

제로에너지건축물의 공사비 증가분 산출에 관한 연구

심홍석^{1,2}, 이성주^{2*}

¹한국에너지공단 건물에너지실, ²아주대학교 산업공학과/인공지능학과

A study on the Increase in Construction Cost for Zero Energy Building

Hong-Souk Shim^{1,2}, Sungjoo Lee^{2*}

¹Building Energy Management Division, Korea Energy Agency,

²Department of Industrial Engineering/Department of Artificial Intelligence, Ajou University

요약 한국은 건물부문 온실가스 감축 목표 달성을 위한 핵심정책으로 2020년부터 공공부문 신축 건축물을 대상으로 제로에너지건축물 인증 의무화를 시행하였다. 이 논문은 제로에너지건축물을 활성화 시키고자 하는 정책 환경에서 건축 관계자들이 제로에너지건축 구현에 의사결정을 위해 참조할 수 있는 에너지절감 기술과 경제성 요인을 제시하는 것이 목적이다. 본 연구를 위해 최근 3년간 건축물 에너지효율등급 인증 자료와 공공기관을 대상으로 공사비 세부 내역서 자료를 수집하여 건축물 에너지 항목에 대한 공사비를 분석하였다. 또한, 건축물 에너지효율등급 인증 자료를 바탕으로 베이스라인 건축물의 각 에너지항목별 에너지성능을 도출하였으며, 베이스라인 건축물의 에너지항목에 대해 단계적으로 에너지성능 값을 상승을 시키는 반복적 시뮬레이션을 통해 제로에너지건축물의 에너지항목별 에너지성능 값을 도출하였다. 최종적으로 도출된 베이스라인 건축물과 제로에너지건축물의 에너지성능 값에 조사된 에너지항목별 공사비를 적용하여, 베이스라인 건축물과 제로에너지건축물의 에너지항목별 공사비를 도출하였다. 그 결과 제로에너지건축물을 구현 하는 데 조명설비가 10.5%로 에너지절감에 가장 큰 기여를 하며, 냉·난방 시스템의 공사비 증가분이 9.1%로 가장 작은 것으로 분석되었다.

Abstract As a core policy for achieving the goal of reducing greenhouse gas emissions in the building sector, Korea has enforced the mandatory certification of zero energy buildings for new public buildings from 2020. This study suggests energy-saving technologies and economic factors that building officials can refer to for decision-making on the implementation of zero energy buildings. For this study, the construction cost for the energy item of a building was analyzed by collecting the building energy efficiency level certification data and detailed construction cost statement data from public institutions for the last three years. Based on the building energy efficiency certification data, each energy item of the baseline building was derived, and the energy performance of the zero energy building was derived through repetitive simulations by gradually increasing the energy performance value of the baseline building. By applying the analyzed construction cost, the construction cost for each energy item of the baseline and zero energy buildings was derived. As a result, the lighting equipment contributed up to 10.5% energy savings, and the increase in construction cost of the cooling and heating system was at least 9.1%.

Keywords : Zero Energy Building Certification, Building Energy Efficiency Certification, Building Construction Cost, Green House Gas Reduction, Building Energy Performance

본 논문은 2019년도 국토교통부의 제로에너지건축물 보급활성화 사업의 재원으로 한국에너지공단의 “제로에너지빌딩 공사비 최적화 및 부동산 가치 연계방안” 과제와 아주대학교에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Sungjoo Lee(Ajou Univ.)

email: sungjoo@ajou.ac.kr

Received September 9, 2020

Revised October 21, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

최근 각 국가는 제21회 감축 목표를 달성하기 위한 INDCs(Intended Nationally Determined Contributions)를 제출하였다[1]. 각 국가가 제출한 NDCs에서 에너지효율을 언급할 때 건물부문의 에너지 효율 개선이 가장 많이 언급되었다[2]. 한편, 세계최종에너지소비량은 1971년 4,242Mtoe에서 2017년 9,717Mtoe로 약 129% 증가하였다. 이 중 건물부문의 최종에너지소비량의 비중은 1971년 32%에서 2017년 29%로 줄어들었지만 이는 주거부문의 비중이 24%에서 21%로 감소한 것에 기인한 것이며, 상업공공서비스의 비중은 1971년과 2017년 모두 동일한 비중을 차지하고 있어 주거부문과는 달리 상업공공서비스 부문의 에너지소비 비중은 감소하지 않고 있다[3].

한국은 2030년까지 BAU(Business as usual) 대비 온실가스배출 37% 감축을 목표로 하는 INDC를 UNFCCC에 제출하였으며, 이를 이행하는 방안으로 신축건물의 제로에너지화, 기존 건축물의 에너지성능 개선 및 BEMS(Building Energy Management System) 확산을 통한 에너지효율 제고를 강조하고 있다[4]. 또한, 국가 온실가스감축 로드맵을 수정하면서, 건물부문의 BAU 대비 감축률을 2016년 18.1%에서 2018년 32.7%로 확대하였다[5]. 정부는 건물부문 온실가스 감축 이행을 위해, 2017년 제로에너지건축물(ZEB : Zero Energy Building) 인증제도를 시작하였으며, 2019년에는 제로에너지건축 보급 확산 방안을 통해, 2020년 연면적 1,000㎡ 이상 공공건축물부터 2030년 연면적 500㎡ 이상 민간 건축물까지 단계적인 제로에너지건축물 의무화 로드맵을 발표하였다[6]. 이를 바탕으로 2020년 1월 1일부터 연면적 1,000㎡ 이상 공공건축물은 사용승인 단계에서 제로에너지건축물 인증표시를 의무화 하도록 녹색건축물 조성 지원법 시행령을 개정하면서, 신축단계부터 에너지고효율 건축물이 지어지도록 적극적인 정책을 추진하고 있다.

2020년 5월 기준으로 국내 기준에 맞는 제로에너지건축물 인증을 받은 실적은 142개이며, 이중 예비인증 받은 건축물은 131개이고, 실질적으로 준공되어 본인증을 받은 건축물은 11개에 불과하다[7].

