



제로에너지건축물 구현을 위한 태양광발전시스템 적용 연구 동향 분석

Analyzing Trends in Photovoltaic Systems for the Implementation of Zero-Energy Buildings

박보람* · 윤지영** · 김남현*** · 문진우****

Bo Rang Park* · Ji Young Yun** · Nam Hyeon Kim*** · Jin Woo Moon****

* Associate Research Engineer, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (pbr_1123@naver.com)

** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (yjyxyj5350@cau.ac.kr)

*** Coauthor, Researcher, School of Architecture and Building Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (skagus1546@naver.com)

**** Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gilerbert73@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to identify research trends by analyzing research papers on photovoltaic systems for the realization of ZEB in the Korea architecture field. **Method:** To this end, domestic journals have been classified by year, journal, keyword, and subject for the past five years, and in-depth analysis has been conducted using Voyant Tools. **Result:** As a result of the research trend analysis, it was confirmed that research on the application of photovoltaic systems in the field of architecture is continuously being conducted. Most of the papers have been published by the Korean Solar Energy Association. Seventeen degree theses were also investigated. As for the thesis keywords, Energy, ZEB, and BIPV were the most frequently appearing. Through this study, the level of development and the possibility of development of photovoltaic system technology for implementing ZEB in the architecture field were identified, and the direction and basic technology of the PV installation optimal decision-making system to be developed in future research were confirmed.

KEYWORD

제로에너지건축물
태양광발전시스템
보이언트 툴
선행연구Zero Energy Buildings
Photovoltaic System
Voyant Tools
Review Paper

ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 23, 2024

Final revision received Feb. 8, 2024

Accepted Feb. 16, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

국토교통부는 제로에너지건축물(Zero Energy Building, ZEB) 의무화 로드맵 발표 이후 2020년부터 단계별 의무화를 추진 중이다. 2023년 1월부터는 연면적 500㎡ 이상 공공건축물(5등급)과 30세대 이상의 공공분양·임대 공동주택(5등급)으로 의무 대상을 확대하였다. 서울시의 경우 국가 목표인 2024년보다 앞선 2023년부터 신축 민간 건축물에 ZEB 의무화에 나섰다. 대규모 신축에 우선 적용하고 점차 소규모 건축물까지 확대 해나가는 계획이다[1].

ZEB의 달성을 위해서는 에너지자립률 확보가 필수이다. 에너지 자립률은 신재생에너지기술 적용으로 건축물에서 소비하는 에너지량 대비 생산하는 에너지량의 비율이다. 건물의 에너지자립률에 따라 달성할 수 있는 ZEB 등급이 달라진다.

ZEB의 초기 달성 정책과 의무화가 확대됨에 따라 건물 에너지자립률 확보에 관한 관심이 어느 때보다 증가하고 있다. 특히, 가장 주목받고 있는 것이 태양광발전시스템(Photovoltaic system, PV)이며 그 중에서도 건물일체형태양광시스템(Building Integrated Photovoltaic system, BIPV)에 대한 관심이 증가하고 있다. 세계 BIPV 시장은 2020년 이후 연간 8.3% 수준의 성장을 통해 2025년에는 415억 달러에 이를 것으로 전망된다. 국내 BIPV 시장은 2020년 1,298억 원

에서 연평균 56%씩 증가해 2023년 5,218억 원에 달할 것으로 전망된다[2]. BIPV는 별도의 설치 면적이 필요 없어 고층 건물이 많은 국내 보급 환경에 실효성이 높다. 이 때문에 ZEB 달성을 위한 PV와 BIPV의 최적 설치에 관한 연구가 필요할 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 ZEB 구현을 위한 PV 설치 최적 의사결정시스템 개발의 예비 단계로서 국내 건축 분야 PV 적용 연구 논문을 심층적으로 분석하여 연구 동향을 파악하는 것이다. 이를 통해 현재 관련 분야 연구의 다양성과 TRL 수준을 이해하여 의사결정시스템에서 다룰 기술 선정, 성능 범위, 사용 주제 선정 등의 연구 방향성 구축과 활용 가능성을 제시하고자 하였다. 그뿐만 아니라 본 연구는 ZEB 달성을 위한 기초 자료로 활용되는 데에도 의미가 있다.

1.2. 연구 방법 및 절차

본 연구에서는 ZEB 구현을 위해 태양광발전시스템을 활용한 연구 및 적용 현황을 분석하기 위해 이론적 고찰을 실시하고 연구논문을 위주로 연구 동향 분석을 수행하였다. 연구논문은 DBpia, 한국교육학술정보원, 국회도서관, 국가과학기술정보센터에서 수집하였다.

연구논문은 최근 5개년도로 2019년부터 2023년 9월까지를 대상으로 수집하였다. 조사는 ZEB, 태양광발전시스템, PV, 건물일체형 태양광시스템, BIPV 등으로 논문명, 초록, 키워드로 1차 선별하여 시행하였다. 1차 선별된 자료를 토대로 건축 분야가 아닌 태양광발전소나 ZEB 구현을 위한 패시브 기술 등의 연구를 제외하여 2차 선별연구 선별을 진행하였다.

최종 선정된 논문은 Auto Text mining 분석 도구인 Voyant Tool(Ver.2.2)을 활용하여 연도, 학술지, 키워드, 분야 및 주제별 분석을 통해 결론을 도출하였다.

