = P_{market,t}^{pv} + P_{market,t}^{ess}, \forall t \text{ ----- [수식 2-8]}$$

$$E_{t+1} = (1 - \eta_{self})E_t + \{(1 - \eta_{charge})P_{charge,t} + (1 - \eta_{discharge})P_{discharge,t}\} \times \Delta t, \forall t \text{ ----- [수식 2-9]}$$

$$E_{capacity} \times SOC_{min} = E_{min} \leq E_t \leq E_{max} = E_{capacity} \times SOC_{max}, \forall t \text{ ----- [수식 2-10]}$$

$$net\ income_d = \sum_{t=1}^T (C_{market,t}^{pv} \cdot P_{market,t}^{pv} + C_{market,t}^{ess} \cdot P_{market,t}^{ess} - C_{building,t}^{market} \cdot P_{building,t}^{market} - C_{ess,t}^{market} \cdot P_{ess,t}^{market}) \times \Delta t \text{ ----- [수식 2-11]}$$

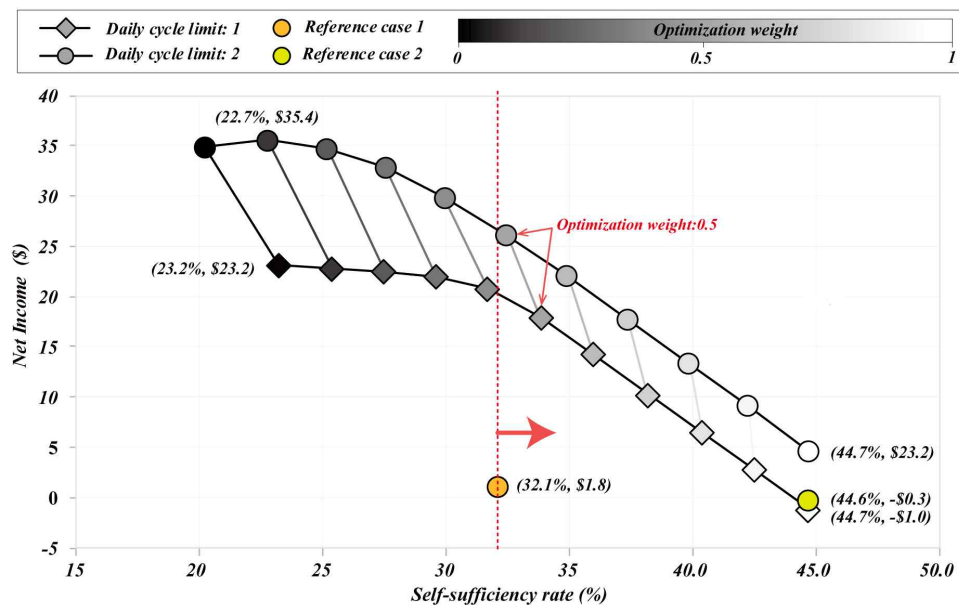
$$self - sufficiency\ rate_d = \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{P_{building,t} - (P_{building,t}^{market} + P_{ess,t}^{market})}{P_{building,t}} \right\} \text{ ----- [수식 2-12]}$$

여기서, $P_{B,t}^A$ 는 시간 t 에 구성요소 A 에서 구성요소 B 로 이동하는 전력량을 의미하며 (kW), $P_{pv,t}$ 는 시간 t 에 태양광 발전량을 의미하며 (kW), $P_{building,t}$ 은 시간 t 에 건물 전력 사용량을 의미하며 (kW), $P_{charge,t}$ 는 시간 t 에 에너지 저장장치의 충전량을 의미하며 (kW), $P_{discharge,t}$ 는 시간 t 에 에너지 저장장치의 방전량을 의미하며 (kW), $P_{purchase,t}$ 는 시간 t 에 전력 구매량을 의미하며 (kW), $P_{sale,t}$ 은 시간 t 에 전력 판매량을 의미하며 (kW) E_t 는 시간 t 에 에너지 저장장치의 전력량을 의미하며 (kWh), η_{self} 는 에너지 저장장치의 자가 방전율을 의미하며 (%), η_{charge} 는 에너지 저장장치의 충전 효율을 의미하며 (%), $\eta_{discharge}$ 는 에너지 저장장치의 방전 효율을 의미하며 (%), $E_{capacity}$ 에너지 저장장치의 에너지 용량을 의미하며 (kWh), SOC_{min} 는 배터리 보호를 위한 최소 전력량 비율을 의미하며 (%), E_{min} 에너지 저장장치의 최소 전력량을 의미하며 (kWh), E_{max} 에너지 저장장치의 최대 전력량을 의미하며 (kWh), SOC_{max} 는 에너지 저장장치의 최대 전력량 비율을 의미하며 (%), $net\ income_d$ 은 d

일의 전력거래를 통한 수익을 의미하며, $C^A_{B,t}$ 는 시간 t 의 구성요소 A에서 구성요소 B로 이동 시 가격을 의미하며 (\$/kWh), $self-sufficiency\ rate_d$ 는 d 일의 전력 자가 소비율을 의미한다.

개발된 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치 운영전략 최적화 모델을 검증하기 위해 에너지 저장장치 없이 태양광 발전 시스템만 설치하였을 경우 (reference case 1)와 최적화를 하지 않은 rule-based scheduling을 에너지 저장장치가 포함된 태양광 발전 시스템에 적용했을 경우 (reference case 2)에 대해 비교를 수행하였다. 일일 충방전 제한 횟수가 1회인 최적운영전략이 적용된 경우, 경제적 이익은 reference case 1에 비해 최대 \$21.4, reference case 2에 비해 최대 \$23.5 증가시킬 수 있었으며, 전력 자가소비율은 reference case 1에 비해 최대 12.6%, reference case 2에 비해 최대 0.1% 증가시킬 수 있었다 (optimization weight: 1). 한편, 같은 자가소비율에서 더 많은 경제적 이익을 얻을 수 있는 일일 충방전 제한 횟수가 2인 최적 운영전략이 적용된 경우, 경제적 이익은 reference case 1에 비해 최대 \$33.6, reference case 2에 비해 최대 \$36.1만큼 증가시킬 수 있었으며, 전력 자가소비율은 reference case 1에 비해 최대 12.6%, reference case 2에 비해 최대 0.1% 증가시킬 수 있었다.

결과적으로, 분산형 태양광 발전 연계 에너지 저장장치 최적운영전략을 적용함으로써 태양광 발전 시스템만 적용했을 때보다 더 많은 경제적 및 환경적 이익을 얻을 수 있었으며, 기존의 rule-based scheduling보다 더 다양한 범위의 경제적 및 환경적 이익을 얻을 수 있었다. 그러나 태양광 발전 시스템만 적용되었을 때보다 에너지 저장장치가 함께 적용되었을 때 환경적 이익이 감소한다면, 그것은 에너지 저장장치의 목적에 맞지 않다고 볼 수 있으므로, reference case 1보다 전력 자가소비율이 더 커야할 필요가 있다. 따라서 최적화 가중치가 0.4 이하인 경우, reference case 1에 비해 전력 자가소비율이 더 작았으므로 최적화 가중치는 0.5 이상으로 설정해야 한다.



[그림 2-6] Reference case와 최적 운영전략의 경제적 및 환경적 이익 비교

(2) 핵심성과 2: 커뮤니티 기반 ‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’

(가) 단위성과 B-1-①: 경제성 영향요인 DB 구축

분산형 에너지 개인 간 거래를 통하여 전력을 판매하는 에너지 프로슈머의 경제성은 전력 거래 가격에 따라 달라지므로, 전력거래 가격은 에너지 프로슈머의 경제성에 영향을 주는 주요한 요인이 된다. 따라서 에너지 프로슈머가 분산형 에너지 개인 간 거래에 참여하기 위해서, 전력거래 가격은 에너지 프로슈머의 경제성이 보장되는 수준에서 설정되어야 한다.

에너지 프로슈머의 경제성이 보장되기 위하여 분산형 에너지 개인 간 거래의 전력거래 가격은 분산형 에너지 발전에 소비되는 비용보다 높은 수준이어야 하므로, 균등화발전비용과 상계거래 기반 이익을 기반으로 최소 전력거래 가격이 설정될 수 있다. 최소 전력거래 가격을 산출하기 위하여, 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 에너지 프로슈머가 수익을 기대할 수 있는 시장 참여 조건을 설정하였다. 먼저, 에너지 프로슈머의 입장에서 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 얻을 수 있는 수익이 상계거래를 통해 거래하는 경우보다 높을 경우 분산형 에너지 개인 간 거래에 참여할 것이라고 예상되며, 이에 따라 다음의 [수식 2-13]를 만족해야 한다. [수식 2-13]에서 좌변은 에너지 프로슈머로부터 일부 전력을 구매하였을 경우의 전력 비용이고, 우변은 한국전력공사로부터 모든 전력을 구매하였을 경우의 전력 비용이다. [수식 2-13]를 기반으로, 에너지 프로슈머의 입장에서 전력을 에너지 컨슈머에게 판매할 경우의 최소 가격은 다음의 [수식 2-14]와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{B(EC_{prosumer}) - B(EC_{grid}) + P_{min} \times (EG - EC_{self})}{B(EC_{prosumer}) - B(EC_{grid} - (EG - EC_{self}))} \geq \text{-----} \quad \text{[수식 2-13]}$$

$$P_{min} \geq \frac{B(EC_{grid}) - B(EC_{grid} - (EG - EC_{self}))}{(EG - EC_{self})} \text{-----} \quad \text{[수식 2-14]}$$

여기서, $B(x)$ 는 소비전력량 x 에 대한 전기요금을 의미한다 (US\$), $EC_{prosumer}$ 는 에너지 프로슈머의 월 총 소비전력량 (kWh)을 의미한다 ($EC_{prosumer} = EC_{grid} + EC_{self}$), EC_{grid} 는 그리드로부터 수전한 전력량 (kWh)을 의미한다, EC_{self} 는 에너지 프로슈머가 자가소비한 전력량 (kWh)을 의미한다, EG 는 태양광 발전 시스템을 통해 발전한 발전량 (kWh)을 의미한다, 그리고 P_{min} 은 최소 전력거래가격 (US\$/kWh)을 의미한다.

두 번째, 위의 조건과 더불어, 에너지 프로슈머는 기본적으로 건물에 설치한 태양광 발전 시스템의 발전 비용 보전을 통해 경제성을 확보해야 하기 때문에 에너지 프로슈머 입장에서의 최소 전력거래 가격은 균등화발전비용 (LCOE)보다 커야 한다. 즉, 최종적으로 에너지 프로슈머가 분산형 에너지 개인 간 거래 시장에 참여하기 위한 최소 전력거래 가격의 조건은 다음의 [수식 2-15]와 같이 정의할 수 있다.

$$P_{min} \geq \max \left\{ LCOE_{PV}, \frac{B(EC_{grid}) - B(EC_{grid} - (EG - EC_{self}))}{(EG - EC_{self})} \right\} \text{-----} \quad \text{[수식 2-15]}$$

결과적으로, 에너지 프로슈머 관점에서의 최소 전력거래가격은 그리드로부터 수전한 전력량 (EC_{grid}), 태양광 발전 시스템의 발전량 (EG), 에너지 프로슈머가 자가소비한 전력량 (EC_{self})을 기반으로 계산할 수 있다. 상기한 방법으로, 분산형 에너지 개인 간 거래에서 에너지 프로슈머의 경제성에 대한 영향요인인 최소 전력거래가격에 대한 데이터베이스가 구축되었다. [표 2-1]은 월별, 월 소비전력량과 자가소비율에 따른 540개의 전력거래 시나리오에 대하여, 에너지 프로슈머의 입장에서 전력판매를 통해 수익을 기대할 수 있는 최대 전력거래가격을 계산한 결과를 보여준다.

먼저, 월 전력소비량에 따른 최소 전력거래가격을 살펴보면, 월 소비전력량이 증가할수록 수익성이 보장되는 최소 전력거래가격은 대체로 증가하는 것으로 나타났다 (US\$0.05/kWh to US\$0.34/kWh) ([표 2-1] 참조). 이는, 전력요금 누진제 때문인데, 에너지 프로슈머의 월 전력소비량이 증가할수록 전력요금이 가파르게 증가하여, 높은 전력거래가격 (i.e, 최대 US\$0.34/kWh)으로 잉여전력을 판매해야 수익성을 기대할 수 있기 때문이다.

다음으로, 자가소비율에 따른 최소 전력거래 가격을 살펴보면, 자가소비율이 증가할수록 수익성이 보장되는 최소 전력거래 가격은 대체로 감소하는 것으로 나타났다 ([표 2-1] 참조). 이는, 상계거래에서는 에너지 프로슈머의 발전량을 기반으로 전력요금이 offset되어 자가소비율에 관계없이 수익이 동일한 반면, 분산형 에너지 개인 간 거래에서는 에너지 프로슈머가 자가소비하는 전력이 많아질수록 전력요금에 적용되는 누진구간이 낮아져 얻을 수 있는 수익이 커지기 때문이다. 이에 따라, 각 월 전력소비량별로 최소 전력거래 가격이 크게 감소하는 자가소비율이 있다. 이는, 에너지 프로슈머가 생산하는 전력으로 인하여 특정 자가소비율에 도달하게 되면, 적용되는 누진구간이 한 단계 낮아져 전력요금이 감소하게 되므로, 낮은 전력거래 가격으로도 수익성을 기대할 수 있기 때문이다.

마지막으로, 계절에 따른 최대 전력거래 가격을 살펴보면, 일반 계절과 하계 모두에서 자가소비율이 증가함에 따라 최소 전력거래 가격이 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 일반 계절일 때가 하계일 때 보다 대체로 최소 전력거래가격이 높게 나타났다. 이는, 하계에 완화된 누진요금이 적용되어 월간 소비전력량이 200 ~ 300 kWh, 400 ~ 500 kWh인 에너지 프로슈머가 혜택을 받음에 따라 더 낮은 전력거래가격으로 잉여전력을 판매해도 수익성을 기대할 수 있기 때문이다.

[표 2-1] 에너지 프로슈머의 최소 전력거래가격 분석 결과

월 소비 전력량	자가 소비율	최대 전력거래가격 (US\$/kWh)											
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
200 kWh	10%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06
	20%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	30%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	40%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	50%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	60%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	70%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	80%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	90%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
300 kWh	10%	0.14	0.12	0.10	0.09	0.09	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.14	0.14
	20%	0.13	0.11	0.09	0.08	0.08	0.10	0.11	0.10	0.11	0.10	0.13	0.14
	30%	0.12	0.10	0.08	0.07	0.07	0.09	0.11	0.10	0.10	0.09	0.13	0.13
	40%	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.07	0.07	0.06	0.09	0.09
	50%	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.07	0.06	0.06	0.09	0.09
	60%	0.09	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0.07	0.06	0.05	0.09	0.09
	70%	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0.06	0.05	0.05	0.09	0.09
	80%	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0.05	0.05	0.05	-c	-
	90%	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.05	0.05	-	-
400 kWh	10%	0.18	0.16	0.15	0.14	0.14	0.16	0.14	0.13	0.16	0.16	0.18	0.19
	20%	0.18	0.16	0.15	0.14	0.14	0.15	0.13	0.12	0.16	0.15	0.19	0.20
	30%	0.17	0.16	0.14	0.13	0.13	0.15	0.12	0.11	0.15	0.15	0.19	0.20
	40%	0.17	0.15	0.13	0.12	0.12	0.14	0.13	0.12	0.15	0.14	0.19	0.22
	50%	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	60%	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	-	-
	70%	-	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09	-	0.09	0.09	0.09	-	-
	80%	-	-	0.09	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-	-
	90%	-	-	-	0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	-
500 kWh	10%	0.23	0.22	0.21	0.20	0.20	0.23	0.16	0.15	0.24	0.23	0.23	0.24
	20%	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.19	0.15	0.14	0.20	0.19	0.18	0.18
	30%	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.20	0.14	0.13	0.21	0.20	0.18	0.18
	40%	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.20	0.09	0.09	0.22	0.21	0.18	0.18
	50%	0.18	0.18	0.18	0.16	0.16	0.22	0.09	0.09	0.26	0.23	-	-
	60%	-	-	0.09	0.09	0.09	0.09	-	-	0.09	0.09	-	-
	70%	-	-	-	0.09	0.09	-	-	-	-	-	-	-
	80%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600 kWh	10%	0.27	0.26	0.24	0.24	0.24	0.25	0.23	0.22	0.25	0.25	0.28	0.29
	20%	0.27	0.25	0.24	0.23	0.23	0.24	0.18	0.18	0.25	0.24	0.29	0.30
	30%	0.27	0.24	0.22	0.22	0.22	0.23	0.18	0.18	0.24	0.23	0.30	0.34
	40%	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	-	-
	50%	-	-	0.18	0.18	0.18	0.18	-	-	0.18	0.18	-	-
	60%	-	-	-	0.18	0.18	-	-	-	-	-	-	-
	70%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

비고: 환율 (KRW/US\$)은 달러 당 1191.50 원으로 적용 (2019년 5월 23일 기준).