이처럼 정부는 건물부문 온실가스 감축 목표 달성의 핵심과제로 제로에너지건축물 보급 활성화를 위한 정책은 급진적으로 강화되고 있는 반면에 건축주, 설계사 및 시공사의 입장에서 제로에너지건축물을 짓고자 하는 의

사결정을 위해 참조할 수 있는 실질적인 사례는 충분하지 않은 실정이다. 특히, 공공기관이나 일반 사업체는 제로에너지건축물을 짓기 위해서는 사전에 예산계획을 수립하고 확보해야 함에 따라 제로에너지건축물의 공사비를 얼마나 증가시켜야 하는지에 대한 참조할 수 있는 자료가 절실한 실정이다. 그럼에도 불구하고 관련데이터 수집의 어려움으로 인해 국내환경에서 제로에너지건축물 공사에 소요되는 비용에 대한 연구는 거의 진행되지 못한 실정이다.

본 연구는 현재 추진되고 있는 한국의 제로에너지건축물 인증제도의 개념과 건축물에너지 관련 주요 정책과 연구사례들을 살펴보고 제로에너지건축물의 등급별 공사비 증가분을 제시하고자 한다.

2. 예비적 고찰

2.1 제로에너지건축물 개념

제로에너지건축물의 개념은 다양한 관점과 에너지성능 수준에서 정의될 수 있다. 개념을 어떻게 정의하느냐에 따라 제로에너지 건축을 위한 패시브, 액티브 및 신재생에너지 등 요소기술의 투입비중이 달라진다[9]. 제로에너지건축물이 많이 보급되고 있는 미국, 캐나다, 유럽연합에서도 관점과 수준에 따라 넷 제로에너지건축물(Net Zero Energy Building) 또는 준 제로에너지건축물(Nearly Zero Energy Building) 등 용어를 각기 사용하고 있다.

제로에너지건축물의 개념을 최초로 정리하였다고 회자되는 토셀리니(Torcellini, P., et al.)(2006)는 미국 에너지부(Department of Energy; DOE) 건축물 기술프로그램(Building Technology Program)에서 제시하는 넷 제로에너지건축물에 대한 일반적인 정의의 한계를 인식하며, '넷 제로에너지'에 대한 개념부터 보다 명확히 정립할 필요성이 있음을 제시하였다[10].

유럽에서는 준 제로에너지건축물의 개념으로 정책을 실행하고 있다. 즉, "Nearly Zero-Energy Buildings"은 "매우 높은 에너지성능을 가진 건축물로 최소한의 에너지요구량과 대지 내 또는 인근에서 재생에너지를 공급 받는 건축물이라고 정의하고 있다[11]. 한국의 제로에너지건축물은 유럽의 개념과 유사하며, 녹색건축물 조성 지원법 제2조에서 "제로에너지건축물"이란 건축물에 필요한 에너지 부하를 최소화하고 신재생에너지를 활용하여 에너지 소요량을 최소화하는 녹색건축물을 말한다."라고

정의하고 있다[12]. 한국은 제로에너지건축물의 법적 정의를 바탕으로 단열, 기밀성능 강화를 통한 냉·난방 에너지요구량을 최소화시키는 패시브 개념과 태양광, 지열시스템 등의 신재생에너지 설치를 통해 건축물의 화석연료 소비량을 감소시키는 액티브 개념을 더한 제로에너지 건축물 개념을 정립하여, 2017년부터 세계최초로 에너지 자립률에 따라 5개 등급으로 구분한 제로에너지건축물 국가 인증 제도를 시행하였다[부록1 참조].

2.2 기존문헌 고찰

그동안 건축물 에너지성능에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 김혜진·서동현(2018)은 국내 용도별 상세 표준건축물을 정의하기 위하여 건물에너지측면에서 표준건축물 정의에 사용되는 DB의 종류와 활용성을 분석하고 표준 업무용건축물을 중심으로 국내외 관련 연구사례를 분석하여 표준건축물의 정의 방법을 분류하고 체계화 하였다[13]. 정영선 외(2014)는 정부의 건물에너지 효율화 정책 시 활용될 수 있는 표준건축물 설정을 위해 비주거용 건축물 435개를 대상으로 분석하여, 표준건축물의 규모와 에너지 항목들의 대표 값들을 설정하였다[14]. 한국건설기술연구원(2016)은 건물부문의 국가 온실가스 감축잠재량 분석을 위한 DB를 구축하기 위해 건물 유형별 주요 에너지 영향인자를 정립하였으며, 건물에너지 시뮬레이션 부하 분석을 통해 표준건축물 에너지영향인자 DB를 구축하였다. 에너지경제연구원(2015)은 에너지효율 정책의 효과를 분석하기 위한 기초 통계자료를 생산하기 위한 건물의 세부적인 특성 및 활동자료를 조사하고 건축공학적인 시뮬레이션에 활용되는 자료의 연계를 통하여 주요 건물 업종의 용도별 에너지소비량을 추정하였다[15]. 즉, 기존 연구들은 표준건축물을 설정하고 건축물 에너지성능 강화 정책에 따른 건축물의 에너지성능 값과 소비량을 예측하는 연구를 중점에 두고 있는 반면에, 실질적으로 의사결정에 가장 큰 부분을 차지하는 건축물 에너지성능 강화에 따른 추가적인 비용 상승에 대한 연구가 부족한 실정이다.

3. 연구 방법론

3.1 연구 프로세스

본 연구의 프로세스는 Fig. 1과 같다.