2. 이론고찰

2.1. ZEB 인증 현황

ZEB 인증제는 2017년을 시작으로 2020년부터 단계별 의무화에 돌입하였다. 2050년에는 전(全) 신축 건축물이 ZEB 1등급(에너지자립률 100%)으로 되어야 한다. ZEB 인증 현황을 파악하기 위하여 2017년 6월부터 2023년 12월까지의 7개년도 간의 통계자료를 취득하였다. 통계자료는 ZEB 공식 홈페이지에서 취득하였으며 인증 구분, 건물용도, 지역, 등급, 에너지자립률별로 구분하여 분석하였다[3].

7개년도의 ZEB 인증 현황은 총 4,837건으로 확인되었다. Fig. 1. 과 같이 인증 건수는 2020년부터 급격히 증가해 2021년부터는 1천 건 이상이 매해 ZEB로 구현되고 있다. 인증 구분 시 본인증 953건, 예비인증 3,884건으로 예비인증이 전체의 80%를 차지하는 것으로 조사되었다. 예비인증은 건축물 설계도서를 바탕으로 설계단계에서 ISO 13790과 DIN V 18599 기반의 건물에너지해석 프로그램인 ECO2를 통해 평가받고 있으며 본인증은 준공 도서를 바탕으로 ECO2를 통해 준공단계에서 평가하고 현장점검도 함께 진행된다.

건물 용도별 ZEB 인증 분석 결과는 Table 1.과 같다. 가장 높은 인증을 받은 용도는 교육연구시설로 본인증과 예비인증 합산 1,689건으로 나타났다. 그 다음으로 업무시설<교정 및 군사시설>운동시설<노유자시설>제1종근린생활시설<문화집회시설 순으로 798건~254건으로 상위에 위치하고 있다. 공공시설의 경우 2020년부터 연면적 1,000㎡ 이상은 5등급 의무화가 진행되면서 인증 건수 비율이 높은 것으로 판단된다. ZEB 인증에 미진하여 달성 건수가 한 자릿수로, 하위에 위치하고 있는 용도로는 동물 및 식물관련 시설, 판매시설, 위험물 저장 및 처리시설, 숙박시설, 창고시설, 분뇨 및 쓰레기처리 시설, 위탁시설, 종교시설로 확인되었다. 국내의 주거시설 중 가장 큰 비율을 차지하고 있는 공동주택은 예비인증 52건, 본인증 9건으로 합 61건으로 나타났다. 공동주택을 포함한 주거부문의 인증 비율은 낮은 편이나 2023년부터 공공 공동주택 30세대 이상은

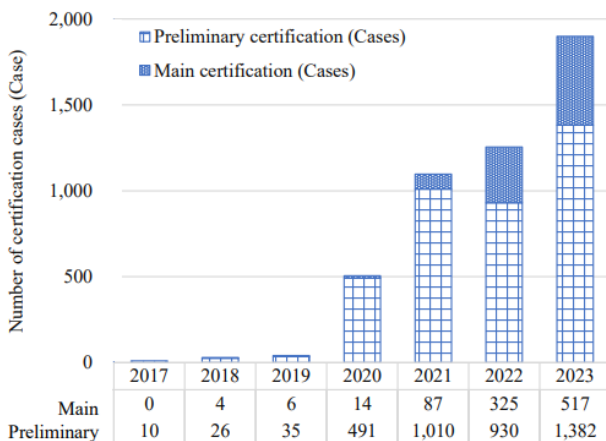


Fig. 1. ZEB certification cases by year

5등급이 의무화됨에 따라 급격히 인증 건수가 증가할 것으로 예상된다.

인증 등급의 경우 1등급 177건, 2등급 154건, 3등급 439건, 4등급 1,142건, 5등급 2,925건으로 1등급이 전체의 4%에 그쳤고 5등급이 전체의 60%를 차지하고 있다.

1등급 달성의 경우 공동주택이 예비인증 22건, 본인증 14건으로 총 36건으로 건물용도 중 가장 많은 달성률을 보였다. 그 다음으로 는 공장이 31건, 관광휴게시설 29건, 교육연구시설 24건으로 달성률이 높았다.

Table 1. ZEB certification status by building use(2017.06-2023.12)

Building classification	Building use	Preliminary certification	Main certification	Sum
Residential	Apartment house	52	9	61
	Rental house	27	2	29
Non-Residential	Educational research	1,307	382	1,689
	Office	636	162	798
	Correctional & Military	360	67	427
	Exercise	305	55	360
	Children & Elderly	255	84	339
	First kind-neighborhood living	350	71	421
	Cultural & Assembly	215	39	254
	Training	60	19	79
	Factory	61	11	72
	Second kind-neighborhood living	47	7	54
	Sightseeing & Rest	34	8	42
	Transportation	32	1	33
	Power production	21	5	26
	Cemeteries management	24	5	29
	Detached house	11	9	20
	Medical	19	5	24
	Broadcasting & Communications	9	4	13
	Resource cyclical	12	2	14
	Car management	13	1	14
	Animal & Plant	8	-	8
	Sales	8	1	9
	Hazardous storage & disposal	5	2	7
	Accommodation	7	-	7
	Warehouse	3	-	3
	Refuse disposal	1	1	2
	Recreational	1	-	1
Religious	1	1	2	
Sum		3,884	953	4,837

이와 같이 ZEB 5등급의 비율이 현저히 높은 이유는 기술, 건축비, 인센티브, 실제적 운용의 효율성 등의 한계로 아직은 ZEB 의무 비율만을 맞추기 위해 [4]최소 등급을 목표로 진행하는 경우가 빈번하기 때문이라 판단된다.