(나) 단위성과 B-2-①: 경제성 영향요인 DB 구축

분산형 에너지 개인 간 거래를 통하여 전력을 구매하는 에너지 컨슈머의 전력 비용은 전력거래 가격에 따라 달라지므로, 전력거래 가격은 에너지 컨슈머의 경제성에 영향을 주는 주요한 요인이 된다. 따라서 에너지 컨슈머를 분산형 에너지 개인 간 거래에 참여시키기 위하여, 전력거래 가격은 에너지 컨슈머의 경제성이 보장되는 수준에서 설정되어야 한다.

에너지 컨슈머의 경제성이 보장되기 위하여 분산형 에너지 개인 간 거래의 전력거래가격은 기존 요금제도의 가격보다 저렴해야 하므로, 기존가격을 기반으로 최대 전력거래 가격이 설정될 수 있다. 최대 전력거래 가격을 산출하기 위하여, 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 에너지 컨슈머가 비용 절감을 기대할 수 있는 시장 참여 조건을 설정하였다. 에너지 컨슈머의 입장에서 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 전력 비용을 절감하기 위해서는, 에너지 프로슈머로부터 소비전력 일부를 구매하였을 경우의 전력 비용이 온전히 한국전력공사로부터 전력을 구매하였을 경우의 전력 비용보다 낮아야 하며, 이에 따라 다음의 [수식 2-16]를 만족해야 한다. [수식 2-16]에서 좌변은 에너지 프로슈머로부터 일부 전력을 구매하였을 경우의 전력 비용이고, 우변은 한국전력공사로부터 모든 전력을 구매하였을 경우의 전력 비용이다. [수식 2-16]를 기반으로, 에너지 컨슈머의 입장에서 에너지 프로슈머로부터 구매할 전력의 최대 가격은 다음의 [수식 2-17]과 같이 정리할 수 있다. 결과적으로, 에너지 컨슈머 관점에서의 최대 전력거래가격은 월 총 전력소비량과 에너지 프로슈머로부터 구매할 전력량 (EC_{P2P})을 기반으로 계산할 수 있다.

$$B(EC_{consumer} - EC_{P2P}) + P_{max} \times EC_{P2P} \leq B(EC_{consumer}) \text{ ----- [수식 2-16]}$$

$$P_{max} \leq B\left(\frac{(EC_{consumer}) - B(EC_{consumer} - EC_{P2P})}{EC_{P2P}}\right) \text{ ----- [수식 2-17]}$$

여기서, $EC_{consumer}$ 는 에너지 컨슈머의 월 총 전력소비량(kWh)을 의미한다, ($EC_{consumer} > EC_{P2P}$), EC_{P2P} 는 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 에너지 프로슈머로부터 구매한 전력량 (kWh)을 의미한다, 그리고 P_{max} 는 에너지 컨슈머의 최대 전력거래가격 (US\$/kWh)을 의미한다.

상기한 방법으로, 분산형 에너지 개인 간 거래에서 에너지 컨슈머의 경제성에 대한 영향요인인 최대 전력거래 가격에 대한 데이터베이스가 구축되었다. [표 2-2]은 계절별, 월 소비전력량과 잉여전력 구매율에 따른 90개의 전력거래 시나리오에 대하여, 에너지 컨슈머의 입장에서 비용을 절감할 수 있는 최대 전력거래가격을 계산한 결과를 보여준다.

[표 2-2] 에너지 컨슈머의 최대 전력거래가격 분석 결과

월 소비전력량	잉여전력 구매율	최대 전력거래가격 (US\$/kWh)	
		일반요금제	하계요금제 (7월~8월)
200kWh	10%	0.09	0.09
	20%	0.09	0.09
	30%	0.09	0.09
	40%	0.09	0.09
	50%	0.09	0.09
	60%	0.09	0.09
	70%	0.09	0.09
	80%	0.09	0.09
	90%	0.08	0.08
300kWh	10%	0.18	0.09
	20%	0.18	0.09
	30%	0.18	0.09
	40%	0.20	0.12
	50%	0.18	0.11
	60%	0.16	0.11
	70%	0.15	0.11
	80%	0.15	0.10
	90%	0.13	0.10
400kWh	10%	0.18	0.18
	20%	0.18	0.18
	30%	0.18	0.17
	40%	0.18	0.15
	50%	0.20	0.16
	60%	0.18	0.15
	70%	0.17	0.14
	80%	0.16	0.13
	90%	0.15	0.13
500kWh	10%	0.27	0.18
	20%	0.32	0.18
	30%	0.27	0.18
	40%	0.25	0.18
	50%	0.24	0.16
	60%	0.24	0.16
	70%	0.22	0.15
	80%	0.20	0.15
	90%	0.19	0.14
600kWh	10%	0.27	0.27
	20%	0.27	0.30
	30%	0.27	0.26
	40%	0.28	0.24
	50%	0.26	0.23
	60%	0.24	0.21
	70%	0.24	0.20
	80%	0.22	0.18
	90%	0.21	0.17

비고: 환율 (KRW/US\$)은 달러 당 1191.50 원으로 적용 (2019년 5월 23일 기준).

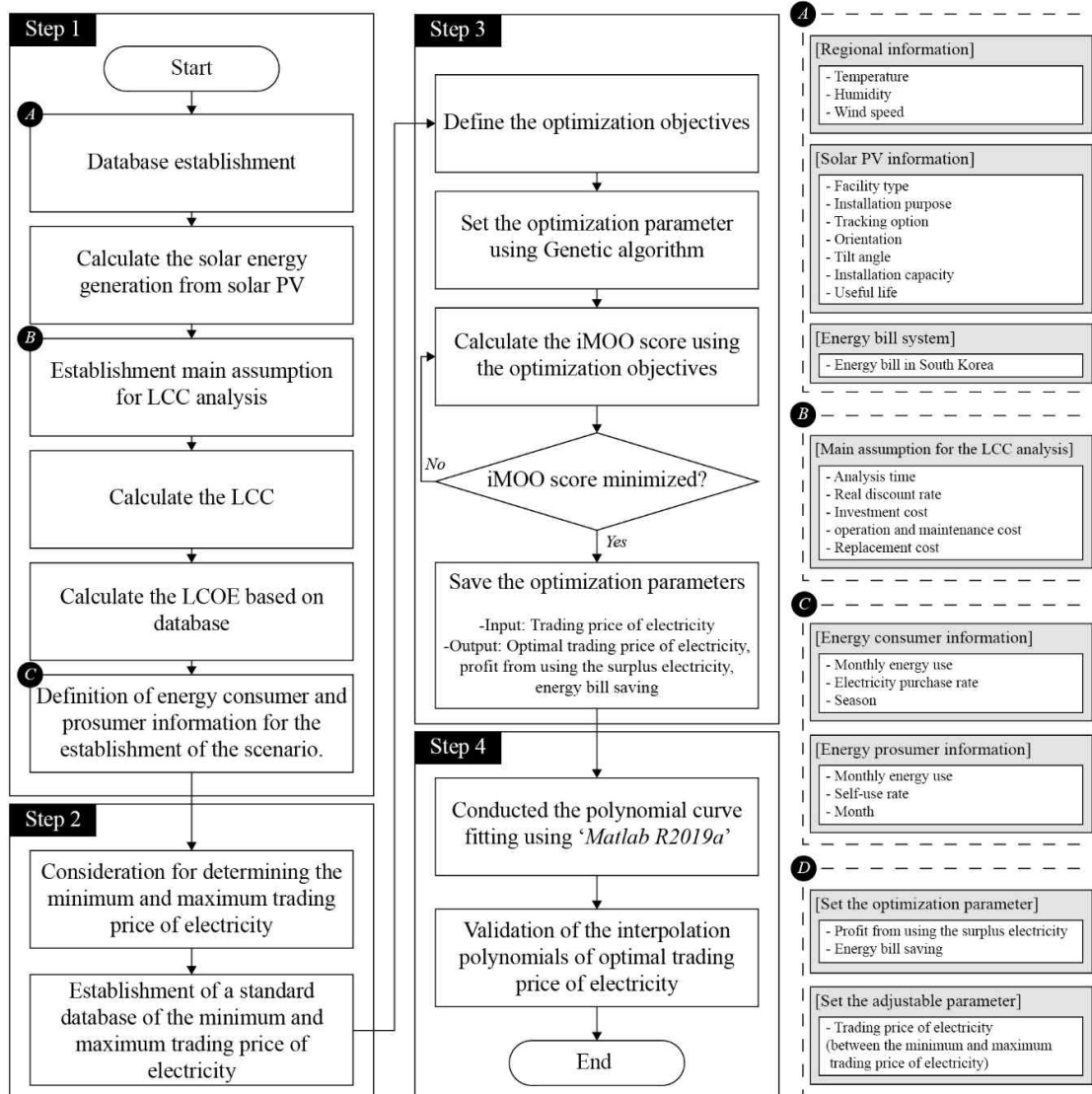
먼저, 월 전력소비량에 따른 최대 전력거래가격을 살펴보면, 월 전력소비량이 증가할수록 비용 절감이 보장되는 최대 전력거래 가격은 대체로 증가하는 것으로 나타났다 (US\$0.09/kWh to US\$0.32/kWh) ([표 2-2] 참조). 이는, 전력요금 누진제 때문인데, 에너지 소비자(에너지 소비자)의 월 전력소비량이 증가할수록 전력요금이 가파르게 증가하여, 에너지 프로슈머에게 높은 전력거래 가격 (i.e, 최대 US\$0.32/kWh)으로 잉여전력을 구매하여도 전력비용 절감을 기대할 수 있기 때문이다.

다음으로, 잉여전력 구매율에 따른 최대 전력거래 가격을 살펴보면, 잉여전력 구매율이 증가할수록 비용 절감이 보장되는 최대 전력거래 가격은 대체로 감소하는 것으로 나타났다 ([표 2-2] 참조). 이는, 에너지 프로슈머로부터 구매하는 잉여전력량이 많아질수록 한국전력공사로부터 구매하는 전력량이 줄어들고, 이에 따라 적용되는 누진 단계가 내려가 전력요금이 급격하게 감소하기 때문이다. 따라서, 각 월 전력소비량에 대하여 최대 전력거래 가격이 크게 증가하는 전력구매율이 있다 (i.e., 월 전력소비량이 (i) 300kWh: 33%; (ii) 400kWh: 50% (하계의 경우 25%); (iii) 500kWh: 20% and 60% (하계의 경우 40%); and (iv) 600kWh: 33% (하계의 경우 17%)). 이는, 에너지 소비자가 에너지 프로슈머로부터 잉여전력을 구매하여 잉여전력 구매율이 특정 비율에 도달하게 되면, 적용되는 누진 단계가 한 단계 낮아져 전력요금이 감소하게 되므로, 높은 전력거래 가격으로도 전력비용 절감을 기대할 수 있기 때문이다.

마지막으로, 계절에 따른 최대 전력거래가격을 살펴보면, 일반 계절과 하계 모두에서 잉여전력 구매율이 증가함에 따라 최대 전력거래가격이 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 일반 계절일 때가 하계일 때보다 대체로 최대 전력거래가격이 높게 나타났다. 이는, 하계에 완화된 누진요금이 적용되어 월 전력소비량이 200 ~ 300kWh, 400 ~ 500kWh인 에너지 프로슈머가 혜택을 받음에 따라 더 낮은 전력거래가격으로 잉여전력을 구매하여야 수익성을 기대할 수 있기 때문이다. 이에 따라, 일반 계절에서는 월 전력소비량이 300kWh, 400kWh 일 경우와 500kWh, 600kWh일 경우에 서로 최대 전력거래 가격의 범위가 유사하게 형성됨에 반해, 하계에서는 월 전력소비량이 200kWh, 300kWh 일 경우와 400kWh, 500kWh일 경우에 서로 최대 전력거래 가격의 범위가 유사하게 형성되는 것으로 분석되었다.

(다) 단위성과 B-1-②, B-2-②: 알고리즘 개발

에너지 프로슈머가 태양광 발전 시스템을 통해 생산한 전력을 자가소비한 후 남은 잉여전력의 최대 및 최소 거래가격을 기반으로 한 최적의 전력거래가격을 산정하기 위한 알고리즘은 다음과 같이 4가지 단계로 구성되었다: ① 데이터베이스 수립; ② 최대 및 최소 전력거래가격 결정; ③ 최적 전력거래가격 결정; 그리고 ④ 다항함수 보간을 통한 이산화된 최적 전력거래 가격 계산 식 도출 ([그림 2-7] 참조).



[그림 2-7] 최적 전력거래 가격 도출을 위한 알고리즘

① 데이터베이스 수립: 본 단계에서는 알고리즘의 수행에 요구되는 입력값, 즉 태양광 발전 시스템의 발전량, 균등화발전단가, 에너지 컨슈머와 프로슈머 기반 시나리오를 계산 및 수립하기 위해 데이터베이스를 수집하고, 입력값을 계산 혹은 선정한다. 먼저 태양광 발전 시스템의 발전량을 예측하기 위해, 다음의 정보들이 필요하다. 태양광 발전 시스템의 발전량은 지역적 특성에 의해 영향을 받기 때문에, 지역 정보와 관련된 정보가 필요하다. 또한, 태양광 발전 시스템과 관련된 구체적인 정보가 필요하며, 태양광 발전 시스템이 설치된 건물의 유형, 태양광 발전 시스템의 설치 목적, 태양광 발전 시스템의 태양 추적 유형, 태양광 발전 시스템의 방향 및 태양광 PV 패널의 경사각, 태양광 발전 시스템의 설치 용량, 마지막으로 태양광 발전 시스템의 연간 성능저하율과 유효수명이 포함된다. 균등화발전단가(Levelized Cost of Electricity; LCOE) 산정을 위해서는 태양광 발전 시스템의 생애주기비용(LCC)과 태양광 발전 시스템의 총발전량이 필요하다. LCC는 LCC분석을 통해 산출되며, 이에 필요한 정보는 분석 시작 연도, 분석 기간, 실질할인율, 초기투자비용(정부 보조

금 등 포함), 운영 및 유지관리 비용 (수선 및 교체비 등 포함)이다. 총발전량의 경우, 앞서 수집한 데이터를 기반으로 RETScreen을 통해 예측된다. 에너지 컨슈머와 프로슈머 기반 시나리오 수립을 위해, 에너지 컨슈머와 에너지 프로슈머를 정의하기 위한 데이터베이스를 수립하여야 한다. 에너지 컨슈머의 경우 전력의 구매와 관계가 있는데, 계절별로 전력구매 가격이 다르기 때문에 계절과 전력구매율을 기반으로 정의하게 된다. 에너지 프로슈머의 경우 자가소비 후 잉여전력의 판매와 관계가 있는데, 태양광 발전 시스템의 발전량은 월별로 편차가 크기 때문에 월 (month)과 자가소비율을 기반으로 정의하게 된다.