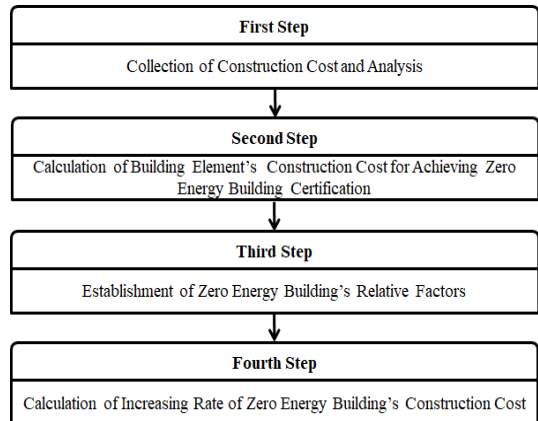


Fig. 1. Process of Study

본 연구에서는 건축물에너지효율등급 인증평가에 대한 업무가 온라인시스템으로 안착된 2016년 이후부터 최근 2018년 까지 건축물에너지효율등급과 제로에너지 건축물 인증사례를 바탕으로 분석한 결과 가장 높은 비중을 차지하고 있는 교육연구시설과 업무시설의 건축물 용도를 대상으로 진행하였으며, 공사비 수집대상은 건축물에너지효율등급과 제로에너지건축물 의무화 대상인 공공건축물을 대상으로 수집하였다. 수집된 공사비 세부내역을 분석하여, 베이스라인 건축물의 공사비를 산정하였다. 최종적으로 제로에너지건축물 사전 인증 조건인 건축물에너지효율등급 1++ 등급 평균성능에 동일한 표준편차를 단계적으로 상승 적용하여 제로에너지건축물 5, 3, 1등급으로 상향 시 증가되는 영향인자의 성능과 공사비를 도출하였다. 이 연구를 위한 과정을 요약하면, 총 4단계로, 1단계는 공사비 자료 수집 및 분석, 2단계는 인증수준 달성을 위한 건축요소별 공사비 산출, 3단계는 베이스라인 건축물 공사비 산출, 4단계는 제로에너지건축물 공사비 증가분 도출 순으로 진행하였다.

3.2 공사비 내역서 수집 및 분석

3.2.1 공사비 자료 수집

제로에너지건축물 공사비 상승요인을 분석하기 위하여 2010년부터 실시된 건축물에너지효율등급 인증제도 [부록 1 참조]에서 높은 인증등급을 취득한 건축물을 대상으로 4개 요인에 대한 공사비 자료 수집 기준을 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Criteria for Collection

No.	Category	Criteria	Reason
1	Year	2016 ~ 2018	Data Availability
2	Owner	Public	Ease of Collection
3	Type	High No	Enough Sample
4	Certification Level	Over 1+	Over rate from Obligation rate

건축물의 용도를 선정하기 위해 건축물 에너지효율등급(BEE : Building Energy Efficiency) 및 제로에너지 건축물 인증현황을 분석하였으며, 건축물 에너지효율등급은 건물 주용도가 30개로 구분되나 그 중에서 3개년도 인증건수 합계가 10개 미만인 용도는 기타로 분류하였다. 용도별 인증현황 분석결과 공사비 수집 주체가 불명확한 주거용 이외에서는 교육연구시설과 업무시설의 인증건수가 압도적으로 높았다[부록 2 참조].

인증건수 비중이 높은 교육연구시설과, 업무시설을 건물유형 기준으로 하여, 건축물 에너지효율등급 1+ 이상 취득한 공공 건축물을 대상으로 공사비를 수집하였다. 공사비 수집은 담당자 연락처 및 이메일 정보가 있는 359개의 공공건축물을 대상으로 하였으며, 최종적으로 공사비 세부내역을 획득한 건축물은 79개이다. 이 중 공사비 세부 내역서 분석 작업으로 활용할 수 없는 사례를 먼저 선별하여 분석대상에서 제외하였다. 공사비 세부 내역서 분석 작업에 활용할 수 없는 경우는 ① 파일 형식이 엑셀이 아닌 다른 형태로 되어 있는 경우이거나 ② 공종별 세부 내역서 항목이 일부 비어있는 경우를 기준으로 선별한 결과 교육연구 시설 13건, 업무 시설 9건을 분석 대상에서 제외하여 최종적으로 연구에 활용 가능한 공사비 세부내역서 57개를 도출하였다.

3.2.2 에너지관련 항목 공사비 비율 산출

최종 수집된 57개 건축물의 공사비 내역서를 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 전체 공사비의 공종은 크게 8개 부문으로 분류되며, 각 공사에 따라 건설 상황이나 여건이 다름에 따라 공종별 공사비가 투입되는 비율은 Table 2와 같이 달라 질 수 있다. 전체 건설 공사비에서 주된 공사비 투입 공종은 건축 부문으로 평균 55.5%의 비율을 차지하고 있으며, 그 다음으로 기계, 전기 부문이 13.8%, 12.0%의 비율을 차지하고 있다.

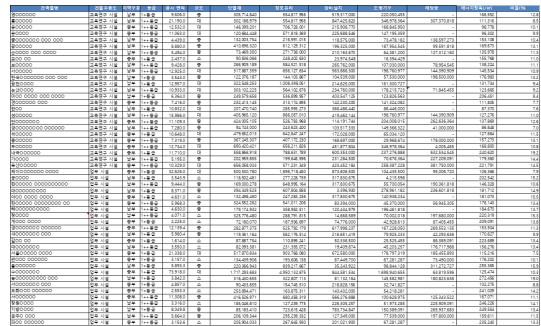


Fig. 2. Energy Category's Construction Cost Rate(Part of Result)

Table 2. Cost Rate of Each Construction Phase

Construction Phase	Cost Rate of Each Construction Phase(%)		
	Minimum	Maximum	Average
Architecture	36.5%	71.1%	55.5%
Civil Engineering	0.0%	19.9%	5.9%
Landscaping	0.0%	10.6%	2.2%
Machinery	2.5%	29.1%	13.8%
Electricity	6.0%	19.7%	12.0%
IT	0.0%	12.6%	5.3%
Fire Protection	0.0%	10.6%	2.5%
Others	0.0%	3.3%	0.6%

각 공종에서 에너지 항목을 차지하고 있는 공종은 건축, 기계, 전기 공종이며, 에너지항목을 세분화하기 위해 건축물 에너지성능평가와 관련된 연구 문헌조사를 하였다. 이 중 세부 에너지항목이 3개 이상 선택된 항목을 산출 대상으로 선정하였다[부록 3 참조]. 최종적으로 산출된 에너지 항목의 공사비 비율은 교육연구 시설 11.15%, 업무 시설 8.44%로 분석되었다.