2.2. 건축 분야 태양광발전시스템 시장 및 기술 동향

태양광 발전시스템은 태양 빛을 받아 전력을 생산하는 태양전지로 구성되며 원전 또는 화석연료를 대체할 수 있는 에너지 프로슈머로서의 역할이 증대되고 있다[5]. 한국관산업진흥회(2020)에서 발간한 태양광 발전과 BIPV 산업 동향에 따르면, 상용화된 태양전지는 3개의 종류로 분류될 수 있다. 실리콘계 태양전지는 결정계(단결정, 다결정), 박막계가 해당하며 화합물계 태양전지는 CIGS계(Copper Indium Gallium Selenide), CdTe계(Cadmium Telluride), 집광계로 불린다. 유기계 태양전지는 염료감응, 유기박막 등이 해당된다. 실리콘계는 9%~20%의 높은 변환효율을 확보하고 있으나 투명성 확보가 어렵지만 화합물계와 유기계 태양전지는 실리콘계의 약 80%에 해당하는 변환효율을 가지며 구조에 따라 투명성 확보가 가능하다는 특징을 가진다[6]. 이에 따라, 투명성 확보가 가능한 특징을 활용하여 BIPV를 개발하려는 연구가 여러 방면에서 진행 중이다. BIPV의 모듈은 Cell의 재질에 따라 결정질과 비정질로 구분된다. PV 모듈에 유리를 접합하는 방식에 따라 양면 유리 부착은 G to G(Glass to Glass) 타입, 전면 투명유리를 사용하고 후면에 불투명 금속체를 접합하는 G to T(Glass to Teddlar) 타입으로 구분된다. 다음은 BIPV 세계 시장 규모 및 국내의 기술 동향에 대해 분석하였다[7].

1) 적용 분야별 BIPV 시장 규모

BIPV의 글로벌 전체 시장 규모는 2020년 35억 4,000만 달러에서 연평균 성장률 16.1% 증가하여 2026년에는 86억 8,000만 달러에 이를 것으로 전망된다. 전 세계 BIPV 시장은 적용 분야에 따라 지붕, 건물 입면 및 창으로 분류되고 있다. 지붕은 2020년 22억 6,000만 달러에서 연평균 성장률 14.7%로 증가하여, 2026년에는 51억 5,000만 달러에 이를 것으로 전망되며 건물 입면 및 창은 2020년 12억 8,000만 달러에서 연평균 성장률 18.4%로 증가하여 2026년에는 35억 3,000만 달러에 이를 것으로 전망된다.

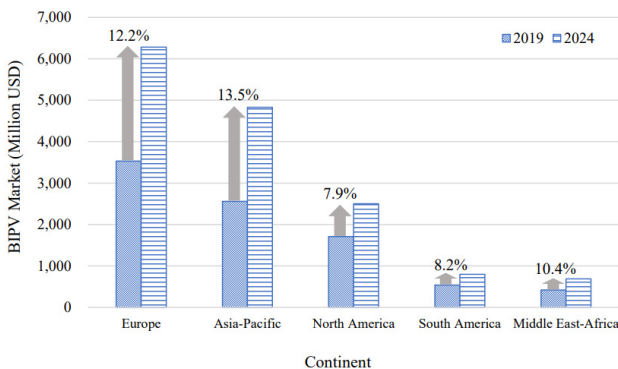


Fig. 2. BIPV market by continent

2) 대륙별 BIPV 시장 규모

2019년을 기준으로 유럽 지역이 40.3%로 가장 점유율이 높았고 아시아-태평양 지역이 29.2%, 북미 지역이 19.5%, 남미 지역이 6.2%, 중동-아프리카 지역이 4.8%로 Fig. 2.와 같이 나타났다. 연평균 성장률은 유럽 12.2%, 아시아-태평양 13.5%, 북미 7.9%, 남미 8.2%, 중동-아프리카 10.4%로 증가할 것으로 확인되었다.

3) 대한민국 BIPV 시장 규모

대한민국의 BIPV 발전시장은 2020년 1억 1,000만 달러에서 연평균 성장률 21.2%로 증가하여, 2026년에는 3억 6,000만 달러에 이를 것으로 전망되었다.

4) 해외 기술 동향

스위스의 Lausanne 공대에서는 발전량을 유지하면서 다양한 색을 표현할 수 있는 BIPV를 개발하였고 영국의 Exeter대학교 환경 및 지속 가능성 연구소에서는 새로운 방식의 솔라스퀘어를 개발하여

Table 2. Major BIPV technology trends in each country

Nation	Corporate	Technology
Germany	SCHCO	BIPV Module for Schco Windows and Facade Systems
Japan	Sharp	Thailand and Vietnam are also pushing for mega-solar construction
USA	First solar	Development of new CdTe solar panel '6 Series'
China	Hanenergy	Installation of HanWall, a BIPV project surrounding the exterior wall of a building (Total area: 6,000m ²)
China	SINGYES SOLAR	Beijing Olympic Center, Weihai Civic Culture Center Completed With BIPV Project
Republic of Korea	KCL & University of Hanbat	A Study on the Establishment of KS Certification Standards for BIPV Systems
Republic of Korea	KIST	Development of technology that can implement colors in solar cells without additional pigments and Developed as a solar cell for windows with the world's highest efficiency of 15%
Republic of Korea	Eagon	Construction of BIPVs such as Marine Solar Park 600kW, Seoul City Hall 200kW, Samseong-dong Parnas Tower 600kW, Yeouido 2nd National Assembly Hall, and Antarctic Stadium Reporting Base
Republic of Korea	SK solar energy	Development of Localized Color BIPV
Republic of Korea	Oktoki imagineering	Development of Localized Color BIPV
Republic of Korea	Hanwha Engineering & Construction Co., Ltd	Development of four types of designs from existing square-shaped PVs
Republic of Korea	Korea Institute of Energy Technology	Automatic Color Conversion Smart Window, TiO2 Light Absorption Layer & reduction discoloration layer