② 최대 및 최소 전력거래 가격 결정: 본 단계에서는 대한민국의 전력 시장 구조와 전기 요금제도를 바탕으로, 에너지 프로슈머와 컨슈머의 분산형 에너지 개인 간 거래시장 참여에 대한 경제성 측면에서 전력거래 가격을 도출한다. 에너지 프로슈머는 상계거래와 P2P 전력 거래를 통해 잉여전력을 판매할 수 있으며, 이는 각각 [수식 2-18]과 [수식 2-19]를 통해 도출할 수 있다.

$$Profit_{NM(i)} = EB_{(i)}(EU_{p(i)}) - EB_{(i)}(EU_{g(i)} - (EG_{PV(i)} - SUE_{(i)})) \text{-----} [수식 2-18]$$

$$Profit_{P2P(i)} = EB_{(i)}(EU_{p(i)}) - EB_{(i)}(EU_{g(i)}) + TP_{min} \times (EG_{PV(i)} - SUE_{(i)}) \text{---} [수식 2-19]$$

여기서 $Profit_{NM(i)}$ 는 i월에 상계거래를 통한 에너지 프로슈머의 수익을 의미한다, $Profit_{P2P(i)}$ 는 i월에 분산형 에너지 개인 간 거래를 통한 에너지 프로슈머의 수익을 의미한다, $EB_{(i)}(x)$ 는 i월의 전력소비량 x에 대한 전력요금 (US¢)을 의미한다, $EU_{p(i)}$ 는 에너지 프로슈머의 i월 총 전력소비량 (kWh)을 의미한다, $EU_{g(i)}$ 는 i월에 그리드에서 수전한 전력량 (kWh)을 의미한다, $SUE_{(i)}$ 는 i월의 자가소비전력량 (kWh)을 의미한다, TP_{min} 는 최소 전력거래 가격 (US¢/kWh)을 의미한다, EG_{PV} 는 월별 태양광 발전 시스템의 발전량 (kWh)을 의미한다, 그리고 i 는 월 (e.g., 1월, 2월, etc.)을 의미한다.

만약 [수식 2-19]의 결과가 [수식 2-18]의 결과보다 크다면, 에너지 프로슈머는 상계거래가 아닌 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 잉여전력을 판매할 것이다. 즉, 에너지 프로슈머의 최소 전력거래가격은 [수식 2-20]을 통해 계산할 수 있다.

$$TP_{min} \geq \frac{EB_{(i)}(EU_{g(i)}) - EB_{(i)}(EU_{g(i)} - (EG_{PV(i)} - SUE_{(i)}))}{(EG_{PV(i)} - SUE_{(i)})} \text{-----} [수식 2-20]$$

에너지 프로슈머의 경우, 태양광 발전 시스템의 설치 및 발전에 소비되는 비용보다 더 많은 이윤이 보장되어야 태양광 발전 시스템을 설치할 것이다. 이는 균등화발전단가를 통해 태양광 발전 시스템의 단위전력당 소비비용을 계산할 수 있다. 최종적으로, 에너지 프로슈머의 이윤이 보장되기 위해서, [수식 2-20]의 결과와 균등화발전단가를 비교하여 더 큰 결과값이 에너지 프로슈머의 최소 전력거래가격이 된다 ([수식 2-21] 참조).

$$TP_{min} \geq \max \left(LCOE, \frac{EB_{(i)}(EU_{g(i)}) - EB_{(i)}(EU_{g(i)} - (EG_{PV(i)} - SUE_{(i)}))}{(EG_{PV(i)} - SUE_{(i)})} \right) \text{---} [수식 2-21]$$

에너지 컨슈머는 기존의 전력거래방법인 한국전력공사 (KEPCO)와 모든 전력을 거래하는

것과 분산형 에너지 개인 간 거래 중 전력요금이 더 저렴한 방법을 통해 전력을 거래할 것으로 예상된다. KEPCO로부터 모든 전력을 구매할 경우의 전력요금은 [수식 2-22]을 통해 계산할 수 있으며, 일부 전력을 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 거래하였을 경우의 전력요금은 [수식 2-23]를 통해 산정된다.

$$Expense_{KEPCO(i)} = EB_{(i)}(EU_{c(i)}) \text{-----} [\text{수식 2-22}]$$

$$Expense_{P2P(i)} = EB_{(i)}(EU_{c(i)} - P_i) + TP_{\max} \times P_i \text{-----} [\text{수식 2-23}]$$

여기서 $Expense_{KEPCO(i)}$ 은 에너지 컨슈머가 i 월에 KEPCO로부터 모든 전력을 구매할 경우의 전력요금을 의미한다, $EB(x)$ 은 i 월의 전력소비량 x 에 대한 전력요금 (US\$)을 의미한다, $EU_{c(i)}$ 는 에너지 컨슈머의 i 월 총 전력소비량 (kWh)을 의미한다, $Expense_{P2P(i)}$ 은 i 월에 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 일부 전력을 에너지 프로슈머로부터 구매할 경우의 전력요금을 의미한다, $TP_{\max}$ 는 최대 전력거래 가격 (US\$/kWh)을 의미한다, P_i 는 i 월에 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 구매한 전력량 (kWh)을 의미한다, 그리고 i 는 월 (e.g., 1월, 2월, etc.)을 의미한다.

만약 [수식 23]의 결과가 [수식 22]의 결과보다 작다면, 에너지 컨슈머는 모든 전력을 KEPCO로부터 구매하는 것이 아닌 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 일부 전력을 구매할 것이다. 최종적으로, 에너지 컨슈머의 최대 전력거래 가격은 [수식 2-24]을 통해 계산할 수 있다.

$$TP_{\max} \leq \frac{EB_{(i)}(EU_{c(i)}) - EB_{(i)}(EU_{c(i)} - P_i)}{P_i} \text{-----} [\text{수식 2-24}]$$

③ 최적 전력거래 가격 결정: 본 단계에서는 앞서 계산된 최대 및 최소 전력거래 가격을 바탕으로, 에너지 프로슈머와 컨슈머의 최적 전력거래 가격을 결정한다. 최적 전력거래 가격을 결정하는데 있어, 에너지 프로슈머와 컨슈머의 이익은 서로 상충관계를 가진다. 본 연구에서는 이를 GA와 파레토 최적해를 통해 해결하였다. 먼저 목적 함수 (에너지 프로슈머의 수익 (Z_A)과 에너지 컨슈머의 전력요금 절감액 (Z_B))에 대해 정의한다. 에너지 프로슈머의 수익은 잉여전력의 판매를 통한 수익을 의미하며, [수식 2-19]과 [수식 2-18]의 차액을 통해 도출할 수 있다. 에너지 컨슈머의 수익은 잉여전력의 구매를 통한 전력요금 절감액을 의미하며, [수식 2-23]과 [수식 2-22]의 차액으로 계산된다. 이후 [수식 2-25]를 통해 목적 함수를 0에서 1사이로 표준화한다.

$$S_A = \left| \frac{Z_A - Z_A^{\min}}{Z_A^{\max} - Z_A^{\min}} \right| \text{-----} [\text{수식 2-25}]$$

여기서 $Z_A^{\max}$ 는 목적 함수 (Z_A)의 최대값을 의미한다, $Z_A^{\min}$ 은 목적 함수 (Z_A)의 최소값을 의미한다, 그리고 S_A 는 Z_A 의 표준화된 값을 의미한다.

최적 전력거래 가격은 GA를 통해 파레토 최적해를 추출하여 계산된다. 앞서 구한 표준화된 목적 함수를 바탕으로, [수식 2-26]의 적합도 함수 (fitness function)를 계산한다. 이를

통해 최대 및 최소 전력거래 가격 범위 내에서 전력거래가격이 변경될 때의 iMOO 점수가 계산된다. 계산된 iMOO 점수가 최소가 되는 전력거래 가격이 최종적으로 최적 전력거래 가격이 된다.

$$Fitness\ function = \sqrt{W_A(S_A - 0)^2 + W_B(S_B - 0)^2} \text{ ----- [수식 2-26]}$$

여기서 S_A 와 S_B 는 각각 Z_A 와 Z_B 의 표준화된 값 (0~1)을 의미한다, 그리고 W_A 와 W_B 는 각각 Z_A 와 Z_B 의 가중치를 의미한다.

④ 다항함수 보간을 통한 이산화된 최적 전력거래 가격 계산 식 도출: 연속적인 자가소비율과 전력구매율 (10~90% 사이)의 모든 경우의 수를 대상으로 전력거래 가격의 최적화를 진행하는 것은 너무나 많은 시간이 소비되는 작업이다. 따라서, 연속적인 구간의 최적 전력거래 가격을 도출하기 위해 본 연구에서는 다항함수 보간을 수행하였다. 본 단계에서는 9개의 자가소비율과 9개의 전력구매율 (i.e., 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%)을 대상으로 최적 전력거래 가격에 대한 다항함수 보간을 통해 연속적인 구간의 최적 전력거래 가격을 계산할 수 있는 다항식을 도출하였다. 다항함수 보간은 Matlab software를 통해 수행되었다. 결과적으로, 보간된 다항함수의 예측 정확도는 [수식 2-27]을 통해 계산되는 평균 절대 백분율 오차 (Mean Average Percentage Error; MAPE)를 기반으로 그 정확도를 평가하게 된다.

$$MAPE = \left(\sum_{i=0}^n \left| \frac{AV_i - EV_i}{AV_i} \times \frac{1}{n} \right| \right) \times 100 \text{ ----- [수식 2-27]}$$

여기서 $MAPE$ 는 평균 절대 백분율 오차를 의미한다, AV 는 최적화 모델을 통해 계산된 실제값을 의미한다, EV 는 보간된 다항함수를 통해 계산된 최적화 목적의 예측값을 의미한다, 그리고 n 은 데이터 수를 의미한다.

(3) 핵심성과 3: 커뮤니티 기반 ‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’

(가) 단위성과 C-1-①: 개인 간 거래 전략 수립

에너지 프로슈머의 관점에서 수립한 540가지 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오와 에너지 컨슈머의 관점에서 수립한 90가지 전력 소비 패턴 시나리오를 기반으로, 본 연구는 에너지 프로슈머와 컨슈머가 수익을 얻을 수 있는 전력 거래 전략을 수립하였다. 경제성을 고려하지 않고 모든 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오를 통하여 개인 간 거래 전략을 수립할 경우 총 24,300 가지의 개인 간 거래 전략이 생성될 수 있다. 본 연구에서는 최소 전력거래가격과 최대 전력거래가격을 고려하여, 에너지 프로슈머와 컨슈머의 입장에서 모두 분산형 에너지 개인 간 거래에 있어서 수익성이 있는 에너지 프로슈머와 컨슈머에 대하여 매칭을 수행하고, 이러한 매칭을 수익성 있는 분산형 에너지 개인 간 거래라고 하였다. 즉, 에너지 프로슈머의 입장에서 최소 전력거래가격보다 높은 가격에 분산형 에너지 개인 간 거래가 가능한 에너지 컨슈머를 찾고, 에너지 컨슈머 입장에서 최대 전력거래가격보다 낮은 가격에 분산형 에너지 개인 간 거래가 가능한 에너지 프로슈머를 찾아, 분산형 에너지 개인 간 거래 전략을 제시하는 것을 목표로 하였다. 이에 따라, 최소 및 최대 전력거래가격을 기반으로 한 매칭 여부 판단은 다음과 같이 세 가지 경우로 나뉜다. 먼저, 최소 전력거래가격이 최대 전력거래가격보다 클 경우, 에너지 프로슈머는 에너지 컨슈머의 최대 전력거래가격보다 높은 가격에 잉여전력을 판매해야 하기때문에, 에너지 프로슈머와 컨슈머의 입장에서 모두 수익성이 없어 거래가 불가능하다. 두 번째, 에너지 프로슈머의 최소 전력거래가격과 에너지 컨슈머의 최대 전력 거래 가격이 같을 경우, 해당 가격으로 거래할 경우 에너지 프로슈머와 컨슈머의 입장에서 서로 얻는 이익은 없으나 손해도 없기 때문에 거래는 가능하다. 마지막으로, 에너지 프로슈머의 최소 전력거래가격이 에너지 컨슈머의 최대 전력거래가격보다 낮을 경우, 최소 전력거래가격과 최대 전력거래가격의 범위 내에서 거래할 경우 에너지 프로슈머와 컨슈머의 입장에서 모두 수익성이 있어 거래가 가능하다 ([표 2-3] 참조).

[표 2-3] 분산형 에너지 개인 간 거래 전략 수립을 위한 판단기준

구분	판단
최소 전력거래가격 > 최대 전력거래가격	수익성 없음
최소 전력거래가격 = 최대 전력거래가격	거래 가능
최소 전력거래가격 < 최대 전력거래가격	수익성 있음

(나) 단위성과 C-1-②: 에너지 자립도 분석

본 연구에서는 에너지 프로슈머와 에너지 컨슈머의 관점에서 각각 1,296개와 216개의 분산형 에너지 개인 간 거래 시나리오를 수립하고, 모든 시나리오를 통합함으로써 총 139,968개 ($1,296 \times 216$)개의 분산형 에너지 개인 간 거래 시나리오를 수립하였다. 그러나 시간적인 한계로 인해 본 연구에서는 발전량이 가장 많은 5월을 대상으로 분석하였다.

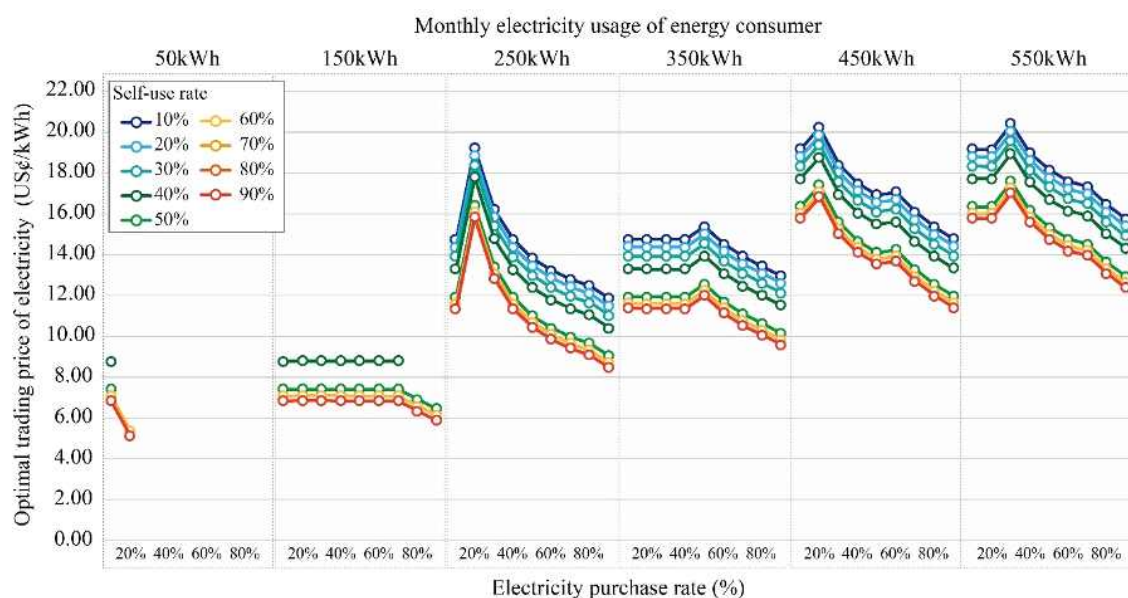
에너지 프로슈머의 관점에서 최적 전력거래 가격 분석 결과는 다음과 같이 설명할 수 있다.

