



오피스 빌딩의 보이드 공간 유형에 따른 냉난방 EUI 최적화 - 중, 대규모 오피스 빌딩을 중심으로 -

Optimization of Heating and Cooling EUI Based on Void Space Types in Office Buildings - Focusing on Medium and Large Office Buildings -

정지수* · 오준걸**
Ji-Su Jung* · Joon-Gul Oh**

* Graduate Student, School of Architecture, Seoul National Univ. of Science and Technology, South Korea (jw1095@seoultech.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, School of Architecture, Seoul National Univ. of Science and Technology, South Korea (jgoh@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Energy-related regulations are expanding both at home and abroad as interest and importance in carbon neutrality increase around the world. In Korea, various certification systems are mainly regulated by public buildings, and various systems and measures are also being implemented in office buildings to save energy. Although there is no regulation on private buildings yet, it is possible to expand in the future, so consideration should be given to the design or composition for energy conservation among the design elements. **Method:** In this paper, among the elements that make up a building, there are elements that can be used as a resting space inside a building, such as atrium, void, balcony, or as a part of a dedicated space, and when these spaces are properly used, they can help with lighting and ventilation, which has the effect of reducing the operating energy of the building. **Result:** Accordingly, by observing the area ratio, shape, and location of the void space in the building, analyzing the difference, and deriving an optimal model, we would like to present guidelines for the shape and arrangement of the void space when designing a building. The study produced an algorithm using Rhino's Grasshopper to create a semi-automation simulation and conducted eui analysis according to various variables.

KEYWORD

오피스 빌딩
보이드
냉난방 EUI
그래스호퍼

Office Building
Void
Building Cooling Heating EUI
Grasshopper

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 16, 2025
Final revision received Nov. 27, 2025
Accepted Dec. 3, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

탄소 중립을 위해 세계적으로 에너지 절약에 대한 관심이 높아지고 있으며, ZEB 인증, 에너지 절약 계획서 등 국내에서도 다양한 현황을 살펴볼 수 있다. 그에 따라 국내외에서 건축물의 내외부 요소인 용도별 실 배치, 코어 위치, 아트리움 형태, 외피 형상, 주변 환경에 따른 에너지의 성능을 분석한 연구가 진행된 바 있다. 그중에서도 최근 공간의 개방성과 연결성을 강화하며, 채광 및 환기 등 환경적 요소를 개선하기 위해 보이드 및 아트리움 공간을 많이 사용하고 있으나, 아트리움에 비해 보이드 공간의 위치 및 형태에 따른 냉난방 에너지에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 오피스 빌딩의 내부 구성 요소 중 보이드 공간의 형태 및 위치 유형에 따른 냉난방 에너지를 분석하여 최적 유형을 찾는 것이다. 이를 통해 다양한 보이드 유형의 냉난방 성능 차이를 정량적으로 비교·평가하고, 에너지 절약 효과를 명확히 도출하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

분석 대상 건물의 규모는 미국 에너지부(Department of Energy,

DOE)에서 제시하는 오피스 빌딩의 표준 규모를 참고하여 규모를 설정하며, 평면을 기준으로 그리드를 설정하여 보이드 공간의 형태 및 위치 변화에 따른 건축물의 EUI를 계산한다[1]. 본 연구에서 EUI (End Use Intensity) 단위를 사용함은 시뮬레이션으로 계산한 최종 에너지 지표가 EUI임을 반영하기 위함이다. EUI는 End Use Intensity로, 용도별 에너지 사용량을 면적으로 나눈 값이며, 냉방, 난방, 조명 등 개별 용도별로 분리된다. EnergyStar는 미국 환경보호청 (Environmental Protection Agency, EPA)이 운영하는 에너지 효율 인증 프로그램으로, EUI를 Energy Use Intensity로 표기한다[2]. 이는 건물의 연간 총 에너지 소비량을 건물의 규모에 대비한 값으로 나타낸다. Rhino Grasshopper의 에너지 계산 플러그인인 Honeybee에서는 이를 Total End Use Intensity로 표기하며, EnergyStar의 정의와 동일하다[3]. EUI는 건축물의 에너지 소비를 면적 단위로 정규화한 값으로, 다양한 변수에 대한 시뮬레이션 결과를 직관적으로 평가하고 비교할 수 있는 지표로 활용된다. 따라서 본 논문에서는 End Use Intensity를 기준으로 에너지 도출 단위(kWh/m²)로 사용한다.