주목받고 있다. 건물 외벽에 벽돌이나 유리창 대신 설치할 수 있는 유리블록인 솔라스퀘어는 투명한 유리 블록 내부에 빛나는 은색 구조물이 장착되어 있다. 저렴하고 발전 효율이 높으며 미적 심미성으로 기대를 모으고 있다. 이 외에도 BIPV 생산 주요 기업인 독일 SCHCO와 Stern solar, 미국의 First solar, 일본의 SHARP, 중국의 Hanenerg, SINGYES solar 등이 존재한다. BIPV 특허출원 동향으로 미국이 가장 활발한 활동을 보이고 있으며 유럽에서는 상대적으로 일본, 미국, 한국에 비해 출원이 저조한 상태이다. 일본이 전체 출원 비중의 38%를 차지하고 있어 최대 출원국으로 BIPV 분야를 리드하고 있는 것으로 나타났다. 그 뒤로 미국 25%, 유럽 12%로 나타났다.

5) 국내 기술 동향

한국건설생활환경시험연구원(KCL)과 한국과학기술연구원(KIST), 한국에너지기술연구원, 한국과학기술연구원 등 국가 연구기관에서 BIPV의 인버터, 컬러 태양전지 등의 기술을 개발하고 있으며 이진창호, 에스케이솔라에너지, 한화건설 등 대기업 및 중소기업에서도 국산화 컬러 BIPV, 디자인 BIPV 등을 개발하고 있다. 또한, 대학 연구소에서도 BIPV형 태양전지 창호, 차양 장치 등을 연구 중이다. 특허출원의 경우 전 세계 BIPV 관련 특허출원 비중의 25%를 한국이 차지하고 있다. 2005년에서 2007년도에 급격히 출원 건이 증가하였으며 대기업과 공공연구기관이 주를 이루고 있다. 국내외 상세 기술 동향은 Table 2. 와 같다.

2.3. Voyant Tools 개요 및 원리

Voyant Tool은 인공지능 기반의 오픈 소스 웹 기반 텍스트 분석 응용 프로그램이다. 연구자들을 위한 텍스트 해석이 용이 하도록 설계된 학술 프로젝트의 성과물이다. 코드는 GitHub를 통해 사용할 수 있으며 GPL3와 Creative commons by Attribution 라이선스 하에 있다. Stéfán Sinclair가 2020년 8월까지 본 프로젝트의 리더이자 프로그래머로 활동하였으며 현재는 앨버타 대학의 Geoffrey Rockwell이 리드하고, Andrew MacDonald, Cecily Raynor의 지원을 받고 있다[8](Fig. 3.).

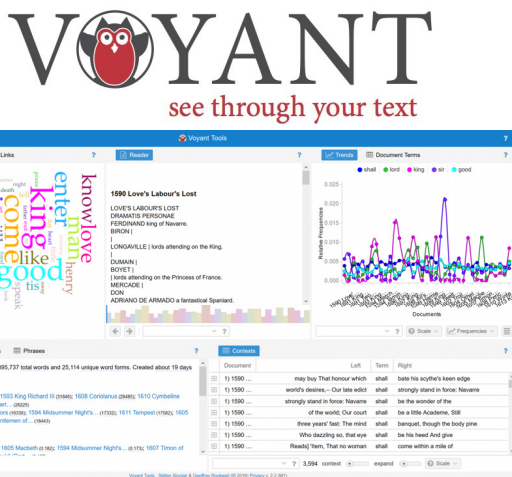


Fig. 3. Example of voyant tools

Table 3. Main list of voyant tools [8]

Nation	Technology
Bubblelines	Visualizes the frequency and distribution of terms in a corpus
Bubbles	A playful visualization of term frequencies by document
Cirrus	A word cloud that visualizes the top frequency words of a corpus or document
Collocates Graph	Represents keywords and terms that occur in close proximity as a force directed network graph
Corpus Collocates	A table view of which terms appear more frequently in proximity to keywords across the entire corpus
Contexts	Tool shows each occurrence of a keyword with a bit of surrounding text. It can be useful for studying more closely how terms are used in different contexts
Correlations	Tool enables an exploration of the extent to which term frequencies vary in sync
Document Terms	A table view of term frequencies for each document
Corpus Terms	A table view of term frequencies in the entire corpus
Documents	Shows a table of the documents in the corpus and includes functionality for modifying the corpus
Knots	A creative visualization that represents terms in a single document as a series of twisted lines
Mandala	A conceptual visualization that shows the relationships between terms and documents
Micro Search	Visualizes the frequency and distribution of terms in a corpus
Phrases	Shows repeating sequences of words organized by frequency of repetition or number of words in each repeated phrase
Reader	Provides a way of reading documents in the corpus, text is fetched as needed
Scatterplot	A graph visualization of how words cluster in a corpus document similarity, correspondence analysis or principal component analysis
StreamGraph	A visualization that depicts the change of the frequency of words in a corpus
Summary	Provides a simple, textual overview of the current corpus, including number of words, number of unique words, longest and shortest documents, highest and lowest vocabulary density, average number of words per sentence, most frequent words, notable peaks in frequency, and distinctive words
Terms Radio	A visualization that depicts the change of the frequency of words in a corpus
TextualArc	A visualization of the terms in a document that includes a weighted centroid of terms and an arc that follows the terms in document order.
Topics	Tool provides a rudimentary way of generating term clusters from a document or corpus and then seeing how each topic (term cluster) is distributed across the document or corpus
Trends	Shows a line graph depicting the distribution of a word's occurrence across a corpus or document
Veliza	A experimental tool for having a (limited) natural language exchange (in English) based on your corpus
Word Tree	Tool allows you to explore how keywords are used in different phrases in the corpus