4. 분석결과

4.1 베이스라인 건축물의 에너지성능 도출

베이스라인 건축물은 제로에너지건축물 구현 시 상승하는 에너지성능 및 공사비에 대한 상승 비율을 도출하기 위해 기준이 되는 건물로, 분석을 위한 기준 모델을 의미한다. 기준이 되는 베이스라인 건물에 대한 성능을 도출하기 전에, 일반 성능에 대한 기준을 정하기 위해 현재 일반적으로 건축물이 지어지고 있는 에너지성능에 대

한 수준을 검토하였다. 일반 수준 성능 검토 방법론은 ① 건축물 에너지효율등급인증 사례의 최빈 등급 분석을 통한 검토와 ② 법적 최소 성능 기준 분석을 통한 검토 2가지 방법으로 수행하였다. 건축물 에너지효율등급인증 사례의 최빈 등급을 검토하기 위해 등급별 인증 사례 건수를 분석한 결과 Table 3과 같이 1+++등급 94건, 1++등급 1,620건, 1+등급 1,789건, 1등급 692건, 2등급 44건, 3등급 3건으로 최빈 등급은 1+등급으로 나타났다.

Table 3. Status of Building Energy Efficiency Level

Level	2016	2017	2018	2019	Total	Weight
1+++	9	17	37	31	94	2.2%
1++	304	444	530	342	1,620	38.2%
1+	362	520	604	303	1,789	42.2%
1	187	205	220	80	692	16.3%
2	18	9	11	6	44	1.0%
3	0	1	2	0	3	0.1%
Total	880	1,196	1,404	762	4,242	100%

건축물 에너지효율등급인증 사례를 등급별로 분류하여 1등급, 1+등급, 1++등급 이상 인증 건수에 적용된 패시브 및 액티브 인자의 평균 성능을 산출하여 에너지절약설계기준 최소 성능과 비교한 결과는 Table 4와 같다. 1+++ 등급, 2등급 이하의 경우 그 사례가 부족하여 해당 등급은 분석에서 제외하였다. 결과적으로 등급별 평균 성능과 법적기준인 에너지절약설계기준 최소 성능[16]과 효율관리운영 기자재 기준[17]과 비교한 결과 1+ 등급의 평균 성능과 법적 기준의 오차가 가장 적었다.

Table 4. Comparison of Average Energy Performance Value between Building Energy Efficiency Level and Legal Standard

Category	BEE Level			Legal Standard		
	1++	1+	1	Minimum		
Passive Factor	Thermal Transmittance					
	Exterior wall (W/m ² ·K)	0.216	0.237	0.238	Central region	0.24
	Roof (W/m ² ·K)	0.134	0.139	0.133	Central region	0.15
	Floor (W/m ² ·K)	0.166	0.202	0.178	Central region	0.20
	Window (W/m ² ·K)	2.091	2.316	2.419	Central region	1.5
2.257		2.323	2.036	South Region	1.8	
Active Factor	Heating(COP)	3.84	3.84	3.44	3.52	
	Cooling(COP)	3.69	3.64	3.32	3.52	

Hot Water (Efficiency, %)	91.2	91.3	86.0	86.0	
Lighting Density (W/m ²)	5.7	6.3	5.8	20.0	
Error Rate on Legal Standard(%)	20.3	17.4	18.3	-	

건축물 에너지효율등급은 ISO 52016 등 국제규격에 따라 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기 등에 대해 종합적으로 평가하도록 제작된 프로그램(ECO2)으로 산출된 연간 단위면적당 1차 에너지소요량에 따라 인증등급을 구분한다 [부록 1 참조]. 건축물 에너지효율등급 인증사례에서 가장 높은 빈도수를 기록한 1+, 1++ 등급의 교육연구시설, 업무시설의 세부용도별 평균 성능을 적용하고 ECO2 프로그램을 통해 분석한 결과 1++ 등급의 평균 성능은 모두 1++ 등급으로 분석되었으며, 1+ 등급의 평균 성능은 소형, 대형 업무시설 만이 1+ 등급으로 분석되어 1+ 등급의 평균 성능은 1+ 결과를 대표하지 못하는 결과가 Table 5와 같이 나타났다.

Table 5. ECO2 Simulation Result for Average Energy Performance in Central Region

Type	ECO2 Result for 1++ Average Value	ECO2 Result for 1+ Average Value
University(U)	1++	1++
Research(R)	1++	1++
School(S)	1++	1++
Library(L)	1++	1++
Small Office(S.O)	1++	1+
Medidum Office(M.O)	1++	1++
Large Office(L.O)	1++	1+

최빈 등급인 1+ 등급을 대표할 수 있는 에너지 성능 값을 도출하기 위해 중부지역에서 1++ 등급을 받은 업무시설과, 교육연구시설의 모든 건축물들을 대상으로 각 에너지항목별 표준편차를 도출하였다[부록 4 참조]. 1++ 등급의 평균 에너지성능을 기준으로 도출된 표준편차 단위로 각 에너지항목의 성능을 단계별로 감소시켜 ECO2를 분석 결과 1+ 등급을 만족하는 에너지성능 값을 Table 6과 같이 가상으로 도출하였다.

Table 6. Range of Virtual 1+ Rating Energy Performance Value with adjusting standard error in Each Building Type

Category		Min	Max
Passive Factor	Exterior wall	Thermal Transmittance (W/m ² ·K)	0.364
	Roof		0.294
	Floor		0.373
	Window		2.838
Active Factor	Heating System	EHP(COP)	2.970
		GHP(COP)	1.490
	Cooling System	EHP(COP)	2.640
		GHP(COP)	1.320
	Hot Water	Efficiency(%)	82.6
	Lighting	Density(W/m ²)	9.41
	Ventilation	Heating Efficiency(%)	62.5
		Cooling Efficiency(%)	45.0

4.2 베이스라인 건축물의 에너지항목 공사비 산출

베이스라인 건축물의 에너지항목 공사비 산출을 위해 건축물 에너지효율등급 1+ 등급을 취득한 교육연구시설, 업무시설의 각 에너지항목에 적용된 기술 사례를 분석한 결과 Table 7과 같다.