[그림 2-8], [그림 2-9]은 각각 월 전력소비량이 350kWh, 550kWh인 에너지 프로슈머가 에너지 컨슈머와 분산형 에너지 개인 간 거래를 할 때 최적 전력거래 가격을 보여준다.

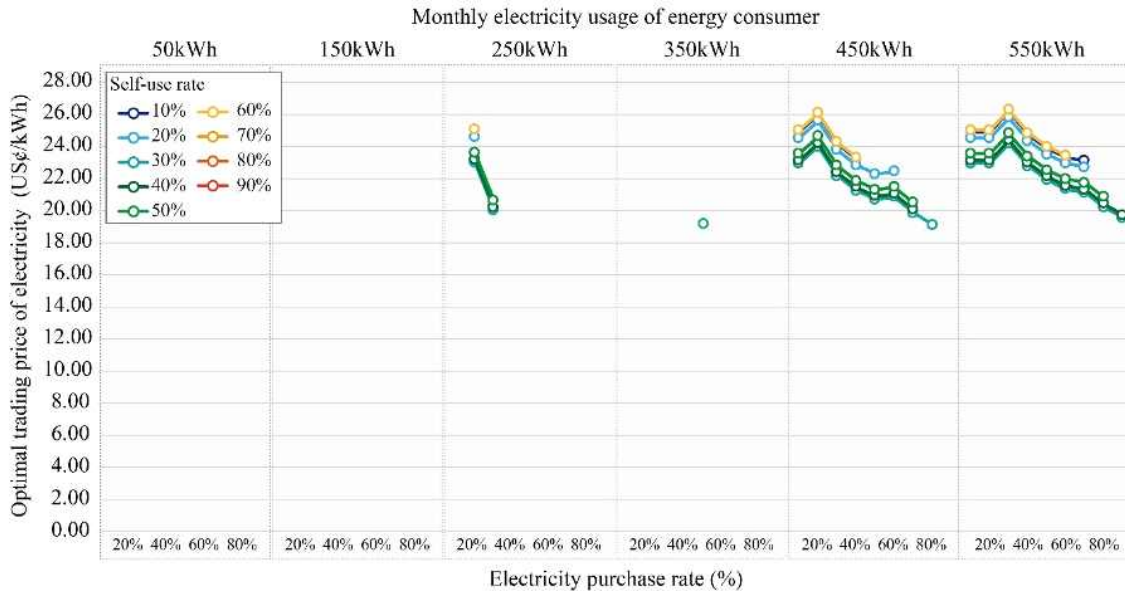
첫 번째로, 거래할 에너지 컨슈머의 월 전력소비량이 높을수록 최적 전력거래 가격이 증가하였다 (US\$5.09-16.98/kWh ~ US\$8.87-26.18/kWh). 이는 한국의 전기요금제도의 특징인 누진세가 적용되기 때문이다. 에너지 컨슈머의 월 전력소비량이 많을수록 한전에 지불해야 하는 전력요금은 급격하게 증가하는데, 이때 에너지 프로슈머로부터 잉여전력을 구매하여 누진구간을 낮춘다면 전기요금을 크게 낮출 수 있어 더 비싼 가격에 잉여전력을 구매하여도 큰 이익을 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 에너지 프로슈머의 월 전력소비량이 550kWh인 경우 전력의 최저 거래가격이 높아져 최대거래 가격이 상대적으로 낮은 에너지 컨슈머와의 거래가 불가능해 거래 가능한 시나리오의 수가 크게 줄어든다.

두 번째로, 에너지 프로슈머의 자가소비율이 높을수록 최적 전력거래가격이 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 자가소비율이 높아지면 더 낮은 가격에 잉여전력을 판매해도 이익을 얻을 수 있기 때문이다. 그러나, 에너지 프로슈머의 월 전력소비량이 550kWh인 경우 자가소비율이 약 30%일 때 까지 최적 전력거래 가격이 하락한 후 다시 상승하였다. 이는 에너지 프로슈머의 자가 사용률이 증가하면 판매할 수 있는 잉여전력이 감소하나, 에너지 프로슈머가 자가소비를 통해 얻을 수 있는 이익은 크게 증가하지 않기 때문이다.

세 번째로, 에너지 컨슈머의 전기 구매율이 높을수록 최적 전력거래 가격은 낮아지는 경향을 보였다. 이는 에너지 컨슈머가 에너지 프로슈머로부터 더 많은 잉여전력을 구매함에 따라 얻을 수 있는 수익이 점차 감소하기 때문이다. 그러나 특정 구간 (250kWh:20%, 350kWh:43%, 450kWh:12%, 44%, 550kWh:28%)에서는 에너지 컨슈머가 해당 구간의 에너지 프로슈머로부터 잉여전력을 구입할 경우 누진 구간이 감소해 전기요금 절감액이 크게 증가한다. 다시 말해, 에너지 프로슈머가 얻을 수 있는 이익에는 변화가 없기 때문에 최적 전력거래가격에는 변화가 없지만, 에너지 컨슈머의 이익은 증가하여 최대 전력거래 가격과 최적 전력거래 가격의 상승으로 이어진다.



[그림 2-8] 월 350kWh의 전기사용량에 따른 에너지 프로슈머의 최적 전기거래가격



[그림 2-9] 월 550kWh의 전기사용량에 따른 에너지 프로슈머의 최적 전기거래가격

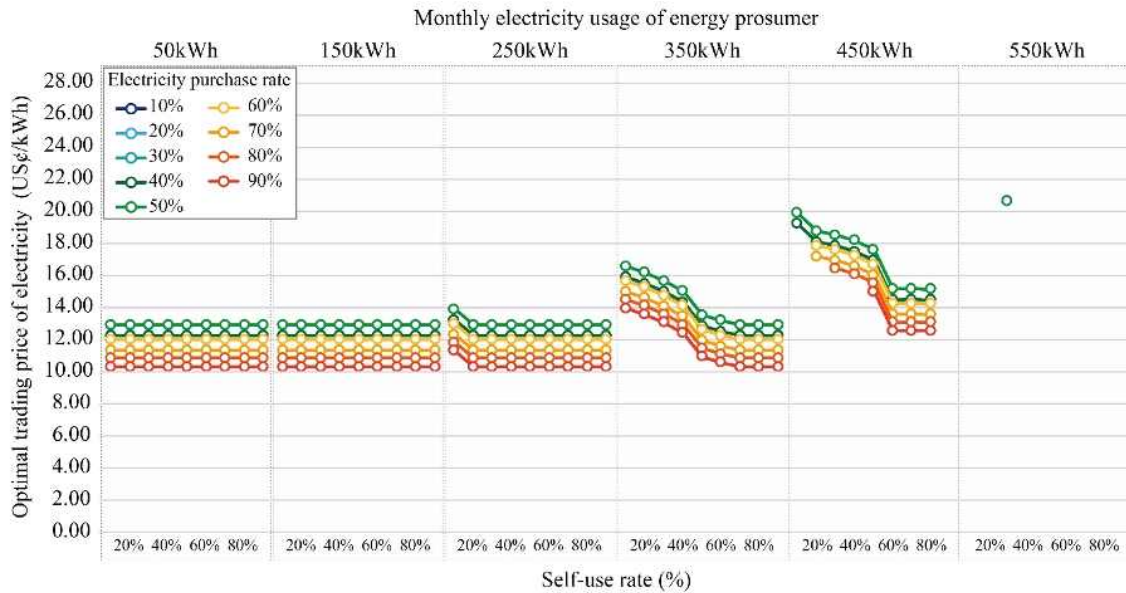
에너지 컨슈머의 관점에서 최적 전력거래가격 분석 결과는 다음과 같다. [그림 2-10]과 [그림 2-11]는 각각 월 전력소비량이 350kWh, 550kWh인 에너지 컨슈머가 에너지 프로슈머와 분산형 에너지 개인 간 거래를 할 때 최적 전력거래가격을 보여준다.

첫 번째로, 에너지 컨슈머의 월 전력소비량이 높을수록 최적 전력거래가격이 증가하였다 (US\$5.09 - 8.90/kWh에서 US\$11.36 - 26.18/kWh). 이는 에너지 컨슈머의 월 전력소비량이 증가하면 누진세가 적용되어 에너지 컨슈머가 한전에 지불해야 하는 전력요금이가 크게 늘어나기 때문이다. 그러나 누진 구간이 1단계인 에너지 컨슈머가 에너지 프로슈머로부터 잉여전력을 구매한다면, 잉여전력의 구매를 통해 누진 구간을 낮출 수 없어 최적 전력거래 가격에 영향이 없다. 반면, 에너지 컨슈머의 월 전력소비량이 높을 경우 최적 전력거래 가격이 증가하였는데, 이는 비교적 높은 거래가격에 잉여전력을 구매해도 누진 구간을 낮출 수 있을 경우 이익을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 에너지 컨슈머의 월 전력소비량이 높을수록 거래 가능한 시나리오가 증가하는 모습을 보였다.

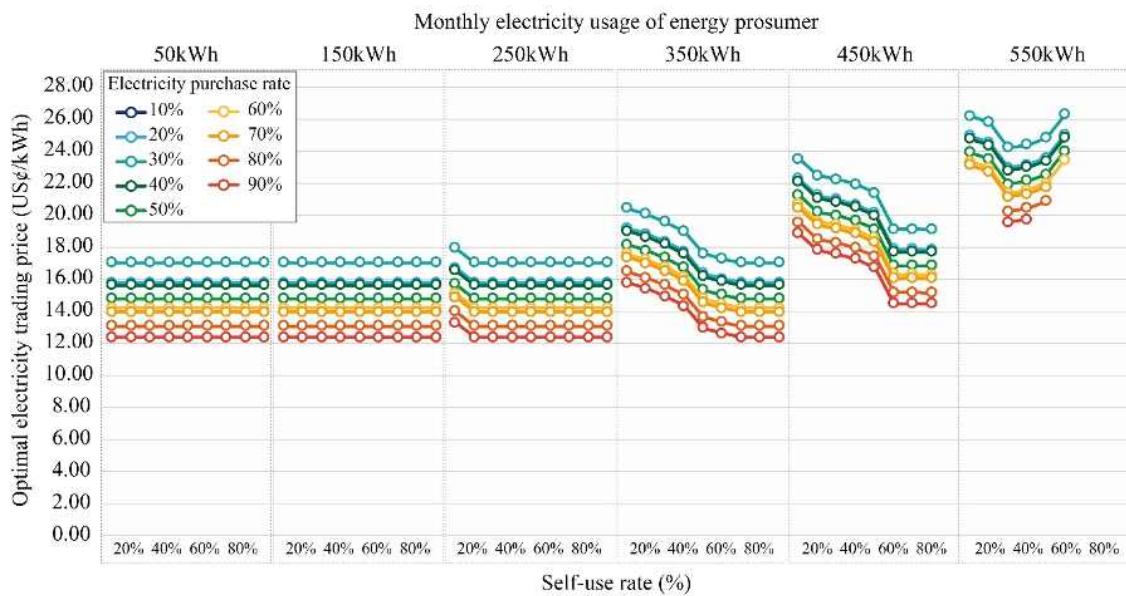
두 번째로, 에너지 컨슈머의 잉여전력 구매율이 증가할수록 최적 전력거래 가격은 낮아졌지만, 특정 구간에서 상승하였다. 리용 해당 구간에서 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 에너지 프로슈머로부터 잉여전력을 구매하면 누진 구간을 낮출 수 있어 한전에 지불해야 할 전력요금이 크게 줄어들기 때문이다.

세 번째로, 에너지 프로슈머의 자가소비율이 증가함에 따라 최적 전력거래 가격은 하락하다 일정수준을 유지하였다. 이는 에너지 프로슈머의 자가소비율이 높아짐에 따라 누진 구간이 낮아져 보다 저렴한 가격에 잉여전력을 판매해도 수익을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 특정 구간에서 최적 전력거래 가격이 일정한 수준을 유지하는 이유는 에너지 프로슈머가 태양광 발전 시스템을 통해 생산하는 전력을 자가소비하여 누진 구간을 낮추면, 이후 자가소비로 얻을 수 있는 이익이 크지 않아 최소 전력거래 가격이 거의 일정하게 유지되기 때문이다. 또한, 에너지 프로슈머의 월 전력소비량이 550kWh인 경우, 에너지 프로슈머의 자

가소비율이 30% 이상일 때, 잉여전력 판매량의 증가에 따른 이익의 증가가 크지 않기 때문에 최적 전력거래가격은 하락하다가 다시 증가한다.



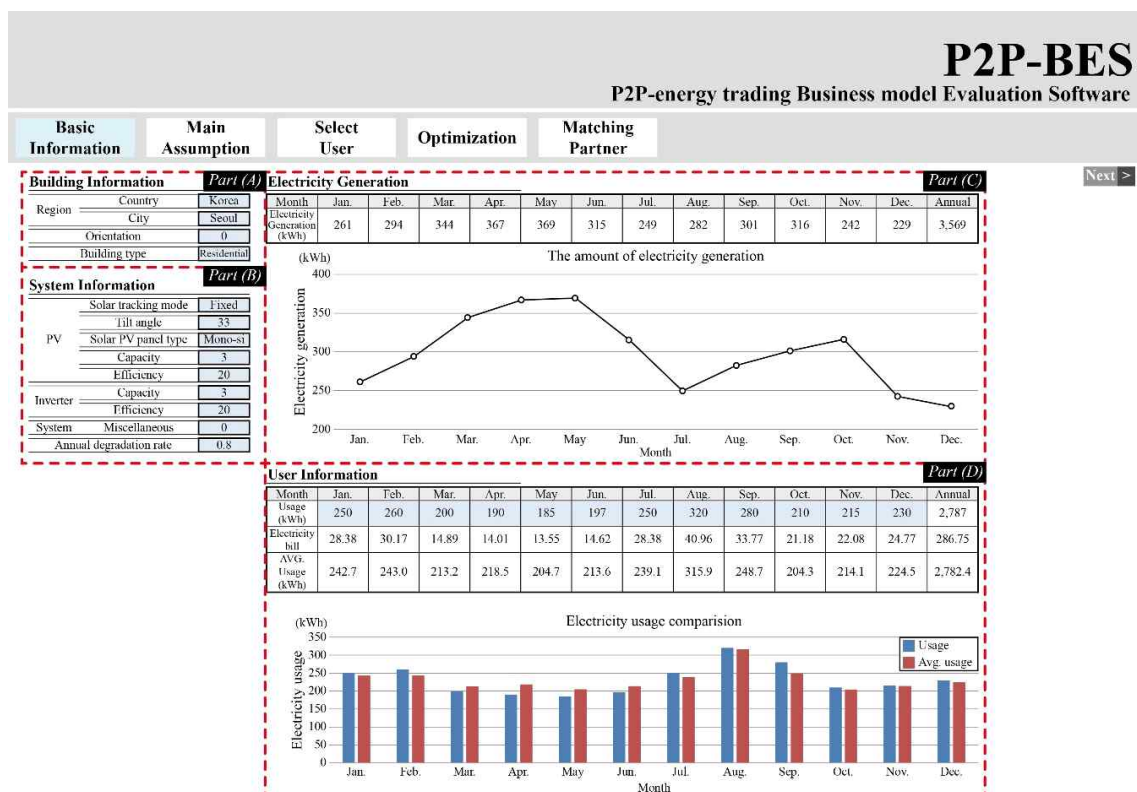
[그림 2-10] 350kWh의 월 전기 사용량을 가진 에너지 컨슈머의 최적 전기거래가격



[그림 2-11] 월 550kWh의 전력 사용량을 가진 에너지 컨슈머의 최적 전기거래가격

(다) 단위성과 C-2-①: 소프트웨어 개발

건물주, 건물 관리자, 거주자 등과 같은 비전문가가 태양광 PV 패널의 발전량을 추정하고 사전계획 및 설계단계에서 경제성을 분석하여 사업 타당성을 평가하는 것은 실제로 매우 어려운 일이다. 이를 해결하려면 비전문가도 쉽게 사용할 수 있는 간편한 GUI (Graphic User Interface)를 가진 모델을 개발하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 Microsoft Excel 기반 VBA를 활용하여 P2P 전력 거래 사업성 평가 모델 (P2P energy trading business model evaluation software; P2P-BES)을 개발했다. 개발된 모델은 5단계로 구성되며 [그림 2-12]는 P2P-BES의 GUI를 보여준다.