Voyant를 활용하면 기존의 텍스트 분석 방식에 비해 정보와 지표를 효율적으로 처리하고 짧은 시간에 결과를 제공하는 이점이 있다. Voyant의 텍스트 분석 도구는 요약, 상관관계, 빈도, 근접도 등을 시각화 또는 테이블화 하는 기능을 가진다. Goo,J.Y(2021)은 Voyant의 분석 역량을 고찰하였는데, 15,000단어의 텍스트 분석에 약 30초 소요되는 것을 확인하였다. 또한 텍스트의 단어 수가 많을수록 내용 파악의 정확성이 높아지는 것을 관찰하였으며 연구자가 텍스트에서 확인하고자 하는 특정 맥락이나 표현, 주제가 있을 경우 데이터를 선택적으로 추출하여 읽는 방안이 기존의 문헌조사 방식보다 효율적임을 밝혔다[9]. Voyant가 제공하는 분석 Tool 종류는 Table 3.과 같이 총 27가지이다. 분석 데이터 및 성격별로 Tool을 선택하여 다양한 분석이 가능하다.

3. 연구 동향 분석

3.1. 연도별 연구 동향

2019년부터 2023년 9월간의 ZEB 구현을 위한 태양광발전시스템 적용 관련 국내 논문은 총 70편으로 조사되었다. Fig. 4.와 같이 ‘Bubbles’ 분석 종류를 활용한 연도별 게재된 논문은 2019년 7건, 2020년 19건, 2021년 25편, 2022년 13건, 2023년 6건으로 2021년도에 게재 편수가 가장 높은 것으로 분석되었다.

2020년도부터 제로에너지건축물 인증 의무화 도입 후 2020년도 말부터 2021년도 초에 제로에너지주택으로 준공된 공동주택이 대

거 공급됨에 따라 2021년도의 기술개발, 적용, 운영 및 유지관리를 위한 연구가 가장 활발했던 것으로 판단된다.

3.2. 학술지별 연구 동향

조사된 연구논문이 게재된 학술지에 따른 현황은 Fig. 5.와 같다. 학술지별 연구 동향은 Voyant가 제공하는 Tool 유형 중 ‘Cirrus’ 방식으로 분석하였다. 한국태양에너지학회에 20편으로 가장 높은 게재 수를 보였다. 그 다음으로는 학위논문 형태가 가장 많았으며 13개 대학에서 게재된 것으로 조사되었다. 한양대학교와 한밭대학교 각각 3편씩 게재하였고 그 외 11개 대학에서 각 1편씩 게재하였다. 그 외 학회로는 대한설비공학회 6편, 한국신재생에너지학회 5편, 한국생태환경건축학회 4편, 한국디지털정책학회와 대한건축학회에서 각 3편, 한국건축환경설비학회 2편 게재하였다. 그 외 1편씩 게재된 학회는 한국정보전자통신기술학회, 한국정보기술학회, 한국에너지학회, 한국산학기술학회, 대한전기학회, 대한기계학회가 있다.

한국태양에너지학회는 태양에너지에 관한 기초, 응용, 개발에 특화된 학회이므로 태양광발전시스템 관련 연구논문 수가 가장 많은 것으로 판단 된다. 대한설비공학회는 산업설비와 더불어 건축설비에 걸쳐 광범위한 분야를 다루는 전문가들이 다양하게 활동하고 있는 학회로써, 건축과 태양광발전시스템을 다루는 연구논문 게재율이 타 건축 전문학회에 비하여 높은 편임을 알 수 있다. 특히 한국태양에너지학회에 게재된 논문은 평균 이용수가 80으로 타 학술지에 비해 높은 편이며 이용수 250 이상으로 Top 10%에 포함되는 논문이 3건 있다. 즉, 점유율이 높은 한국태양에너지학회 학술지의 이용 기여도도 높아 ZEB 구현을 위한 태양광발전시스템 연구 분야를 주도하고 있음을 알 수 있다.

3.3. 키워드별 연구 동향

키워드별 연구 동향을 분석한 결과는 Fig. 6., Fig. 7.과 같다. 사용된 키워드는 조사된 연구논문의 내용 전체가 아닌 논문 저자가 추출하여 명시한 Keyword를 대상으로 한다. 분석은 두 가지 방법으로 진행하였다. 첫째, 키워드의 등장 빈도를 분석하는 ‘Cirrus’를 사용하여 가장 연구 주제로 자주 다뤄지는 키워드를 도출하였다. 둘째, 키워드 간의 맥락 연관성 분석을 위해 ‘Collocates Graph’를 사용하였다.

Cirrus 분석 결과 Fig. 6.과 같이 총 541개 키워드가 산출되었다. 총 70편의 국내 논문에서 키워드 등장 빈도로는 1위부터 10위 순으로 Energy 53건, ZEB 40건, BIPV 29건, Photovoltaic 27건, Building 18건, Solar 12건, Apartment 11건, Renewable 10건, Zero와 Certification이 각각 8건, Heat이 7건으로 분석되었다. 이를 통해 ZEB 구현을 위한 태양광발전시스템 연구에서는 Energy를 중요하게 다루고 있으며 BIPV 및 Photovoltaic을 주요 기술로 개발 또는 적용하고 있음을 확인할 수 있다.