Table 7. ECO2 Simulation Result for Average Energy Performance of 1+ Rating in Central Region

Type	Exterior Wall	Roof	Floor	Window
U	ESP ¹⁾ 2-2, 95mm	ESP 2-4, 145mm	ESP 2-2, 80mm	24(5LE+14AR +5CL)
R	ESP 2-2, 105mm	ESP 2-4, 165mm	ESP 2-2, 105mm	24(5LE+14AR +5CL)
S	ESP 2-2, 95mm	ESP 2-4, 145mm	ESP 2-2, 95mm	24(5LE+14AR +5CL)
L	ESP 2-2, 95mm	ESP 2-4, 155mm	ESP 2-2, 80mm	24(5LE+14AR +5CL)
S.O	XPS ²⁾ 1, 100mm	CC ³⁾ 2-3, 125mm	ESP 2-1 135mm	24(5LE+14AR +5CL)
M.O	XPS-1, 70mm	CC 2-3, 70mm	ESP 2-1, 80mm	24(5LE+14AR +5CL)
L.O	XPS-1, 75mm	CC 2-3, 110mm	ESP 2-1, 115mm	24(5LE+14AR +5CL)

- 1) Expanded Poly Styrene
- 2) eXtruded Poly Styrene
- 3) Closed Cell

먼저, 패시브 요소인 외벽, 지붕, 바다, 창호의 단열을 위해 가장 많이 적용된 공법과 각 건축물 유형별로 도출된 가상의 1+ 에너지성능 값에 부합하는 각 단열재의 두께를 도출한 결과 공통적으로 교육연구시설인 대학교, 연구시설, 초·중·고등학교, 도서관의 단열재는 모두 비드법 2중2호 공법을 적용하고 있으며, 업무시설에서는 압출법 1호를 적용하고 있으며, 단열재의 두께는 세부 건축물 유형별로 차이가 나타났다. 창호의 경우는 교육연구시설, 업무시설 모두 24mm 두께의 유리를 적용하고 있다. 액티브 요소의 온열설비 및 급탕설비는 주로 보일러, 전기보일러, 지역난방, EHP, GHP로 구분되며, 온열설비의 전기보일러 사례가 없고, 급탕은 GHP 사례가 없어서 분석에서 제외하였다. 또한, 냉열설비의 경우 EHP, GHP, 지역 냉방, 흡수식 냉동기(직화식), 흡수식 냉동기(외부연결) 5개 유형으로 구분되는데 분석 사례가 없는 지역 냉방과 흡수식 냉동기(외부연결)는 분석에서 제외하였다.

Table 8. The number of Maximum Capacity Applied in Building Energy Efficiency Rating Cases

Category		U	R	S	L	S.O	M.O	L.O
Heating System	Gas Boiler	2	6	-	3	1	8	8
	Distrcit Heating	3	2	-	5	5	18	15
	EHP	25	31	214	37	65	65	35
	GHP	33	27	226	32	43	31	3
Cooling System	EHP	23	28	139	30	51	57	43
	GHP	38	30	302	39	58	42	6
	Absorption Refrigeration	3	8	-	8	5	23	13
Hot Water	Gas Boiler	22	35	389	23	41	50	38
	Electric Boiler	31	25	50	47	67	45	4
	Distrcit Heating	3	3	-	6	5	23	18
	Heat Pump(E)	4	3	2	1	1	4	2

분석결과는 Table 8과 같으며, 난방기기 및 냉방기기에서 EHP와 GHP가 각각 최대 용량의 비중으로 적용 1, 2순위를 차지하였다. 업무 대형의 경우 흡수식 냉온수기가 냉방기기의 최대 용량 비중 2순위를 차지하였기 때문에 업무 대형은 GHP 대신 흡수식 냉온수기를 적용하였다. 급탕기기의 경우 용도별로 가스보일러와 전기보일러가 각각 차지하였으며, 전체 용도에 가스보일러를 적용하였다.

제로에너지건축물 인증사례를 분석한 결과는 Table 9와 같으며, 가장 많이 설치된 신재생에너지 설비는 ①

옥상 태양광, ② BIPV, ③ 지열, ④ 태양열, ⑤ 연료전지 순이다. 본 연구의 베이스라인 건축물 공사비 산출에 적용되는 신재생에너지 기술은 가장 많은 비중을 차지하고 있는 옥상 태양광 설비를 대표로 적용하였다.

Table 9. The number of New & Renewable Energy Installation in Zero Energy Building Certification Cases

Rooftop PV	BIPV	Solar Heat	Geothermal Heat	Fuel Cell
163	55	14	53	9

도출된 패시브 인자와 액티브 인자 및 신재생에너지설비 단가의 산출은 기획재정부에서 시행중인 '예정가격 작성 기준'의 재료비, 노무비, 경비로 구분하였으며, 이를 위해 먼저 한국건설기술연구원의 표준품셈을 활용하여 공사 종류별 필요한 재료 수량 및 노무량 등의 품셈을 산정하고, 여러 출처의 자재 단가 자료와 대한건설협회의 건설업 임금실태 조사보고서를 통해 베이스라인 건축물의 에너지항목 공사비를 산출하였다[부록 5 참조].

4.3 제로에너지 건축물 공사비 증가분 산출

베이스라인 건축물 일반 성능 영향인자를 도출한 방식과 동일하게 건축물 에너지효율 1++ 등급 평균 성능에 동일한 표준편차를 단계적으로 상승 적용하여 제로에너지건축물 5등급이 달성될 때까지 ECO2 분석을 실시하였으며, 각 영향인자가 단일적으로 건축물 에너지성능 결과에 미치는 영향도를 분석하기 위해 영향인자 마다 반복적인 시뮬레이션을 수행하여 기준 성능에서 해당 인자만 성능이 향상되었을 때 절감되는 에너지성능을 도출한 결과는 1순위는 조명, 2순위는 태양광, 3순위는 냉·난방 기기로 Table 10과 같이 나타났다.