[그림 2-12] P2P-BES의 GUI 1

• Part (A) ([그림 2-12] 참조) : 시장 참여자들 (i.e., 에너지 프로슈머, 에너지 컨슈머)은 대상 건물의 지역적 요소와 태양광 PV 패널의 방향 및 건물 유형을 입력할 수 있다. 건물의 지역적 요소로서 대한민국 7개 광역시 (i.e., 서울, 인천, 대전, 대구, 울산, 부산, 광주) 중 하나를 선택할 수 있으며 태양광 PV 패널의 방향은 0° (남쪽), 90° (동쪽), 180° (북쪽), 270° (서쪽)를 포함하여 최대 359° 까지 입력할 수 있다. 건물 유형은 주거용, 상업용, 산업용을 선택할 수 있다.

• Part (B) ([그림 2-12] 참조) : 시장 참여자들 (i.e., 에너지 프로슈머, 에너지 컨슈머)은 설치한 태양광 PV 패널 정보를 입력할 수 있다. 태양광 PV 패널의 추적 유형 (solar tracking mode)은 고정, 1축 추적, 2축 추적 및 태양고도 추적 중 하나로 설정할 수 있다. 태양광 PV 패널의 경사각은 발전량이 최대인 경사각을 자동으로 선택하여 입력된다. 태양광 PV 패널의 유형은 1세대 태양광 패널 또는 2세대 태양광 패널을 선택할 수

있다. 태양광 PV 패널의 용량은 현재 신재생에너지 보급지원을 통해 보조금을 받을 수 있는 최대 용량인 3kW 이내의 값을 입력할 수 있다.

- Part (C) ([그림 2-12] 참조) : Part (A) 와 (B)에서 입력된 정보를 기반으로 태양광 PV 패널의 발전량은 RETScreen software를 통해 자동으로 계산된다.

- Part (D) ([그림 2-12] 참조) : 시장 참여자들 (i.e., 에너지 프로슈머, 에너지 컨슈머)의 월 전력소비량을 입력할 수 있으며, 이를 바탕으로 연간 전기요금을 산정하여 해당 지역의 월평균 전기 사용량과 비교할 수 있다.

P2P-BES

P2P-energy trading Business model Evaluation Software

Basic Information
Main Assumption
Select User
Optimization
Matching Partner

< Prev. Part (E)

ILCC Assumption

Analysis starting point	2020	yr
Analysis period	25	yrs
Real discount rate	0.8	%
Inflation rate	3.06	%
Electricity price increase rate		

Economic Assumption

Solar PV panel price	895.6	US\$/kWh
Investment cost	424.2	US\$/kWh
Solar PV panel price (with incentive)		
Total	2,686.8	US\$
O&M cost	1	%
Rate	1	yr
Cycle		
Replacement cost	9.5	%
Rate	13	yr
Cycle		

Classification	NPV	Classification	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
Investment cost	2,686.8	Present value																									
O&M cost	644.83	Future value	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	
	587.04	Present value	26.9	26.7	26.4	26.2	26.0	25.8	25.6	25.4	25.2	25.0	24.8	24.6		24.2	24.0	23.8	23.7	23.5	23.3	23.1	22.9	22.7	22.5	22.4	
Replacement cost	255.35	Future value																									
	231.97	Present value														255.2											
Electricity generation	81.162	Future value	3,569	3,540	3,512	3,484	3,456	3,429	3,401	3,374	3,347	3,320	3,294	3,267	3,241	3,215	3,189	3,164	3,139	3,113	3,089	3,064	3,039	3,015	2,991	2,967	
	74.179	Present value	3,569	3,512	3,457	3,402	3,348	3,295	3,242	3,191	3,140	3,090	3,041	2,993	2,946	2,899	2,853	2,807	2,763	2,719	2,676	2,633	2,592	2,550	2,510	2,470	

[그림 2-13] P2P-BES의 GUI 2

- Part (E) ([그림 2-13] 참조) : 경제성 분석을 위해 태양광 PV 패널의 실질 할인율과 투자 비용을 입력한다. 경제성 분석결과는 [그림 6]의 하단에 나타나 있으며, 25년의 유효수명 동안 태양광 PV 패널의 투자비용, 유지 및 보수비용, 교체비용 및 발전량을 자동으로 분석한다.

P2P-BES

P2P-energy trading Business model Evaluation Software

Basic Information
Main Assumption
Select User
Optimization
Matching Partner

< Prev. Next > Part (F)

Energy Prosumer

Classification	Value
Month	May
Monthly electricity consumption	185 kWh
Electricity generation	204.7 kWh
Self-consumption rate	20 %
The actual amount of electricity received	148 kWh
Sellable surplus electricity	167.7 kWh
LCOE	0.047 US\$/kWh
Minimum electricity trading price	0.055 US\$/kWh

Energy Consumer

Classification	Value
Season	May
Monthly electricity consumption	190 kWh
Electricity purchase rate	40 %
The actual amount of electricity received	114 kWh
The amount of electricity purchased via P2P electricity trading	76 kWh
Maximum electricity trading price	106.18 US\$/kWh

[그림 2-14] P2P-BES의 GUI 3

· Part (F) ([그림 2-14] 참조) : 시장 참여자의 유형 (i.e., 에너지 프로슈머, 에너지 컨슈머)을 선택하고 시장 참여자의 조건에 맞는 전력거래 상대와 최적 전력거래 가격을 도출한다. 에너지 프로슈머의 경우 자가소비율과 월 (month)을 입력하면 월 전력소비량, 태양광 PV 패널의 발전량, 실제 수전된 전력량, 판매 가능한 잉여전력량, LCOE를 계산하며 Part (A)-(E)에 입력된 정보를 기반으로 최소 전력거래 가격을 도출한다. 마찬가지로 에너지 컨슈머의 경우 계절과 잉여전력 구매율을 입력하면 월 전력소비량, 실제 수전량, P2P 전력 거래를 통해 구매한 잉여전력량을 계산하며, 잉여전기의 최대 전력거래 가격을 도출한다.

P2P-BES

P2P-energy trading Business model Evaluation Software

Basic Information
Main Assumption
Select User
Optimization
Matching Partner

< Prev
Next >

Optimization Goal
Part (G)

Classification	Value	Goal	Weight	Z^{max}	Z^{min}	Standardized value
Profit from selling surplus electricity (US\$)	21.72	Maximization	1	30.09	13.34	0.5
Electricity bill saving from purchase surplus electricity (US\$)	9.84	Maximization	1	13.64	6.04	0.5

iMOO Score
0.707106784

Adjustable Parameters
Part (H)

Classification	Value
Electricity trading price (US\$)	0.13

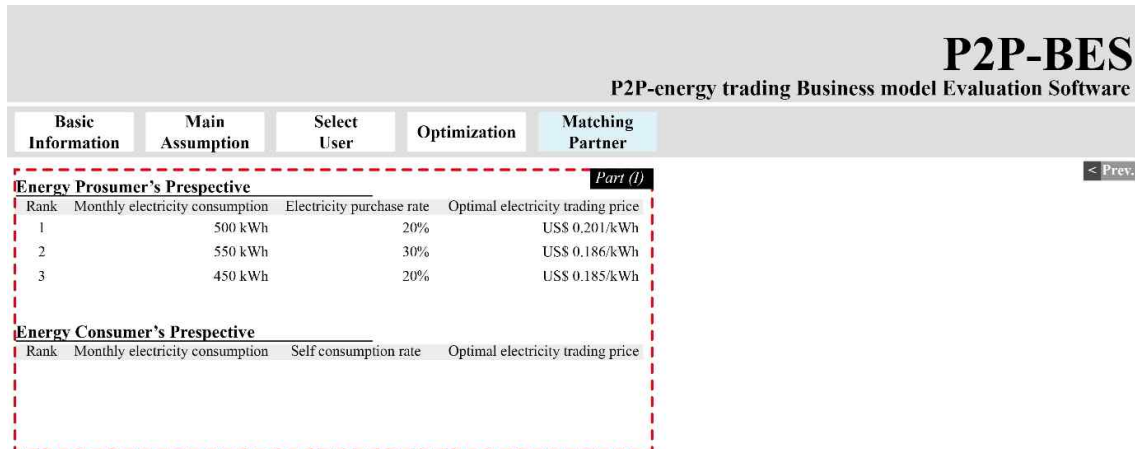
Constraints

Classification	Value
Minimum electricity trading price (US\$)	0.08
Maximum electricity trading price (US\$)	0.18

[그림 2-15] P2P-BES의 GUI 4

· Part (G) ([그림 2-15] 참조) : Part (H)에서 결정된 잉여전력의 최대 및 최소 거래 가격 범위 내에서 최적 전력거래 가격을 도출하기 위해, 에너지 컨슈머의 전력요금 절감액과 에너지 프로슈머의 잉여전력 판매를 통한 이익을 유전자 알고리즘 (Generic algorithm; GA)을 통해 최적화를 진행한다.

· Part (H) ([그림 2-15] 참조) : Part (F)에서 “에너지 프로슈머”를 선택하면 잉여전력의 최소 거래 가격이 결정되고 고정되며, 표준 데이터베이스에 따라 최대 거래 가격이 변경된다. 반대로 Part (F)에서 “에너지 컨슈머”를 선택하면 잉여전력의 최대 거래 가격이 결정되고 고정되며, 최소 거래 가격은 표준 데이터베이스에 따라 변경된다. 이때 잉여전력 거래 가격은 전력의 최대 거래 가격과 최소 거래 가격 사이에서 결정된다.



[그림 2-16] P2P-BES의 GUI 5

• Part (I) ([그림 2-16] 참조) : Part (G)에서 도출된 최적 전력거래 가격을 기준으로 최적의 거래 상대가 결정된다. 여기서 최적 거래 상대는 (A), (B) 부분에 입력된 사용자 정보를 기반으로 최소 및 최대 거래 가격 데이터베이스와 비교하여 P2P 전력거래를 수행하였을 때 최대의 수익을 얻을 수 있을 것으로 예상되는 거래상대를 의미한다. Part (F)에서 “에너지 프로슈머”를 선택하면 전력거래 상대는 최적 전력거래 가격이 높은 순서로 나열되고, “에너지 컨슈머”가 선택되면 최적 전력거래 가격이 낮은 순서로 나열된다. 예를 들어 5월달에 월 전력소비량이 185kWh인 에너지 프로슈머는 월 전력소비량이 500kWh이고 잉여전력 구매율이 20%인 에너지 컨슈머와 거래할 때 가장 많은 수익을 얻을 수 있다. 이 경우 최적 전력거래 가격은 US\$ 0.201/kWh이다.

(라) 단위성과 C-2-②: 사업성 및 실효성 검증

한국전력공사에서 제공하는 세대별 누진구간 현황에 따르면 월 전력소비량이 201 ~ 300kWh인 가구가 가장 높은 비율 (30.3%)을 차지하고 있으며, 월 전력소비량이 301 ~ 400kWh (22.6%)인 가구가 그 뒤를 이었다. 그러나 월 전력소비량이 201 ~ 300kWh인 경우 월 전력소비량이 적어 전력요금 역시 낮기 때문에 태양광 PV 패널을 설치할 유인이 적다. 반면 월 전력소비량이 301 ~ 400kWh인 구간은 전 구간에서 전력소비량 (34.7%)과 전력요금 (36.6%)이 가장 높다. 이에 본 연구에서는 월 전력소비량이 350kWh인 에너지 프로슈머를 대상으로 선정하여 잉여전력의 최적 거래 가격과 지역별 잠재 수익을 계산하였다 ([표 2-4], [표 2-5] 참조).

[표 2-4] 세대별 누진구간 현황

누진구간	월 전력소비량	가구 수		전력 소비량		전력요금	
		천(가구)	%	백만kWh	%	백만US\$	%
1	≤100	4,364	18.8	182	3.5	13.7	2.5
	101-200	5,232	22.6	798	15.5	57.9	10.8
2	201-300	7,009	30.3	1,768	34.3	161.2	30.0
	301-400	5,247	22.6	1,792	34.7	196.5	36.6
3	401-500	1,047	2.4	457	8.8	67.7	12.6
	501-1000	262	1.1	153	3.0	37.0	6.9
슈퍼유저	1000<	8	0.1	11	0.2	3.45	0.6
합계	Total	23,169	100	5,161	100	537.46	100

비고: 환율 (KRW/US\$)은 달러 당 1188.00원으로 적용 (2020년 1월 30일 기준).

먼저, 지역별 에너지 프로슈머의 예상 연간 최대 수익은 대구에서 가장 높았고 (US\$ 995.5) 서울에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 태양광 PV 패널의 연간 발전량이 높을수록 판매 가능한 잉여전력이 많기 때문이다. 그러나 대전은 연간 태양광 PV 패널 발전량이 세 번째로 많지만, 예상 최대 이익은 5번째로 울산이나 광주보다 낮은데, 그 이유는 전력의 40%를 자가 소비로 소비하여 판매할 수 있는 잉여전력이 적기 때문이다.

두 번째, 에너지 프로슈머의 경우 자가소비율을 가능한 한 낮추는 것이 높은 수익을 얻는 데 유리한 것으로 나타났다. 이는 월 전력소비량이 350kWh인 에너지 프로슈머가 누진구간 2단계에 속하기 때문에 자가소비를 통해 전력요금을 절감하는 것이 잉여전력 판매를 통한 수익보다 더 높은 수익을 얻을 수 있기 때문이다.

세 번째, 월 전력소비량이 350kWh인 에너지 프로슈머가 잉여전기를 판매한 경우 수익을 가장 많이 얻을 수 있는 거래상대는 월 전력소비량은 550kWh인 에너지 컨슈머였으나, 잉여전력 구매율은 평시 30%, 하계 10%였다. 이는 평상시에는 월 400kWh의 전력소비량이 누진구간 3단계에 해당되는 반면 하계에는 500kWh부터 누진요금 3단계가 적용되기 때문이다.