키워드 간 연관성 분석은 Collocates Graph를 활용한 Force-directed 네트워크 그래프로, 근접하게 발생하는 키워드와 용어를 나타내는 것이다. Fig. 7.과 같이 Force-directed 네트워크 그래프는 주황색으로 연결된 용어에 파란색 키워드가 있는 네트워크를 보여주며, 연결선의 굵기가 굵을수록 더 높은 연관성을 보여준

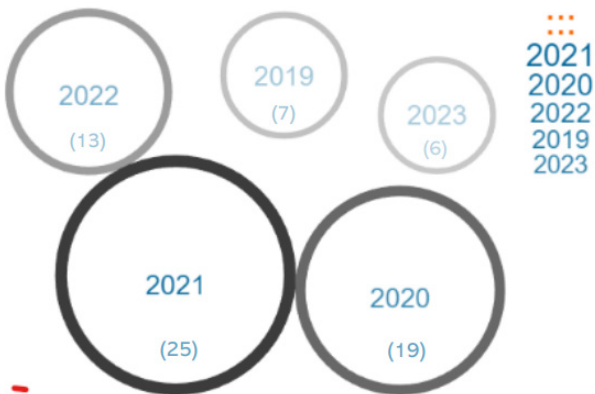


Fig. 4. Results of research trend analysis by year

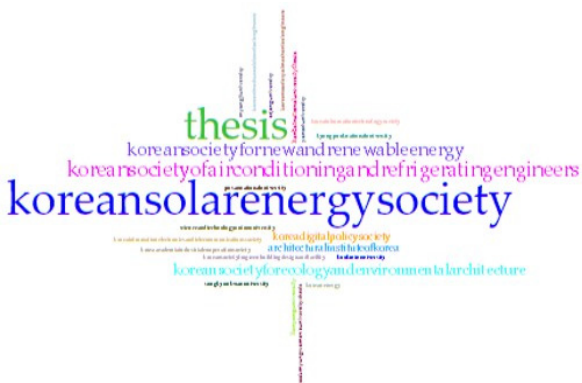
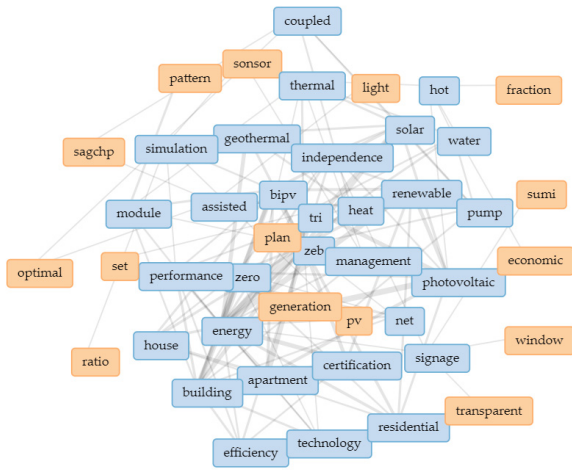
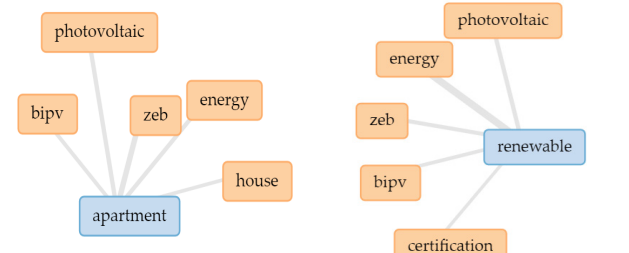


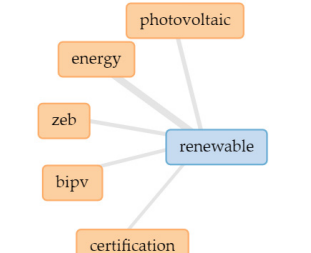
Fig. 5. Results of research trend analysis by journal



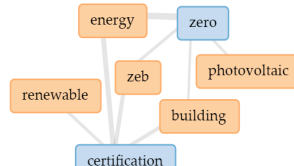
(a) Collocates graph of total keyword



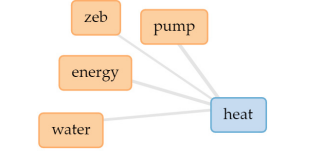
(i) Target keyword - Apartment



(j) Target keyword - Renewable

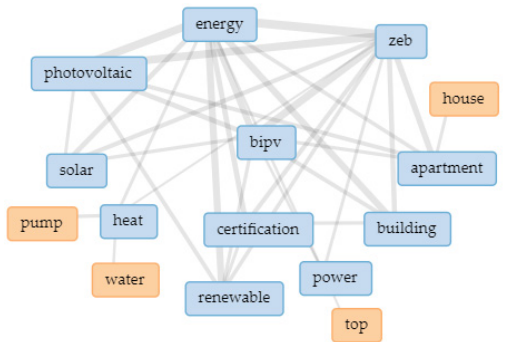


(k) Target keyword - Zero & Certification

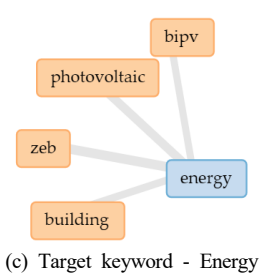


(l) Target keyword - Heat

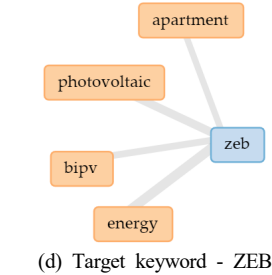
Fig. 7. Results of Collocates Graph Analysis by Keyword