Table 10. The Result of University Energy Performance Value for Zero Energy Building(ZEB) Level 5 in Central Region

Category		Baseline Building	ZEB Level 5	Saving (%)
Exterior wall	Thermal Transmittance (W/m ² ·K)	0.301	0.220	0.7%
Roof		0.225	0.125	0.6%
Floor		0.373	0.170	1.1%
Window		2.695	2.208	3.2%
Heating &	EHP(COP) (Heating/Cooling)	2.97/2.64	3.68/3.67	6.9%

Cooling System	GHP(COP) (Heating/Cooling)	1.52/1.32	1.62/1.37	
Hot Water	Efficiency(%)	82.60	91.13	1.4%
Lighting	Density(W/m ²)	7.52	5.11	10.5%
Ventilation	Heating Efficiency(%) (Heating/Cooling)	0.626/0.444	0.708/0.528	-
Solar Power	Capacity (kW)	68.08	119.19	7.3%

제로에너지건축물 5등급의 성능을 위해 요구되는 적용기술들의 공사비를 산출은 3.2.2 베이스라인 건축물 공사비 산출과 동일한 방법을 적용하였으며, 베이스라인 건축물 대비 제로에너지건축물의 적용기술과 공사비를 분석한 결과는 Table 11과 같으며, 냉난방 설비, 조명, 외벽 단열재, 창호 순으로 공사비가 증가분이 낮았다.

Table 11. The Comparison Result of Applied Technology (A·T) and Construction Cost(C·C) Between Baseline and Zero Energy Building(ZEB) Level 5 for University in Central Region

Category	Baseline Building		ZEB Level 5		C·C Difference (10 ³ won)
	A·T	C·C (10 ³ won)	A·T	C·C (10 ³ won)	
Exterior wall	ESP2-2, 95mm	67,158	ESP2-2, 135mm	83,302	16,144 (24.0%)
Roof	ESP2-4, 145mm	28,846	ESP2-4, 265mm	43,795	14,949 (51.8%)
Floor	ESP2-2, 80mm	17,086	ESP2-2, 180mm	35,054	17,968 (105.2%)
Window	24mm, Pair Glass	225,130	24mm, Single Low-e Pair Glass	279,807	54,677 (24.3%)
Heating & Cooling System	EHP, GHP (Normal Efficiency)	398,347	EHP, GHP (High Efficiency)	434,400	36,053 (9.1%)
Hot Water	Normal Efficiency	10,737	High Efficiency	32,795	22,058 (205.4%)
Lighting	FL 32W*2	186,052	LED 50W	227,428	41,375 (22.2%)
Ventilation	Normal Efficiency	5,635	High Efficiency	15,289	9,654 (171.3%)
Solar Power	70kW	175,040	120kW	281,419	106,379 (60.5%)

4. 결론 및 제언

본 연구는 최근 3년 이내 건축물 에너지효율등급 1++ 이상 또는 제로에너지건축물 인증을 가장 많이 받은 교육 연구시설과 업무 시설을 건축한 공공기관을 대상으로 공사비 세부 내역서를 수집한 결과 최종 57개의 활용할 수 있는 공사비 세부 내역서를 도출하였다. 수집된 공사비 세부 내역서를 바탕으로 에너지항목이 일부 포함되어 있는 공종의 공사비 투입 비율을 분석한 결과 건축 부문 평균 55%, 기계 부문 평균 13.8%, 전기 부문 평균 12.0%의 총 공사비 대비 비율을 차지하고 있는 것을 확인하였다. 에너지항목과 관련된 필수 요소를 도출하기 위하여 기존 연구문헌을 조사하였으며, 각 연구문헌에서 3가지 이상 선택된 필수 요소들을 적용 기준으로 선정하였다. 그 결과 건축 공종에는 외벽, 지붕, 바닥 단열재와, 창호를 적용 기준으로 하였으며, 기계 공종에는 난방, 냉방, 급탕, 환기 시스템을 적용 기준으로 선정하였다. 마지막으로 전기 공종에는 조명, 신재생에너지 설비를 적용 기준으로 선정하였다. 수집된 공사비 세부 내역서에 선정된 적용 기준들을 반영하여, 전체 공사비 대비 에너지 항목의 공사비 비율을 분석한 결과 교육연구 시설은 11.15%, 업무 시설은 8.44% 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

제로에너지 건축물과 비교할 수 있는 베이스라인 건축물의 에너지성능 및 공사비를 도출하기 위해 건축물 에너지효율등급의 등급별 인증건수를 분석하였으며, 최빈 등급은 1+ 등급 1,789건, 1++ 등급 1,620건 순으로 나타났다. 1++와 1+ 등급 건축물들의 각 에너지항목의 평균성능 값을 도출하여 현재 법적기준과 비교한 결과 1+ 등급의 평균성능과 법적기준의 오차가 가장 작게 나타난 것을 확인하였다. 베이스라인 건축물 에너지 항목들의 평균성능 값의 최종적인 타당성을 확보하기 위해 건축물 에너지효율등급 평가에 활용되는 ECO2 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 1+ 등급의 평균성능 값은 소형, 대형 업무시설 이외 모든 시설에서 1++ 등급으로 분석되었다. 반면에, 1++ 등급의 평균성능 값은 모든 시설에서 1++ 등급으로 분석되었다. 즉, 1+ 등급의 평균성능 값은 그 대표성을 갖지 못하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 보완 하기 위해 1++ 등급의 각 에너지항목별 표준편차를 산출하여, ECO2 분석 결과 1+ 등급이 나올 때 까지 1++ 등급의 평균성능 값에서 표준편차 단위로 에너지성능 값을 감소시켜, 가상의 1+ 등급 에너지성능 값을 도출하였다. 제로에너지건축물의 대표 에너지성능 값도 마

찬가지로 1++ 등급의 표준편차를 활용하여 각 에너지항목별 평균성능 값에서 표준편차 단위로 에너지성능을 증가시켜 제로에너지건축물 5등급 기준인 에너지자립률 20%를 달성할 때까지 ECO2 분석을 실시하여, 가상의 제로에너지건축물 5등급 에너지성능 값을 도출하였다.

도출된 베이스라인 건축물과 제로에너지건축물의 각 에너지항목별 성능 값을 충족하면서, 가장 많이 적용된 공법과 사양을 도출하여, 부록 2에 수록된 가격정보를 바탕으로 베이스라인 건축물과 5등급 제로에너지건축물의 공사비를 산출하였다. 또한, 제로에너지건축물의 에너지항목별 에너지절감 기여도를 분석하기 위해 베이스라인 건축물의 개별 에너지항목에 제로에너지 건축물의 에너지성능 값을 적용하여 반복적인 ECO2 분석을 실시하였다. 결론적으로 에너지절감 측면에서는 조명설비, 옥상태양광 순으로 가장 높은 기여를 하는 것으로 나타났으며, 공사비 증가 측면에서는 냉·난방시스템, 조명설비의 공사비가 가장 적게 증가하는 것으로 Table 12와 같이 분석되었다.