[표 2-5] 지역 및 월에 따른 최적 전력거래 가격과 예상 최대 이익

지역	월	에너지 프로슈머		에너지 컨슈머		최적 전력거래 가격 (kWh/US\$)	예상 최대 이익 (US\$)
		월 전력소비량	자가소비율	월 전력소비량	전력구매율		
서울	1월	350kWh	10%	550kWh	30%	0.224	49.5
	2월		10%		30%	0.220	56.0
	3월		10%		30%	0.209	64.6
	4월		10%		30%	0.204	68.4
	5월		10%		30%	0.204	69.0
	6월		10%		30%	0.214	61.1
	7월		40%		10%	0.240	27.2
	8월		40%		10%	0.237	34.1
	9월		10%		30%	0.218	58.3
	10월		10%		30%	0.216	60.2
	11월		10%		30%	0.227	46.1
	12월		10%		30%	0.230	43.4
소계							638.1

인천	350kWh	1월	10%	550kWh	30%	0.196	76.0
		2월	10%		30%	0.198	74.4
		3월	10%		30%	0.192	82.0
		4월	10%		30%	0.193	79.7
		5월	10%		30%	0.196	76.5
		6월	10%		30%	0.206	67.0
		7월	10%		10%	0.233	64.9
		8월	10%		10%	0.226	71.9
		9월	10%		30%	0.206	67.0
		10월	10%		30%	0.201	70.9
		11월	10%		30%	0.208	65.1
		12월	10%		30%	0.203	69.6
소계							864.9
대전	350kWh	1월	10%	550kWh	30%	0.198	74.3
		2월	10%		30%	0.199	73.7
		3월	10%		30%	0.193	80.3
		4월	10%		30%	0.193	79.5
		5월	10%		30%	0.196	76.5
		6월	10%		30%	0.207	65.9
		7월	40%		10%	0.234	39.5
		8월	10%		10%	0.230	67.1
		9월	10%		30%	0.211	63.5
		10월	10%		30%	0.203	69.6
		11월	10%		30%	0.208	65.1
		12월	10%		30%	0.202	70.2
소계							825.0
대구	350kWh	1월	10%	550kWh	30%	0.179	104.7
		2월	10%		30%	0.187	89.5
		3월	10%		30%	0.188	87.6
		4월	10%		30%	0.192	81.4
		5월	10%		30%	0.194	78.4
		6월	10%		30%	0.202	70.2
		7월	10%		10%	0.224	74.6
		8월	10%		10%	0.222	77.8
		9월	10%		30%	0.197	75.3
		10월	10%		30%	0.192	81.7
		11월	10%		30%	0.193	80.7
		12월	10%		30%	0.184	93.7
소계							995.5
울산	350kWh	1월	10%	550kWh	30%	0.199	72.8
		2월	10%		30%	0.204	69.0
		3월	10%		30%	0.197	74.9
		4월	10%		30%	0.195	77.5
		5월	10%		30%	0.196	76.8
		6월	10%		30%	0.206	67.1
		7월	10%		10%	0.230	67.2
		8월	10%		10%	0.229	68.9
		9월	10%		30%	0.216	60.1
		10월	10%		30%	0.204	68.3
		11월	10%		30%	0.209	64.5
		12월	10%		30%	0.203	69.6
소계							836.5
부산	350kWh	1월	10%	550kWh	30%	0.218	58.5
		2월	10%		30%	0.218	58.5
		3월	10%		30%	0.209	64.6
		4월	10%		30%	0.204	68.6
		5월	10%		30%	0.203	69.6

	6월	10%		30%	0.213	61.8
	7월	40%		10%	0.235	38.3
	8월	10%		10%	0.229	68.1
	9월	10%		30%	0.220	56.0
	10월	10%		30%	0.211	63.0
	11월	10%		30%	0.219	57.9
	12월	10%		30%	0.218	58.1
	소계					723.2
광주	1월	10%	350kWh	30%	0.215	60.8
	2월	10%		30%	0.206	66.8
	3월	10%		30%	0.195	78.2
	4월	10%		30%	0.194	79.2
	5월	10%		30%	0.196	76.6
	6월	10%		30%	0.205	68.1
	7월	10%		10%	0.226	72.3
	8월	10%		10%	0.222	77.4
	9월	10%		30%	0.205	67.5
	10월	10%		30%	0.202	70.6
	11월	10%		30%	0.216	60.4
	12월	10%		30%	0.219	57.2
	소계					835.2

비고: 환율 (KRW/US\$)은 달러 당 1188.00원으로 적용 (2020년 1월 30일 기준).

(마) 단위성과 C-1-①: 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오 생성 (공동)

에너지 프로슈머와 컨슈머의 입장에서 수익성이 보장되는 최소 및 최대 전력거래 가격 산출을 위한 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오를 수립하기 위하여, 본 연구에서는 다음의 두 가지 관점에 따라 3가지 기준을 정의하였다: ① 에너지 프로슈머의 관점; ② 에너지 컨슈머의 관점.

① 에너지 프로슈머 관점: 먼저, 에너지 프로슈머의 관점에서 월을 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준 1로 정의하였다. 에너지 프로슈머는 태양광 발전 시스템의 발전량이 월별로 달라지기 때문에, 월에 따라 최소 전력거래 가격이 결정되어야 한다. 두 번째, 에너지 프로슈머의 입장에서 월 전력소비량을 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준 2로 정의하였다. 에너지 프로슈머가 같은 양의 전력을 거래하더라도 월 전력소비량이 다른 경우, 에너지 프로슈머의 전기요금 및 잉여전력 판매가격이 달라지기 때문에, 월 소비전력량에 따라 최소 전력거래가격이 결정되어야 한다. 세 번째, 자가소비율을 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준 3로 정의하였다. 자가소비율은 에너지 프로슈머의 총 전력소비량 중 태양광 발전 시스템의 발전량으로 직접 충당하는 비율로, 판매할 수 있는 잉여전력량에 영향을 주기 때문에, 자가소비율에 따라 최소 전력거래가격이 계산되어야 한다.

② 에너지 컨슈머 관점: 먼저, 에너지 컨슈머의 관점에서 계절을 전력 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준 1로 정의하였다. 에너지 컨슈머의 경우, 일반적인 전기요금이 적용되는 1~6월, 9~12월과 하계요금제가 적용되는 7~8월의 누진요금 적용구간이 다르기 때문에, 계절에 따라 최대 전력거래가격이 결정되어야 한다. 두 번째, 에너지 프로슈머와 마찬가지로 에너지 컨슈머의 입장에서 월 전력소비량을 전력 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준 2로 정의하였다. 에너지 컨슈머가 같은 양의 전력을 거래하더라도 월 전력소비량이 다른 경우, 에너지 컨슈

머의 전기요금이 달라지기 때문에, 월 전력소비량에 따라 최대 전력거래가격이 결정되어야 한다. 세 번째, 잉여전력 구매율을 전력 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준 3으로 정의하였다. 잉여전력 구매율은 에너지 컨슈머의 총 전력소비량 중 에너지 프로슈머로부터 구매한 전력으로 충당하는 비율로, 구매해야 하는 전력량을 결정하기 때문에, 잉여전력 구매율에 따라 최대 전력거래가격이 결정되어야 한다([표 2-6] 참조).

[표 2-6] 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오 수립을 위한 기준

구분		에너지 프로슈머	에너지 컨슈머
기준1	변수	월	계절
	범위	1월-12월 (12 개월)	평시, 하계 (2 종류)
기준2	변수	월 전력소비량	
	범위	200-600kWh (100kWh 간격)	
기준3	변수	자가소비율	잉여전력 구매율
	범위	10-90% (10% 간격)	10-90% (10% 간격)
시나리오의 수		540가지	90가지

결과적으로, 기준 1 (12달, 2계절), 기준 2 (5가지 타입), 기준 3 (9가지 타입)을 고려하여, 본 연구에서는 에너지 프로슈머의 관점에서 540가지(12달 x 5가지 월 전력소비량 x 9가지 자가소비율)의 전력 생산 및 소비 패턴 시나리오를, 에너지 컨슈머의 관점에서 90가지 (2가지 계절 x 5가지 월 전력소비량 x 9가지 잉여전력 구매율) 전력 소비 패턴 시나리오를 수립하였다.

(바) 단위성과 C-2-①: 알고리즘 개발 (공동)

에너지 프로슈머와 컨슈머의 사업성을 평가하기 위해 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 얻을 수 있는 최대 예상 이익을 도출하였다. 에너지 프로슈머의 경우 최적 전력거래 가격과 잉여전력 판매량을 통해 최대 예상 이익을 추정할 수 있으며, 에너지 컨슈머는 최적 전력거래 가격과 잉여전력 구매량을 통해 최대 예상 이익을 추정할 수 있다. 일반적으로, 에너지 프로슈머의 최대 예상 이익은 설치된 분산형 태양광 발전 시스템의 발전량이 증가함에 따라 증가한다. 이는 분산형 태양광 발전 시스템의 발전량이 증가함에 따라 판매 가능한 잉여전력량이 증가하기 때문이다. 또한, 에너지 프로슈머의 월 전력소비량이 증가하면 최대 예상 이익이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 에너지 프로슈머가 보조금을 얻으며 설치할 수 있는 분산형 태양광 발전 시스템의 용량은 최대 3kW이지만, 월 전력소비량이 증가하면 판매할 수 있는 잉여전력량이 감소하고, 최소 전력거래 가격을 증가시켜 분산형 에너지 개인 간 거래를 통해 얻을 수 있는 이익이 감소하기 때문이다.

[표 2-7] 에너지 프로슈머의 최대 예상 이익

월 전력 소비량	에너지 프로슈머의 최대 예상 이익 (US\$)												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계
200kWh	63.8	73.0	87.6	94.6	95.7	91.1	57.4	65.1	76.3	79.5	58.1	53.6	885.8
300kWh	41.9	48.2	70.2	78.6	79.9	62.5	42.9	51.8	56.7	60.6	37.7	34.4	665.4
400kWh	31.4	36.4	51.9	59.2	60.5	46.3	34.7	41.2	42.1	44.9	27.2	24.0	499.8
500kWh	22.3	27.1	34.3	40.4	41.3	28.7	28.3	34.8	24.5	24.6	17.0	17.7	341.0
600kWh	10.2	11.9	22.7	26.4	27.0	19.3	15.8	19.5	16.7	18.5	7.6	5.6	201.2

비고: 환율 (KRW/US\$)은 달러 당 1191.50원으로 적용 (2019년 5월 23일 기준).

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

(1) 연구 목표

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	에너지 프로슈머 활성화를 위한, 커뮤니티 기반의 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델 평가 소프트웨어 개발 - 최종성과물의 기술성숙도: <u>4단계(실험)</u> - 최종성과물의 성격: <u>분산형 태양광 발전의 기술성뿐만 아니라, 양방향 전력거래 사업 모델에 따른 경제성 및 사업성에 대한 종합적인 평가를 가능하게 하는 통합 소프트웨어</u> <u>정부, 프로슈머/컨슈머 및 사업자 모두에게 맞춤형 에너지 거래 솔루션을 제공</u>
세부 목표	- 커뮤니티 기반 ‘분산형 발전의 기술성 평가 기술’ 개발 - 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>지리적 분석</u> - 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>태양광 발전량 예측 기술</u> 개발 <u>에너지저장장치(ESS) 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 최적운영전략 수립</u> - 커뮤니티 기반 ‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’ 개발 - 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>수익구조 분석</u> - 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>생애주기비용 분석 기술</u> 개발 - 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>균등화발전단가 분석 기술</u> 개발 - 커뮤니티 기반 ‘분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술’ 개발 - 프로슈머-컨슈머의 경제성에 따른 <u>분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략</u> 수립 - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 <u>에너지 자립도 분석</u> - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 <u>사업성 통합 평가 기술</u> 및 <u>소프트웨어</u> 개발

(2) 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	분산형 발전의 기술성 평가 기술	- 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>지리적 분석</u> - 분산형 태양광 발전의 <u>기술성 평가</u>를 위한 <u>태양광 발전량 예측 기술</u> 개발 <u>에너지저장장치(ESS) 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 최적운영전략</u> 수립	소프트웨어	주관 (연세대)	2	4
2	에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술	- 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>수익구조 분석</u> - 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>생애주기비용 분석 기술</u> 개발 - 에너지 프로슈머의 <u>경제성 평가</u>를 위한 <u>균등화발전단가 분석 기술</u> 개발	소프트웨어	주관 (연세대)	2	4
3	분산형 에너지 개인 간 거래의 사업성 평가 기술	- 프로슈머-컨슈머의 경제성에 따른 <u>분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략</u> 수립 - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 전략에 따른 <u>에너지 자립도 분석</u> - 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 <u>사업성 통합 평가 기술</u> 및 <u>소프트웨어</u> 개발	소프트웨어	주관 (연세대)·공동 (이에이엔)	2	4

나. 목표 달성여부

(1) 성과점검기준표 [총괄]

구분	핵심 성과물 (level1)		단위 성과물 (level2)		당해단계 성과목표				해당 기관	예산 (백만원)	실적목표/달성치	
					질적목표(측정방법)	목표치/ 달성치	검증방법	가중치				
주 관	A	분산형 발전의 기술성 평가 기술	A-1	분산형 태양광 발전의 지리적 잠재량 평가	①	시간별 일사량 DB 구축	5건/ 5건	보고서	5	주관 연세대	24.5	
					②	지리적 잠재량 평가	1건/ 1건	보고서	5	주관 연세대	25	
			A-2	분산형 태양광 발전의 기술적 잠재량 평가	①	기술적 잠재량 평가	1건/ 1건	보고서	5	주관 연세대	25	인력양성 : 1 건
					②	에너지저장장치 (ESS) 운영전략 수립	2건/ 2건	보고서	10	주관 연세대	32	
	B	에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술	B-1	프로슈머 경제성 평가 기술 개발	①	경제성 영향 요인 DB 구축	4건/ 4건	논문 게재	5	주관 연세대	25	SCI급 논문 : 1 건
					②	알고리즘 개발	1건/ 1건	논문 게재	10	주관 연세대	32	SCI급 논문 : 1 건
			B-2	컨슈머 경제성 평가 기술 개발	①	경제성 영향 요인 DB 구축	2건/ 2건	보고서	5	주관 연세대	25	
					②	알고리즘 개발	1건/ 1건	특허 출원	10	주관 연세대	32	특허 : 출원 1 건
	C	분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 평가 기술	C-1	분산형 에너지 거래 전략 수립	①	개인 간 거래 전략 수립	12건/ 12건	보고서	5	주관 연세대	25	
					②	에너지 자립도 분석	1건/ 10건	특허 출원	5	주관 연세대	25	특허 : 출원 1 건
			C-2	분산형 에너지 거래 사업성 평가 기술 개발	①	소프트웨어 개발	1건/ 1건	프로그램 등록	15	주관 연세대	39.9	S/W : 1 건
					②	사업성 및 실효성 검증	1건/ 7건	논문 게재	10	주관 연세대	32	SCI급 논문 : 2 건
공 동	C	분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 평가 기술	C-1	분산형 에너지 거래 전략 수립	①	개인 간 거래 시나리오 생성	45건/ 630건	보고서	5	공동 이에이엔	20	
			C-2	분산형 에너지 거래 사업성 평가 기술 개발	①	알고리즘 개발	1건/ 1건	보고서	5	공동 이에이엔	20	
계									100		382.4	특허 : 출원 2 건 SCI급 논문 : 4 건 S/W : 1 건 인력양성 : 1 건

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

(2) 성과점검기준표 [1차년]

구분	핵심 성과물 (level1)		단위 성과물 (level2)		당해단계 성과목표				해당 기관	예산 (백만원)	실적목표/달성치	
					질적목표(측정방법)	목표치/ 달성치	검증방법	가중치				
주관	A	분산형 발전의 기술성 평가 기술	A-1	분산형 태양광 발전의 지리적 집중량 평가	①	사별 알량 DB구 축	5건/ 5건	보고서	5	주관- 연세대	24.5	
					②	지리적 집중량 평가	1건/ 1건	보고서	5	주관- 연세대	25	
	B	에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술	B-1	프로슈머 경제성 평가 기술 개발	①	경제성 영향 요 인 DB 구축	4건/ 4건	논문 게재	5	주관- 연세대	25	SCI급 논문 : <u>1 건</u>
			B-2	컨슈머 경제성 평가 기술 개발	①	경제성 영향 요 인 DB 구축	2건/ 2건	보고서	5	주관- 연세대	25	
	C	분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 평가 기술	C-1	분산형 에너지 거래 전략 수립	①	개인 간 거래 전략 수립	12건/ 12건	보고서	5	주관- 연세대	25	
					②	에너지 자립도 분석	1건/ 10건	특허 출원	5	주관- 연세대	25	특허 : 출원 <u>1 건</u>
공동	C	분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 평가 기술	C-1	분산형 에너지 거래 전략 수립	①	전력 생산 및 소비 패턴 시나 리오 생성	45건/ 630건	보고서	5	공동- 이에이엔	20	
계									35		169.5	특허 : 출원 <u>1 건</u> SCI급 논문 : <u>1 건</u>