건축물의 모델링과 냉난방 에너지 분석 과정에 사용한 프로그램의 기능 및 상세버전은 Table 1.과 같다. Rhino Grasshopper의 플러그인 툴인 Honeybee와 Ladybug를 사용하여 건물 에너지 모델링 및 시뮬레이션으로 건축물의 냉난방 EUI를 계산한다. 또한 동일한 유형 내 위치 변화에 대한 시뮬레이션을 일괄적으로 수행하기 위해 Colibri를 사용한다.

Table 1. Program function and version

Function	Program	Version
Modeling	Rhino	7.38.24338.17001
Algorithm	Grasshopper	1.0.0007
Environment analysis	Ladybug	1.8.0
Energy modeling	Honeybee	1.8.0
Batch simulation	Colibri	2.0.0

Table 2. Analysis void definition

Author	Analysis void definition
S.S. Moon (2016)	A void, as a counterpart to solid, is a core spatial element formed by removing floor areas to enable visual continuity and vertical circulation between levels.
H.S Seo (2023)	In architecture, a void is a purposeful unoccupied space between structural elements, functioning as a connector of interior spaces and a medium for orientation, circulation, and environmental enhancement.
D.Y. Kong et al. (2024)	A void space is a purposeful empty form linking unprogrammed and adjacent areas, functioning flexibly to enhance spatial relationships internally and externally.

2. 보이드의 기본 개념과 이론 고찰

2.1. 보이드의 개념 및 역할

서희선(2023)은 보이드의 사전적 정의를 빈 공간, 공허이며, 이를 건축물에 적용하면 벽, 바닥, 천장과 같은 표면 사이 비워진 공간으로 한다. 또한 오피스 빌딩은 20세기 중 후반에서 현대로 넘어오며 공간의 기능이 개인 혹은 팀 업무의 방식과 칸으로 구획된 공간에서 오픈 형식으로 변화하고 있으며, 적절한 보이드 공간의 설계로 더 입체적인 공간을 만들어 유동적이고 복합적인 기능을 가질 수 있다 [4]. 기존 논문으로 해석한 보이드의 의미는 Table 2.와 같다[5,6].

이에 따라 본 연구에서는 오피스 빌딩의 구성 요소 중 보이드 공간을 단순한 빈 공간 이상의 복합적인 의미를 가지는 공간으로 해석하여, 보이드 공간의 비율과 위치에 따라 건축물 EUI의 변화에 대한 분석을 진행한다.

2.2. 보이드 유형 설정을 위한 이론 고찰

보이드 유형에 따른 냉난방 EUI 분석을 위한 오피스 빌딩에서 변수 요소 중 하나인 보이드 면적 비율을 우선 설정한다. 기존 진행된 논문에서 사용한 보이드 및 아트리움 공간의 면적 비율을 참고하였으며, 상세한 비율은 Table 3.과 같다.

C.O.Iroham (2022)은 보이드 공간의 평균 면적을 12%로 산출하였으며, 공도영(2024)는 건축물 내 보이드 공간 및 아트리움 공간 설계 시 적용 가능한 보이드 비율은 국내 테헤란로의 오피스 빌딩을 기준으로 최소 0.35%, 최대 48.04%로, 해외를 기준으로 최소 6.3%에서 최대 75.6%로 검토하였다[6,7]. A. Momenaei (2025)는 5%에서 20%까지 5%씩 늘려가며 발코니 형태를 디자인하였다. 보이드 면적의 다양한 범위 내에서 보이드 공간의 실 용도에 따른 면적 비율과 국내 오피스 빌딩 내 보이드 공간 계획에 규모적 현실성을 고려하여 보이드 공간의 면적 비율은 5%, 10%, 15%, 20%로 설정하였다[8].

Table 3. Void Area Ratio

Author (s)	Year	Category	Area ratio
C.O. Iroham et al.	2022	Void	12%
D.Y. Kong et al.	2024	Void	0.35%~75.6%
J.K. Choi et al.	2025	Atrium	25%
A. Momenaei et al.	2025	Balcony	5%, 10%, 15%, 20%

Table 4. Void typology

Author (s) (year)	Horizon					Vertical			
	Center	Intrusive	Corner	Penetrate	Side	Lower	Upper	Middle	Vertical
A.B. Spaeth et al. (2017)	●	●	●	●	●				
DE. Kang et al. (2023)	●	●	●	●	●				●
H.S Seo (2023)	●	●	●	●	●	●	●	●	●
E.S. Pyo (2024)	●	●	●	●	●	●	●	●	●
J.K. Choi et al. (2025)	●	●	●	●	●				●