Table 12. Main Implication to construct ZEB

Category	Saving(%)	C·C Difference (10 ⁶ won)
Exterior wall	0.7%	24.0%
Roof	0.6%	51.8%
Floor	1.1%	105.2%
Window	3.2%	24.3%
Heating & Cooling System	6.9%	9.1%
Hot Water	1.4%	205.4%
Lighting	10.5%	22.2%
Ventilation	-	171.3%
Solar Power	7.3%	60.5%

현재, 본인증을 취득한 제로에너지건축물은 16개에 불과하며, 제로에너지건축물 의무 대상 또는 제로에너지 건축물을 구현하고자 하는 이해관계자가 접근할 수 있는 정보는 제한적이다. 이 논문은 그 동안 축적된 건축물 에너지효율등급의 데이터를 바탕으로 제로에너지 건축물 인증을 취득하기 위한 에너지절감 요인별 기여도를 파악하고, 공사비 상승분을 도출하여 제시하여, 다양한 이해관계자들이 정책·기술·경제적 측면의 의사결정과 추가적인 연구에 활발히 도움을 줄 수 있을 것이다. 이러한 기여점에도 불구하고 본 연구는 제로에너지건축물의 준공 사례 부족으로 실제 제로에너지건축물의 공사비 내역서

를 활용하지 못하여, 많은 가상의 값을 적용한 것이 한계라 할 수 있다. 2020년 공공부문 제로에너지건축물 의무화 시행으로 2021년부터는 본격적으로 많은 제로에너지건축물이 준공될 것으로 예측된다. 향후 연구에서는 실제 준공된 제로에너지건축물의 공사비 내역서를 바탕으로 건축물의 용도를 확대하여 조금 더 현실에 가까운 제로에너지건축물 공사비 증가분을 분석할 예정이며, 이러한 추후연구를 통해 제로에너지건축물 활성화 전략을 용이하게 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

부 록 1

건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준(국토교통부고시 제2018-675호, 산업통상자원부고시 제2018-209호)

별표 2 건축물 에너지효율 인증 등급

등급	주거용 건축물	주거용 이외의 건축물
	연간 단위면적당 1차에너지소요량 (kWh/m ² ·년)	연간 단위면적당 1차에너지소요량 (kWh/m ² ·년)
1+++	60 미만	80 미만
1++	60 이상 90 미만	80 이상 140 미만
1+	90 이상 120 미만	140 이상 200 미만
1	120 이상 150 미만	200 이상 260 미만
2	150 이상 190 미만	260 이상 320 미만
3	190 이상 230 미만	320 이상 380 미만
4	230 이상 270 미만	380 이상 450 미만
5	270 이상 320 미만	450 이상 520 미만
6	320 이상 370 미만	520 이상 610 미만
7	370 이상 420 미만	610 이상 700 미만

※ 주거용 건축물 : 단독주택 및 공동주택(기숙사 제외)
 ※ 비주거용 건축물 : 주거용 건축물을 제외한 건축물
 ※ 등의 등급을 받은 건축물의 인증은 등외로 표기한다.
 ※ 등급산정의 기준이 되는 1차에너지소요량은 용도 등에 따른 보정계수를 반영한 결과이다.

별표 2의2 제로에너지건축물 인증 등급

Building Energy Efficiency Level	Energy Independent Rate*	ZEB Level
1++등급* 이상 (최고1+++ ~ 최저7등급)	100% 이상	1등급
	80 이상 ~ 100% 미만	2등급
	60 이상 ~ 80% 미만	3등급
*최저 7등급 대비 80% 절감	40 이상 ~ 60% 미만	4등급
	20 이상 ~ 40% 미만	5등급

부 록 2

2016년 ~ 2018년 건축물 에너지효율 및 제로에너지건축물 인증 현황

Building Type	BEE				ZEB			
	'16	'17	'18	Sum	'16	'17	'18	Sum
Apartment	468	681	2,001	3,150	-	1	1	2
House	5	362	177	544	-	3	-	3
Rental Housing	-	-	498	498	-	-	-	-
Factory	19	30	50	99	-	-	-	-
Education & Research	333	440	453	1,226	-	2	17	19
Correction & Military	22	41	33	96	-	-	-	-
Care Center	24	29	34	87	-	-	-	-
Culture & Assembly	36	49	60	145	-	-	1	1
Accommodation	40	28	49	117	-	-	-	-
Office	287	398	473	1,158	-	2	11	13
Sports	29	42	47	118	-	-	-	-
Neighborhood living 1	23	34	69	126	-	-	1	1
Neighborhood living 1	13	23	46	82	-	1	2	3
Others	54	82	90	226	-	1	-	1
Total	1,353	2,239	4,080	11,589	-	10	33	43

부 록 3

건축물 에너지성능 관련 에너지항목 도출을 위한 기존 연구 현황

Category of Energy Performance	Kim & Seo (2017)	Jung et al. (2014)	KICT (2016)	KEEI (2016)	Selection Category	
Architecture	Exterior Wall	○	○	○	○	Exterior Insulation
	Roof	○	○	○	○	Roof Insulation
	Floor	○	-	○	○	Floor Insulation
	Window & Glass	○	○	○	○	Window & Glass
	Infiltration rate	-	○	○	-	-
Machinery	Heating	○	○	-	○	Heating System
	Cooling	-	○	○	○	Cooling System
	Hot water	○	○	-	○	Hot water System
	Ventilation	○	○	-	○	Ventilation System
Electricity	Light	○	○	-	○	Lighting Equipment
	Renewable	○	○	-	○	Renewable System