목표			목표 건수	달성 건수
양적 달성도 (사업연계지표)	1	국내·외 학술지 게재논문 건수 (SCI(E))	1	2
	2	학술대회 발표 건수	-	3
	3	특허 출원 건수	1	1

(3) 성과점검기준표 [2차년]

구분	핵심 성과물 (level1)		단위 성과물 (level2)		당해단계 성과목표				해당 기관	예산 (백만원)	실적목표/달성치	
					질적목표(측정방법)	목표치/ 달성치	검증방법	가중치				
주관	A	분산형 발전의 기술성 평가 기술	A-2	분산형 태양광 발전의 기술적 잠재량 평가	①	기술적 잠재량 평가	1건/ 1건	보고서	5	주관- 연세대	25	인력양성 : <u>1 건</u>
					②	에너지저장장치 (ESS) 운영전략 수립	2건/ 2건	보고서	10	주관- 연세대	32	
	B	에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술	B-1	프로슈머 경제성 평가 기술 개발	②	알고리즘 개발	1건/ 1건	논문 게재	10	주관- 연세대	32	SCI급 논문 : <u>1 건</u>
			B-2	컨슈머 경제성 평가 기술 개발	②	알고리즘 개발	1건/ 1건	특허 출원	10	주관- 연세대	32	특허 : 출원 <u>1 건</u>
	C	분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 평가 기술	C-2	분산형 에너지 거래 사업성 평가 기술 개발	①	소프트웨어 개발	1건/ 1건	특허/프 로그램 등록	15	주관- 연세대	39.9	S/W : <u>1 건</u>
					②	사업성 및 실효 성 검증	1건/ 7건	논문 게재	10	주관- 연세대	32	SCI급 논문 : <u>2 건</u>
공동	C	분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 평가 기술	C-2	분산형 에너지 거래 사업성 평가 기술 개발	①	알고리즘 개발	1건/ 1건	보고서	5	공동- 이에이엔	20	
계									65		212.9	특허 : 출원 <u>1 건</u> SCI급 논문 : <u>3 건</u> S/W : <u>1 건</u> 인력양성 : <u>1 건</u>

목표			목표 건수	달성 건수
양적 달성도 (사업연계지표)	1	국내·외 학술지 게재논문 건수 (SCI(E))	3	2 (publish) 1 (Review)
	2	인력양성	1	1
	3	소프트웨어 등록 건수	1	1
	4	특허 출원 건수	1	1

(4) 핵심연구 성과별 설명 (핵심성과 1)

핵심성과 1	
성과명	커뮤니티 기반의 ‘분산형 발전의 기술성 평가 기술’
정의	▪ 단위성과 1-1: 분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 지리적 분석 ▪ 단위성과 1-2: 분산형 태양광 발전의 기술성 평가를 위한 태양광 발전량 예측 기술 개발
목적	▪ 단위성과 1-1 : 분산형 발전원, 특히 주거용 건물에서 많이 설치하는 태양광 패널의 경우 지리적 요인에 영향을 크게 받음. 이에 본 연구는 지리적 요인을 분석하여 분산형 태양광 발전에 미치는 영향을 분석하고, 분산형 태양광 발전에 실질적으로 사용할 수 있는 가용 옥상 면적을 도출하고자 함. ▪ 단위성과 1-2 : 에너지 프로슈머는 태양광 패널을 설치하기 전 발전량이 어느정도 나오는 지에 대한 평가가 선행되어야 투자를 할 것이라 볼 수 있음. 본 연구는 현재 국내 기술수준을 고려한 분산형 태양광 발전량을 예측하고, 에너지 저장장치 (ESS) 적용에 따른 분산형 태양광 발전의 최적운영전략을 수립하고자 함.
관련 분야 기술 발전 기여도	(기존기술 수준) ▪ 기존 태양광 패널을 설치하기 전 검토단계에서는 단순히 설치할 태양광 패널의 용량, 예상 일조시간만 고려하여 태양광 패널의 발전량을 예측하였음. ▪ 에너지 저장장치의 경우 설치비용이 많이 들지만 설치 보조금이 없어 사실상 경제성이 없기 때문에 대부분 설치를 하지 않음. (개발기술 수준) ▪ 건물의 특성, 태양의 위치, 현재 기술수준 등을 고려하여 태양광 발전량을 예측하였음. ▪ 에너지 저장장치를 설치했을 때, 환경적 측면과 경제적 측면 2가지를 고려하여 에너지 저장장치를 운영할 수 있는 최적운영전략을 수립함.
성과달성 책임자 (소속기관)	홍태훈(연세대학교)
소요기간	▪ [단위성과 1-1] 2019.04.15 ~ 2019.12.31. (1차년도) ▪ [단위성과 1-2] 2020.01.01 ~ 2020.12.31. (2차년도)
성과달성 확인방법	▪ 시간별 일사량 DB 구축 (보고서) ▪ 지리적 잠재량 평가 (보고서) ▪ 기술적 잠재량 평가 (보고서) ▪ 에너지저장장치 (ESS) 운영전략 수립 (보고서)
성과달성에 따른 정량적 성과	논문
	SCI(E) : 1건
	S/W
	-
	특허 출원/등록
	-
	인력양성
	1건
	기타
	국제학술회의 발표 : 3건

(5) 핵심연구 성과별 설명 (핵심성과 2)

핵심성과 2		
성과명	커뮤니티 기반의 ‘에너지 프로슈머의 경제성 평가 기술’	
정의	- 단위성과 2-1: 분산형 태양광 발전의 경제성 평가를 위한 수익구조 분석 - 단위성과 2-2: 에너지 프로슈머 및 컨슈머의 경제성 평가를 위한 생애주기비용 분석 기술	
목적	- 단위성과 2-1 : 분산형 태양광 발전의 경제성을 평가하기 위해, 분산형 태양광 발전 시스템을 설치한 에너지 프로슈머의 수익구조에 대한 분석이 필요함. 본 연구는 분산형 태양광 발전 시스템의 경제성 영향요인 (설치 비용, 발전량, 전기 요금, 지원제도 등)을 도출하고, 이를 기반으로 분산형 태양광 발전 목적 (자가용, 발전 사업용)에 따른 에너지 프로슈머의 수익구조를 분석하고자 함. - 단위성과 2-2 : 분산형 에너지 개인 간 거래 시장은 에너지 프로슈머와 에너지 컨슈머 모두 수익을 얻을 수 없으면 시장이 유지될 수 없음. 본 연구는 에너지 프로슈머의 입장에서 생애주기비용 및 균등화발전단가를 분석하고, 에너지 컨슈머의 입장에서 생애주기 비용을 분석하는 기술을 개발하고자 함	
관련 분야 기술 발전 기여도	(기존기술 수준) - 기존에는 태양광 패널을 설치하기 전 다양한 요소들을 고려하지 않고, 단순한 태양광 발전량 예측치만 고려하여 태양광 패널의 설치여부를 결정하였음. - 에너지 프로슈머는 자가소비후 남은 잉여전력을 상계거래를 통해서만 판매할 수 있어 수익을 얻을 수 있는 방법이 한정되어 있음. (개발기술 수준) - 분산형 태양광 발전의 경제성 영향요인(발전량, 균등화발전비용, 전력소비량, 잉여전력 판매량 등) 및 분산형 태양광 발전 목적 (자가용·발전 사업용)을 고려하여 에너지 프로슈머의 수익구조를 분석하고자 함. - 분산형 에너지 개인 간 거래 전략에 따른 생애주기 비용 및 균등화발전단가 분석을 기반으로 에너지 프로슈머와 에너지 컨슈머의 경제성을 분석하고자 함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	홍태훈(연세대학교)	
소요기간	[단위성과 2-1] 2019.04.15 ~ 2019.12.31. (1차년도) [단위성과 2-2] 2020.01.01 ~ 2020.12.31. (2차년도)	
성과달성 확인방법	- 경제성 영향요인 DB 구축 (에너지 프로슈머) (논문게재) - 경제성 영향요인 DB 구축 (에너지 컨슈머) (보고서) - 알고리즘 개발 (보고서) - 알고리즘 개발 (특허출원)	
성과달성에 따른 정량적 성과	논문	SCI(E) : 2건 (1건 리뷰 중)
	S/W	-
	특허 출원/등록	특허출원 : 1건
	인력양성	-
	기타	-

(6) 핵심연구 성과별 설명 (핵심성과 3)

핵심성과 3		
성과명	커뮤니티 기반의 '분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 사업성 평가 기술'	
정의	▪ 단위성과 3-1: 분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P) 전략 수립 및 에너지 자립도 분석 ▪ 단위성과 3-2: 분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P)의 사업성 통합 평가 소프트웨어 개발	
목적	▪ 단위성과 3-1 : 분산형 태양광 발전 시스템을 설치한 에너지 프로슈머마다 전력생산 패턴 및 전력 소비 패턴이 다르다. 이에 본 연구는 에너지 프로슈머의 전력생산 패턴과 에너지 컨슈머의 전력소비 패턴에 따라 분산형 에너지 개인 간 거래 시나리오를 생성하고, 이를 기반으로 프로슈머-컨슈머 매칭에 따른 분산형 에너지 개인 간 거래 (P2P) 전략을 수립하고자 함. ▪ 단위성과 3-2 : 분산형 태양광 발전 시스템의 설치여부 결정에 있어 전문가가 아닌 비전문가도 경제성을 쉽게 판단할 수 있는 소프트웨어를 개발하고자 함.	
관련 분야 기술 발전 기여도	(기존기술 수준) ▪ 기존에는 분산형 태양광 발전 시스템의 발전량 예측치만 가지고 설치여부를 결정함. ▪ 분산형 태양광 발전 시스템을 통해 생산한 전력을 에너지 프로슈머가 얼마나 소비하는지에 대한 고려가 되지 않음. (개발기술 수준) ▪ 에너지 프로슈머와 에너지 컨슈머의 경제성 및 에너지 자립도 (자가소비율, 잉여전력 구매율)를 고려하여 분산형 태양광 발전 시스템의 사업성을 평가하고자 함. ▪ 건물주, 건물관리인, 건축사 등 비전문가도 계획 및 설계단계에서 사업성을 쉽게 평가할 수 있는 소프트웨어를 개발하고자 함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	홍태훈(연세대학교), 신지웅((주)이에이엔테크놀로지)	
소요기간	▪ [단위성과 2-1] 2019.04.15 ~ 2019.12.31. (1차년도) ▪ [단위성과 2-2] 2020.01.01 ~ 2020.12.31. (2차년도)	
성과달성 확인방법	▪ 개인 간 거래 전략 수립 (보고서) ▪ 에너지 자립도 분석 (특허출원) ▪ 소프트웨어 개발 (프로그램 등록) ▪ 사업성 및 실효성 검증 (논문게재) ▪ 개인 간 거래 시나리오 생성 (보고서)	
성과달성에 따른 정량적 성과	논문	SCI(E) : 2건
	S/W	소프트웨어 등록 : 1건
	특허 출원/등록	특허출원 : 1건
	인력양성	-
	기타	-

다. 목표 미달성 시 원인 (사유) 및 차후대책 (후속연구의 필요성 등)

(1) COVID-19으로 인한 논문심사의 지연

- 본 연구개발과제는 '20년 1월부터 '20년 12월까지 수행된 연구과제이나, '20년 초부터 시작된 COVID-19 사태로 인하여 논문심사가 지연되며, 기간 내 논문게재에 어려움이 있었다. 본 연구팀은 현재까지 총 3편의 SCI/SCIE급 논문을 상위 5%에 포함되는 우수한 국제학술지에 논문을 투고하여 당해연도 연구목표 (논문 3건)를 달성할 예정이었다. 국외논문의 특성상 기존에도 논문 리뷰 및 게재까지 1년 이상의 장기간이 소요되었으나, COVID-19 사태로 인해 주요 논문 퍼블리셔가 위치한 유럽과 미국 등을 포함하여 전세계적으로 락다운이 시행되며 1건에 대해 게재확정을 받지 못한 상황이다. 본 연구팀은 연구기간 종료 이후에도 연구성과 달성을 위해 지속적으로 논문 리뷰 현황을 확인하며 상위 국제학술지에 게재될 수 있도록 노력할 것이다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발성과의 활용방안

○ 기술 수요처: 본 연구의 최종성과물(P2P-BES)을 통해 정부, 사용자(프로슈머/컨슈머), 사업자 모두가 이용 가능한 서비스를 제공하고자 한다. 각 기술 수요처별 세부 내용은 아래와 같다.

- 정부: 분산형 태양광 발전 잠재량 및 중장기 확산 목표 수립을 목적으로 하는 기술수요처
- 사용자: 커뮤니티(예: 아파트 단지)의 전기 에너지 및 비용 절감을 목적으로 하는 기술수요처
- 사업자: 분산형 에너지 개인 간 거래 사업을 통해, 수익창출을 목적으로 하는 기술수요처



○ 실용화·제품화 방안: 본 연구의 최종성과물(P2P-BES)은 다음의 3 단계((1) 실용화, (2) 시범서비스 제공, (3) 상용화)에 거쳐, 실용화·제품화 방안을 마련하고자 한다.

- 1 단계(실용화): 최종성과물(P2P-BES)을 활용하여, 소프트웨어 등록 및 특허 출원을 실시
- 2 단계(시범서비스 제공): 소프트웨어를 본격적으로 상용화하기 이전에, 안정화된 서비스를 제공하고 제품 완성도를 높이기 위해, 전문가들을 대상으로 오픈 및 클로즈 베타서비스 제공
- 3 단계(상용화): 소프트웨어의 결과물을 실제 분산형 에너지 개인 간 거래 사업 모델에 적용 (Test-Bed)을 통해, 오류 및 문제점을 해결하고, 서비스에 대한 유지관리 전략을 수립하여 본격적인 상용화 및 사업화 추진



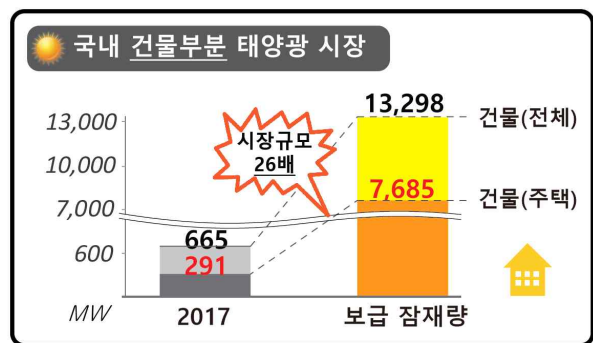
○ 신산업 창출: 에너지 프로슈머를 통한 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P)의 시장규모 확대 및 산업화 달성을 위해서는, 프로슈머와 컨슈머가 상생할 수 있는 자생적 시장 생태계가 조성되어야 한다. 본 연구의 최종성과물(P2P-BES)을 활용하여 프로슈머 및 컨슈머의 수익성 보장을 위한 양방향 전력거래의 사업성 평가 및 맞춤형 사업 모델을 제공한다면, 에너지 프로슈머 시장의 내실화를 기대할 수 있다. 또한, 기존 분산형 에너지 개인 간 거래(P2P) 사업 모델을 적용하기 어려웠던 대상 시설물에 대해, 적용 범위를 확대함으로써, 신(新)산업의 창출을 기대할 수 있다.