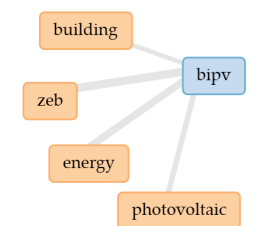
(b) Results of 1st - 10th frequencies of keyword appearance



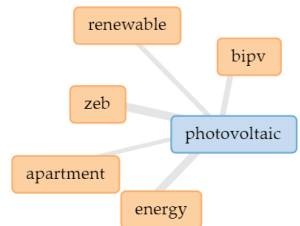
(c) Target keyword - Energy



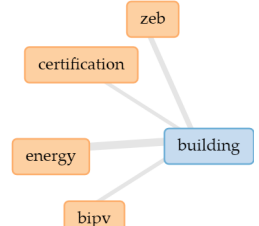
(d) Target keyword - ZEB



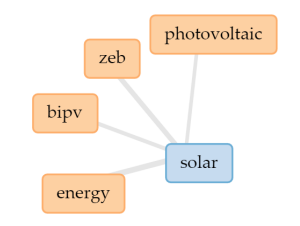
(e) Target keyword - BIPV



(f) Target keyword - Photovoltaic



(g) Target keyword - Building



(h) Target keyword - Solar

Table 4. Number of papers by year

Field	2019	2020	2021	2022	2023	Total	Ratio (%)
Planning	3	4	6	6	1	20	28.5
System development	3	7	12	5	3	30	42.9
Case Study	1	2	4	1	1	9	12.9
Cost	0	5	1	0	1	7	10.0
Policy	0	1	2	1	0	4	5.7
Total	7	19	25	13	6	70	100.0

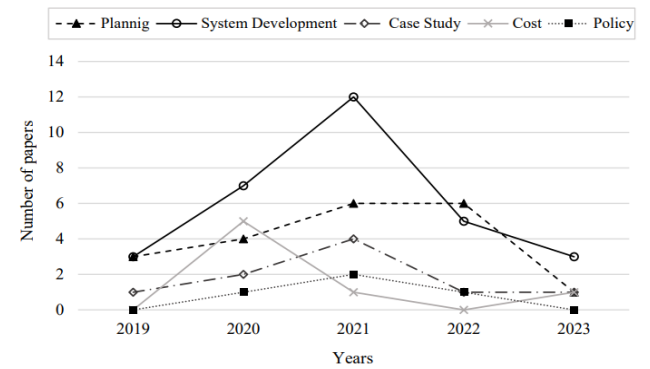


Fig. 8. Trends in the research field of PV system for ZEB

TRL 7~9단계 연구는 부족한 실정이다. 계획과 적용 사례 분야도 지속적으로 연구가 이뤄지고 있는 반면 경제성 및 정책분야는 2020년도 이후로 줄어드는 추세이다. ZEB 의무화에 원활한 대응을 위해서는 시스템 개발뿐만 아니라 개발된 기술의 적용과 그에 따른 적절한 평가 방법도 개선될 수 있도록 정책 연구에 관한 관심도 동반되어야 할 것으로 판단된다.

각 분야를 주요 연구 주제로 구분하여 상세 동향을 파악하였다. 가장 활발한 연구 추세를 보이는 시스템 개발 분야의 경우, 입면 또는 창호 부착형 태양광열 모듈 개발 논문이 11건(36.7%)으로 가장 많았고, 하이브리드형 태양광 시스템 개발 7건(23.3%), 태양광 설

계 프로그램 개발 4건(13.3%)이었으며 그 외는 건물용 태양광발전시스템 고장진단, 전력수요관리 시스템 연구 등이 있는 것으로 확인되었다. 계획 분야는 태양광발전시스템 설치를 위한 입면계획 연구가 9건(45%), 신재생에너지 구성 방안연구 4건(20%), ZEB 인증에 의한 사회적 측면 평가 계획 연구가 3건(15%)이며 그 외에 BIM 설계분석 기술 활용 방법 계획 등이 있다. 적용 사례 분야에서는 ZEB로 구현된 공동주택 또는 단지를 대상으로 신재생에너지 기여도를 평가하는 논문이 7건(80%), 사용자 만족도에 관한 연구 2건(20%)으로 연구되고 있다. 경제성 분야는 ZEB의 생애주기 비용분석, 태양광발전시스템의 공사비 및 경제성 분석을 주제로 다루었다. 정책 분야는 BIPV 정의 개정 방안연구, ZEB 인증제 난방방식 대응 방안 등의 주제로 연구가 진행되고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 ZEB 구현을 위한 태양광발전시스템 적용 연구에 대한 최근 5개년(2019년부터 2023년 9월까지)의 국내 연구논문을 조사하였다. 조사된 논문에 대하여 연도별, 학술지별, 키워드별, 주제별로 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

조사된 국내 논문은 총 70편이며 2019년 7건을 시작으로 2021년에 25건으로 가장 높은 게재 편수를 보였다. ZEB 구현을 위한 태양광발전시스템 연구는 지속적으로 수행되고 있으나 ZEB 의무화 조기 달성을 목표로 시행 중인 서울시 등의 행보에 적절하도록 보다 활발한 연구의 필요성이 절실하다.