부 록 4

중부지역 건축물 에너지효율 등급 1++ 의 에너지항목별 표 준편차

Category		U	R	S	L	S.O	M.O	L.O
Exterior wall	Thermal	0.045	0.036	0.027	0.080	0.101	0.102	0.083
	Transmittance	0.055	0.046	0.025	0.048	0.056	0.078	0.056
Floor	(W/m ² ·K)	0.137	0.082	0.044	0.326	0.083	0.098	0.067
Window		0.271	0.276	0.336	0.373	0.475	0.390	0.361
Heating System	EHP (COP)	0.394	0.512	0.396	0.511	0.371	0.399	0.415
	GHP (COP)	0.058	0.078	0.057	0.051	0.045	0.066	0.048
Cooling System	EHP (COP)	0.619	0.665	0.529	0.769	0.534	0.621	0.527
	GHP (COP)	0.049	0.083	0.061	0.074	0.055	0.059	0.046
Hot Water	Efficiency (%)	4.898	4.235	4.629	4.857	4.546	4.362	4.867
Lighting	Density (W/m ²)	1.335	1.515	0.879	1.298	1.388	1.337	1.696
Ventilation	Heating Efficiency (%)	0.046	0.051	0.033	0.036	0.041	0.036	0.042
	Cooling Efficiency (%)	0.058	0.059	0.045	0.050	0.055	0.059	0.063

부 록 5

공사비 단가 산출을 위한 참고문헌 현황

Category	Reference Document
Passive Factor	Classification 기획재정부, "예정가격 작성 기준"[18]
	The Number of Material & Labor 한국건설기술연구원, 2019 건설공사 표준품셈[19]
	Price of Material 나라장터 종합쇼핑몰[20], 한국물가정보[21], 친환경건설 자재정보[22], 유통물가 정보[23]
	Price of Labor 대한건설협회, 2019 하반기 건설업 임금실태 조사보고서[24]
Active Factor	Heating & Cooling System 나라장터 종합쇼핑몰[20], 한국물가정보[21]
	Hot Water 한국물가정보[21]
	Lighting 한국물가정보[21]
	Ventilation 한국물가정보[21]
	Price of Labor 대한건설협회, 2019 하반기 건설업 임금실태 조사보고서[24]
Renewable	Solar Power 나라장터 종합쇼핑몰[20]

References

- [1] M. Fishedick, J. Roy, A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J.M. Allwood, J.-P. Ceron et al., "Industry, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", pp. 739-810, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.016>
- [2] International Energy Agency, Meeting climate change goals through energy efficiency, pp. 2, International Energy Agency, 2017.
- [3] International Energy Agency, World energy balances, pp. 12-18, International Energy Agency, 2019.
DOI : <https://doi.org/10.1787/enestats-data-en>
- [4] Joint Association of related Ministries, 1st Basic Plan for Response to Climate Change, Korean Government, December 2016.
- [5] Joint Association of related Ministries, Basic Roadmap Revision for 2030 Target Achievement of National Greenhouse Gas Reduction, Korean Government, 2th July 2018.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The Strategy for Zero Energy Building Diffusion, Korean Government, June 2019.
- [7] Korea Energy Agency, Zero Energy Building Certification System, <https://zeb.energy.or.kr>
- [8] J. H. Kim, Analysis of Design Parameters of Zero Energy Building and Its Application, Ph.D dissertation, Ajou University, pp. 17~22, 2019
- [9] Korea Energy Agency, Zero Energy Building Construction and Economic Feasibility Guideline, 2018.
- [10] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, D. Crawley, "Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition", 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, vol 3, pp.275-286, 2006
- [11] European Commission, Directive 2010/31/EU of European Parliament of and of the Council of the 19 May 2010 on the energy performance of buildings, European Commission, 18th June 2010.
- [12] Green Buildings Construction Support Act, Article 2, Korean Law Information Center, 14th August 2018.
- [13] H. J. Kim, D. H. Seo, A Review on the Definition Methods of Prototypical Office Building for Energy Analysis, Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, vol. 34, no. 3, pp. 103-111, March 2018.
DOI : http://dx.doi.org/10.5659/JAIK_SC.2018.34.3.103
- [14] Y. S. Jeong, H. K. Jung, H. K. Jang, K. H. Yu, A Study on the Reference Building based on the Building Design Trends for Non-residential Buildings, Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 34, no. 3, pp.

1-11, June 2014.

DOI : <http://dx.doi.org/10.7836/kses.2014.34.3.001>

- [15] D. Y. Choi, A Study on the Permanent Sample Survey of Building Energy Consumption(2th year), KEEI Basic Study Report, pp. 15-22, December 2015.
- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notification 2017-881, Building Energy Code Standard, Supplementary table 1, Korean Government, 28th December 2017.
- [17] Ministry of Industry, Trade and Energy Notification 2019-175, Regulation for Operation of Equipment and Materials for Energy Efficiency Management, Supplementary table 1, 2019. 10. 30.
- [18] Ministry of Strategy and Finance, Contract Specifications 464, Scheduled Price Preparation Standard, Korean Government, 18 December 2019.
- [19] Korea Institute of Construction Technology, 2019 Standard Item Calculation for Construction Work, Korea Institute of Construction Technology, pp.775-858, 1th January 2019.
- [20] National Marketplace General Shopping Mall, Public Procurement Service, <https://shopping.g2b.go.kr>
- [21] Korea Price Information Corporation, General Price Information, Vol 1. pp.763-866, Vol 2, pp.3-266, December 2019.
- [22] Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2019 Eco-Friendly Construction Material Information, pp.154-240, 2019
- [23] Korea Institute of Applied Statistics, 2019 Distribution Price, <https://koris.or.kr>
- [24] Construction Association of Korea, Wage Survey Report for Construction in the Second Half of 2019, pp.12-16, 2019

이 성 주(Sungjoo Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 산업공학과 (공학사)
- 2007년 8월 : 서울대학교 일반대학원 산업공학과 (공학박사)
- 2008년 1월 ~ 2008년 12월 : 영국 캠브리지대 방문연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 산업공과 교수

<관심분야>

기술로드맵, 전략기획, 에너지기술정책

심 흥 석(Hong-Souk Shim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 아주대학교 생명분자공학부 응용화학전공 (공학사)
- 2010년 2월 : 아주대학교 일반대학원 에너지학과 (경제학석사)
- 2017년 2월 : 아주대학교 일반대학원 산업공학과 (박사수료)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 한국에너지공단 과장

<관심분야>

에너지, 4차산업