나. 연구개발성과의 기대효과

가. 기술의 시장성

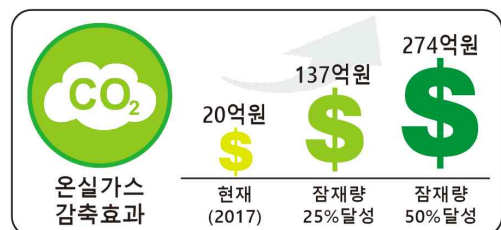
- 전 세계적으로 태양광 에너지 누적 설치 용량은 2004년 4.0GW에서 2017년 397GW로 전 세계 전력발전 기술 중에 가장 빠른 성장세를 보이고 있으며, 2030년에는 600GW에 이르러 연평균 성장률 8%의 지속적인 성장세를 유지할 것으로 평가되고 있다(Energy Technology Perspective 2050(IEA)).
- 한편, 국내 시장의 경우, 분산형 발전 활성화를 위해, ①상계거래, ②프로슈머 전력거래, ③분산자원 중개시장을 통한 도매시장 거래 등의 다양한 사업 모델이 제시되고 있다. 이와 함께, 2030 에너지 신산업 확산전략으로서, 에너지 프로슈머 전력시장의 개설 및 계통설비의 확대 또한 계획되고 있다. 따라서 분산형 태양광 발전의 신(新)시장 창출·확대를 통한, 시장의 지속적인 성장이 예상되고 있다.
- 2017년을 기준으로, 주택부분 태양광 누적 보급량인 291MW(건물부분: 665MW)은 주택부분 태양광 보급 잠재량인 7,685MW(건물부분: 13,298)의 3.8%로 극히 일부분만을 활용하고 있어, 주택부분 태양광 보급 잠재량 활용 극대화 전략이 필수적이다. 주택부분 태양광 보급 잠재량의 100%가 달성될 경우, 시장규모는 최대 26배까지 확대 가능하다.



- 국내 전체 태양광 시장: 태양광 누적 설치 용량은 2005년 5MW에서 2017년에는 5,834.5MW로 높은 성장세를 보이고 있으며, 지속적으로 성장하여 2030년에는 17.5GW에 이르러 2017년 대비 약 3배 이상 성장할 것으로 예상되고 있다.
- 국내 건물부분 태양광 시장: 2017년 기준으로, 건물부분의 태양광 누적 설치 용량은 665MW이며, 그 중 주택부분(291MW)이 43.7%를 차지하면서, 가장 높은 비율을 보이고 있다.
- 국내 전체 태양광 잠재량(발전): 신재생 에너지 잠재량은 총 1,772,560천TOE/년이며, 이 중 태양광 잠재량은 전체 신재생 에너지 잠재량의 29.9%로 높은 비율을 차지하고 있다.
- 국내 건물부분 태양광 잠재량(발전): 건물부분의 태양광 잠재량은 3,687천TOE/년이며, 그 중 주택부분의 태양광 잠재량은 2,131천TOE/년으로, 가장 높은 비율(57.8%)을 차지하고 있다.

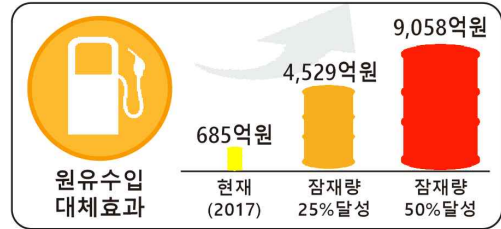
나. 경제·산업적 기대성과

- 국내 주택부분 태양광 누적 보급량은 2017년을 기준으로 약 291MW로, 주택부분 태양광 발전 잠재량인 7,685MW의 3.8%에 미치지 못한다. 주택부분 태양광 발전 잠재량의 25%와 50%가 각각 달성될 경우, 경제적 측면에서 ①온실가스감축효과와 ②원유수입대체효과를 기대할 수 있다.
- 온실가스감축효과는 현재 수준(잠재량의 3.8%)에서는 약 173천TCO_{2eq}, 잠재량의 25% 달성 시 약 1,142천TCO_{2eq}, 50% 달성 시 약 2,285천TCO_{2eq}가 예상된다. 온실가스 배출권 거래비용으로 환산할 경우, 25% 달성 시 연간 약 137억원, 50% 달성 시 연간 약 274억원의 경제적 효과를 기대할 수 있다(감축사업



등록거래시스템 기준: 12,000원/TCO_{2eq} 적용 시).

- **원유수입 대체효과**는 현재 수준(잠재량의 3.8%)에서는 약 685억원, 잠재량의 25% 달성 시 약 4,529억원, **50% 달성 시 약 9,058억원**이 예상된다. 이는 일반 승용차(연비 11km/L)가 **서울-부산을 각각 9,055,458회와 18,110,916회 왕복**할 수 있는 양이다.

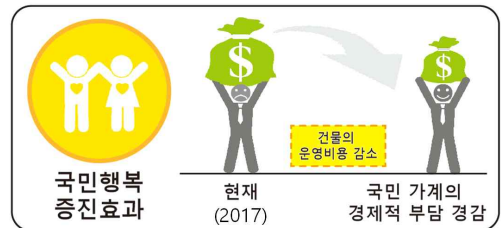


다. 사회·문화적 파급효과

- 분산형 태양광 발전 확대를 통한 **전기 요금 절감**, 태양광 발전 잠재량 확보 및 태양광 산업 활성화는, 다음과 같이 **국민 행복, 에너지 안보 및 고용 창출을 기대**할 수 있다.

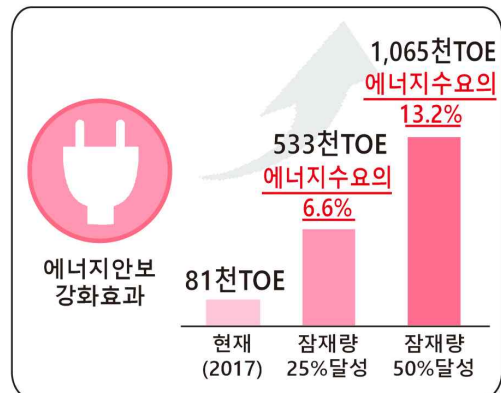
○ 국민 행복

- 분산형 태양광 발전 확대를 통한 **건물의 직·간접 운영비용 감소**는, 국민 가계의 **경제적 부담을 경감**시킴으로써, **국민 행복 증진에 긍정적인 효과**를 발생시킬 것으로 기대할 수 있다.



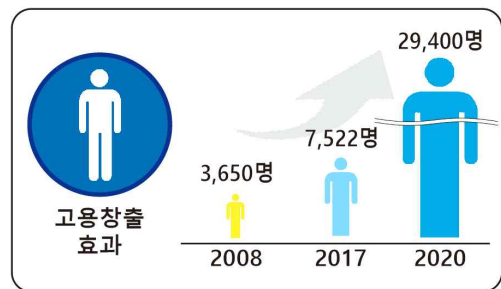
○ 에너지 안보

- **주택부분 태양광 발전 잠재량의 25%와 50%가 달성**될 경우, 각각 연간 약 2,525GWh와 5,049GWh의 발전량을 확보할 수 있으며, 이를 통해, 약 533천TOE와 1,065천TOE에 달하는 1차 에너지를 절감(2017년 주택부분 1차 에너지 수요(전력)인 약 16,210천TOE의 6.6%와 13.2%)할 수 있다(전력데이터 개방 포털시스템). 따라서, 주택부분 태양광 산업 활성화를 통하여, **국가 에너지 안보를 강화**시킬 수 있다.



○ 고용 창출

- 국내 태양광 에너지 산업 분야의 고용인원은 2008년 3,650명에서 2017년 7,522명으로 10년 동안 **약 2.1배 증가**하였으며, 태양광 산업의 인력수요는 **2020년 기준 2만 9,400명으로 분석**되었다(신재생에너지 산업 통계(산통부)). 이는, **2017년 실업자 수(2017년 고용 동향보고서(통계청)) 대비 2.8%**에 달하는 수치이다. 따라서, 국내 태양광 산업 활성화를 통하여, **고용 창출을 기대**할 수 있다.



다. 연구개발성과의 실용화 방안

(1) 기술 및 제도적 문제점 및 해결방안

가. 전기사업법 및 전력시장 구조문제

- 국내 전기사업법(전기사업법시행령 제3조, 발전과 판매의 겸업 제한)에 따라 한국전력과 구역전기사업 외에는 전력판매가 불가능하다. 구조적으로 P2P 전력거래를 국내에 도입하기 어렵다. 마찬가지로, 현재 전력판매를 독점하고 있는 한국전력공사 역시 발전과 판매의 겸업 제한 때문에, 자회사가 생산한 전력을 한국전력공사에서 모두 구매 후 이를 한전과 계약한 고객에게 판매하는 형식으로 거래가 이루어지고 있다. 이렇듯 정부가 독점적으로 전기가격 등 중요한 의사결정을 수행하는 구조는 에너지전환을 가로막는 주요 걸림돌이 될 수 있다. 즉, P2P 전력거래를 구현하기 위해서는 전력시장의 구조를 개선하고 개인이 전력거래 시장에 참여할 수 있도록 정책적 규제를 완화해야 한다.

나. 신재생에너지 및 ESS 설치 관련 제도 개선

- 블록체인 기술은 P2P 방식을 기반으로 하여 소규모 데이터들이 체인 형태로 연결되어 형성된 '블록'이라는 분산 데이터 저장 환경에 관리 대상 데이터를 저장함으로써 누구도 임의로 수정할 수 없고 누구나 변경의 결과를 열람할 수 있게 하는 기술이다. 즉, 블록체인 기술을 통해 데이터를 저장할 경우 거래 내역을 임의로 수정하거나 누락시킬 수 없다는 특성이 있다. 이러한 특성 때문에 블록체인 기술을 P2P 전력거래에 도입하여 중개사업자가 없이도 안전하게 거래를 할 수 있도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 국내에서는 아직 블록체인 기술에 대한 명확한 해석 및 규정이 없어 보안사고나 개인정보침해가 발생할 경우 법적 책임을 질 주체가 모호하다. 또한, 대부분의 블록체인을 설명하는 백서에서는 블록체인에 참여하였을 때 발생하는 피해에 대한 법적 책임을 부인하고 있어 이에 대해 국가 차원에서 P2P 전력거래 시장 참여자들을 보호할 수 있는 법률을 제정할 필요가 있다.

다. 전력계통의 안정성을 유지하기 위한, 보조서비스 체계의 제도적 개선

- 전력계통의 물리적 안정성 및 전기품질의 유지를 위하여 발전사업자가 협약이나 계약 등의 방법으로 제공하는 주파수조정, 적정 예비력의 확보, 무효전력수급 등의 서비스를 통틀어 계통운영 보조서비스(ancillary service)라고 한다. 재생에너지 공급 비중이 증가할 경우 이에 따른 에너지 공급의 간헐성 문제가 대두될 수 있음에도, 현재 국내 전력시장에서는 체계적인 보조서비스가 마련되어있지 않다. 따라서, 매 순간 수요와 공급을 일치시켜야 하는 전력계통의 안정성을 유지하기 위한 발전원의 확보 및 정교한 보조서비스체계 구축이 필요하다. 다시 말해, 보조서비스의 기술적 가치에 대한 연구 및 정확한 평가를 통해 보조서비스 체계를 개선할 수 있는 제도적 방안을 제공해야 한다.

라. 신재생에너지 설비 설치규제 및 지역부처별 분리된 관리체계

- 신재생에너지 설비에 대한 설치규제 (태양광: 지자체별 이격거리 규제 (도로나 주거지로부터 100~1,500m 이내 설치 금지), 풍력: 산지관리법에 따른 입지규제) 및 신재생에너지 인허가 기준 등이 강화되고 있어 신재생에너지 시스템을 설치에 물리적 제한이 있다. 2019년 상반기 기준으로 전체 지자체의 51%에 달하는 기초지자체가 태양광 설비 설치 시 이격거리와 관련된 조례, 지침을 제정해 운영하고 있어, 전력거래를 위한 신재생에너지 시스템 설치용량 확보에 어려움을 겪고 있다. 이러한 규제들은 합리적 연구나 과학적 근거 없이 타 지자체의 규정을 참고한 사례가 많아 설치규제에 대한 과학적 근거를 마련할 필요가 있으며, 효율적으로 신재생에너지 설비를 설치할 수 있도록 설치규제를 완화해야 한다. 또한, 해양수산부가 부산 지역의 해양공간계획 등을 발표하며 에너지개발구역은 한

곳도 반영하지 않는 등 정부정책과 달리 각 부처에서 규제안을 제각각 발표하고 있어 지역별로 신재생에너지 설비 설치에 어려움을 겪고 있다. 따라서, 이러한 규제를 통합하여 관리할 부서를 지정하는 등의 방법을 통해 신재생에너지 설비의 설치에 동일한 기준을 적용하는 것이 중요하다.

마. 기존 실증단지 선정의 미흡

- 우리나라는 2016년부터 수원 솔대마을과 홍천 친환경에너지 타운에 프로슈머 이웃 간 전력거래 실증사업을 추진하고 있지만, 소비자 전력사용량이 불규칙해서 프로슈머와 소비자 간에 지속적인 전력 거래를 성사시키기가 어렵다. 또한, 솔대마을의 경우 11가구만 실증사업에 참여하고, P2P 전력거래 시 전력가격 책정방법에 대한 기준이 없어 제대로 된 실증이 진행되지 않고 있다. 즉, P2P 전력거래 시범사업을 보다 활발하게 활용할 수 있는 적절한 실증단지의 선정이 이루어져야 한다..

(2) 연구개발성과 사업화 계획 및 활용방안

본 연구개발과제는 연구종료 후 5년간 성과활용 목표를 다음과 같이 수립하고, 이를 기반으로 사업화를 진행하고자 한다.

단계	종료 후 1년	종료 후 2년	종료 후 3년	종료 후 4년	종료 후 5년
I	기술 개발 단계	기술 개발 단계	기술 개발 단계	기술 개발 단계	기술 개발 단계
	■ 완료	□ 완료	□ 완료	□ 완료	□ 완료
II	기술 검증·보완 단계	기술 검증·보완 단계	기술 검증·보완 단계	기술 검증·보완 단계	기술 검증·보완 단계
	□ 준비 □ 진행중 □ 완료	■ 준비 □ 진행중 □ 완료	□ 준비 ■ 진행중 □ 완료	□ 준비 □ 진행중 ■ 완료	□ 준비 □ 진행중 □ 완료
III	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)
	□ 준비 □ 진행중	□ 준비 □ 진행중	□ 준비 □ 진행중	□ 준비 □ 진행중	■ 준비 □ 진행중
IV	시장수용 단계	시장수용 단계	시장수용 단계	시장수용 단계	시장수용 단계
	□ 초기발생 □ 지속발생	□ 초기발생 □ 지속발생	□ 초기발생 □ 지속발생	□ 초기발생 □ 지속발생	□ 초기발생 □ 지속발생

- I 단계 (연구개발과제 종료 후 1년): 연구개발성과를 최종적으로 검토하고 완성하는 단계이다. 또한 이후 진행될 최종성과물 기술 검증 및 보완 단계를 사전에 준비한다.
- II 단계 (연구개발과제 종료 후 2~4년): 연구개발과제를 통해 개발한 최종성과물인 P2P-BES를 검증하고 보완하는 단계이다. 연구실 단위에서 성능평가 (TRL 4단계)를 진행하였던 기존과 달리, 이 단계에서는 test-bed를 선정하고, 실제 개인 간 전력거래를 수행해 보며 최종성과물의 성능을 검증 및 보완한다.
- III 단계 (연구개발과제 종료 후 5년): 개발된 최종성과물을 태양광 발전 관련사를 대상으로 기술실시계약을 진행한다. 이를 통해, test-bed가 아닌 실제 현장에 적용을 할 수 있을 것으로 기대되며, 다양한 데이터를 수집하고 현장적용 단계에서 최종성과물의 문제점을 도출하고 보완한다.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.