학술지별 연구논문 게재 동향은 13개 학술지와 학위논문으로 분석되었다. 한국태양에너지학회에 총 20편의 논문이 게재되어 가장 많았다. 그다음으로는 학위논문이 11건으로 한양대학교, 한밭대학교가 각 3건으로 높은 비율을 차지했다. 타 학술지에 비해 한국태양에너지학회가 태양에너지 이용에 관한 기초, 응용, 개발에 특화되어 있으므로 태양광발전시스템 관련 연구논문 수가 가장 많은 것으로 사료 된다.

키워드 분석의 경우 등장 빈도와 키워드 간의 연관성을 대상으로 한다. 총 541개의 키워드 중 Energy, ZEB, BIPV가 22%를 차지하면서 가장 등장 빈도가 높았다. 키워드 간의 연관성은 등장 빈도 10순위 키워드를 대상으로 각각 분석하였다. 분석 결과, 10가지 키워드에서 공통으로 Energy-ZEB-BIPV-Photovoltaic-Building으로 연관성이 높게 나타났다. 이는 에너지자립률 확보 또는 에너지 절감을 통한 ZEB 구현을 위해 BIPV 방식 또는 일반 PV를 다루는 연구가 관련성이 높다고 해석할 수 있다.

조사된 70편의 논문을 5가지 분야로 계획, 시스템 개발, 적용 사례, 경제성, 정책으로 구분하여 동향을 분석하였다. 그 결과, 시스템 개발 분야가 42.9%로 가장 많이 다뤄진 것으로 확인되었다. 반면, 경제성과 정책분야가 각각 10%, 5.7%로 낮았다. ZEB에 원활한 대응을 위해서는 시스템 개발뿐만 아니라 개발 기술 적용에 대한 경제성, 평가방안을 도모할 수 있는 정책 연구도 활발해져야 할 것으로 분석된다. 시스템 개발 분야의 세부 주제로는 입면 또는 창호 부착형 태양광열 모듈 개발 연구가 36.7%로 가장 많이 수행되고 있었으며 하이브리드형 태양광 시스템 개발이 그 뒤를 이었다.

본 논문은 태양광발전시스템을 대상으로 건축 분야에서 ZEB 구현을 목적으로 하는 연구논문 동향을 분석하였다. 이를 통하여 건축 분야에서의 태양광발전시스템 기술 수준 및 발전 가능성을 확인하였고 연구 결과를 바탕으로 향후 연구에서 개발하고자 하는 PV 설치 최적 의사결정시스템의 방향 구축 및 기본 기술을 파악할 수 있었다. 그러나, PV의 실제 적용 후 평가, 유지관리에 관한 연구는 다소 부족한 것을 확인할 수 있었다. 건축에서 최적 PV 설치를 위해서는 기술개발과 더불어 적용성, 유지관리, 모니터링 분야도 통합되어 지속적으로 연구되어야 할 것이다. 추후 연구에서는 해당 분야의 국내외 연구 동향과 실제 적용 사례를 조사·분석하여 국내외 비교 후 서로 간의 장점을 도출하여 ZEB 구현을 위한 PV 설치 최적 의사결정시스템에 적용할 수 있을 것이다. 이를 통해 기존 대비 건물용도, PV 효율, PV 설치 면적 및 위치, 손쉬운 유지관리 등 종합 성능이 향상된 연구가 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.RS-2023-00237932), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2023-00217322).

References

- [1] 서울특별시 주택건축본부, 서울시 녹색건축물 제2차 조성계획, 2022, p.121. // (Seoul Metropolitan Government Housing and Construction Bureau, The second plan for green building in Seoul, 2022, p.121.)
- [2] 이정구, ASTI Market Insight 2022-047: 건물일체형 태양광 발전(BIPV), 한국과학기술정보연구원, 2022. // (J.G. Lee, ASTI Market Insight 2022-047: BIPV, Korea Institute of Science and Technology Information, 2022.)
- [3] Zero energy building, <https://zeb.energy.or.kr>, 2024.01.02.
- [4] 한국건설산업연구원, 제로에너지건축물 정책 진단과 활성화 과제, 2022. // (Construction and Economy Research Institute of Korea, Zero energy building policy diagnostic and revitalization challenges, 2022.)
- [5] 지식산업정보원 R&D정보센터, 탄소중립/제로에너지건축 기술현황과 스마트그리드 산업 활성화 실태분석, 지식산업정보원, 2022, p.239. // (Knowledge Industry Information Institute R&D Information Center, A study on the state of carbon neutral/zero energy building technology and the revitalization of the smart grid industry, Knowledge Industry Information Institute, 2022, p.239.)
- [6] 한국광산업진흥회, 태양광 발전과 BIPV 산업 동향, 광융합분야 해외 유망산업기술 시장동향분석보고서, 2020, p.10. // (Korea Mining Industry Promotion Association, Solar power and BIPV industry trends, An analysis of market trends of promising overseas industrial technology in optical convergence, 2020, p.10.)
- [7] Arizton, Building-integrated photovoltaics market, 2021.
- [8] S. Sinclair, G. Rockwell, Voyant tools, <http://voyant-tools.org/>, 2024.01.10.
- [9] 구지연, A Study on the content analysis capabilities of Voyant tools, 인문과학, 제123집, 2021.12, pp.107-136. // (J. Goo, A Study on the content analysis capabilities of Voyant tools, The Journal of the Humanities, 123, 2021.12, pp.107-136.)
- [10] H. Ertas, B. Pak, C. Newton, An operational framework for an online community based on the commons, dissensus and shared knowledge, Postdigital Science and Education, 2(2), 2020.04, pp.397-415.