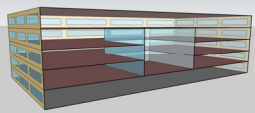
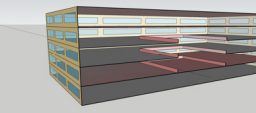
다음은 보이드 유형의 위치에 따른 분류로 수평과 수직적 배치 유형으로 나눌 수 있으며, 이에 따른 상세한 유형 구분은 다음 Table 4.와 같다[9,11,12]. 강다은 외(2023)는 아트리움 공간을 내포형, 전면형, 코너형, 사이 공간형, 측면형의 5가지의 수평적 요소와 정형, 돌출형, 굴곡형, 곡선형의 4가지 수직적 요소로 구분하였으며[10], 서희선(2023)은 내포형, 내부 관입형, 외부 관입형, 내부 관통형, 외부 관통형, 포위형, 반포 위형의 7가지 수평 배치 유형과 하부형, 중부형, 상부형, 관통형의 4가지 수직 배치 유형으로 구분하였다[4]. 본 연구에서는 각 건물 내 배치 가능한 보이드 유형을 모두 고려하며, 이에 따라 상세한 유형은 수평적 요소의 내포형, 내부 및 외부 관입형, 내부 관통 통로형, 외부 관통형, 수직적 요소에서는 하부형, 중부형, 상부형, 관통형으로 설정한다.

최종적으로 고려할 요소는 보이드의 경계 요소이다. 보이드 공간의 경우 인접 공간과의 경계를 대체적으로 Glazing Wall 또는 Open Wall을 사용하며 두 유형의 상세한 이미지와 유형에 따른 기능의 분류는 다음 Table 5.와 같다[13~16].

Glazing Wall은 보이드와 실내를 유리벽으로 분리해 공기·열 교환을 최소화하여 외기 변화의 영향을 감소시킨다. 반면 Open Wall은 난간으로만 구분되어 공기·열 교환이 자유로워 냉난방 부하 증가가 발생할 수 있다. 이러한 구조적 차이는 건물 에너지에 직접적인 영향을 주므로 설계·에너지 모델링 시 별도로 고려해야 한다.

복합상업시설은 공간 개방성과 수직 동선 보안을 위해 저층부에 Open Wall 형태의 오픈 공간을 계획하는 경우가 많다. 그러나 오피스 빌딩은 업무공간 중심으로 구획이 중요해 상대적으로 폐쇄형 공간 비중이 높다. 본 연구에서는 공용 보이드뿐만 아니라 업무 공간의 에너지 효율성을 고려해야 하므로 시각적 개방성을 유지하면서도 음향·공기 조절이 가능한 Glazing Wall을 경계로 설정한다. 시뮬레이션에서 설정한 Glazing Wall은 보이드 공간을 전체적으로 덮고있

Table 5. Glazing wall and open wall

	Glazing wall	Open wall
		
Specific	Glazing wall	Open wall
Visual permeability	●	●
Acoustic insulation	●	X
Air flow	X	●
Degree of enclosure	●	X
Space Function	Informal gathering, office, meeting room, etc	Informal gathering
Author (s) (year)	Glazing wall	Open wall
A.B. Spaeth et al. (2017)	●	
K.E. Kim et al. (2021)		●
S.H Kim (2022)		●
N. Che. Din et al. (2022)	●	
H. El Samaty (2023)	●	
J.K. Choi et al. (2025)	●	

는 유리벽 형태로 구성하여 별도의 공조 존으로 설정하며, 사용된 유리의 종류는 HB 프로그램에 내장된 Constructions 중 Simple Glazing Skylight U-Value 1.8, SHGC 0.77인 유리를 사용한다.

3. 기본 모델 작성 및 알고리즘 구성

3.1. 시뮬레이션을 위한 기본 모델 작성

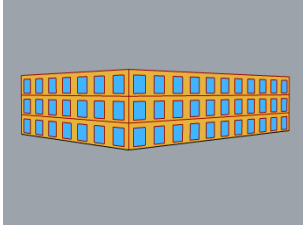
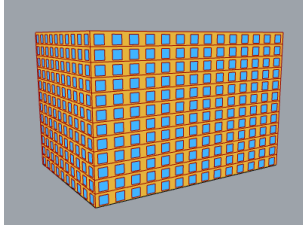
기본모델 작성을 위한 상세한 표준 유형은 미국 에너지부(U.S. Department of Energy, DOE)와 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 제공한 Commercial Reference Building Models of the National Building Stock (2011)에서 제시하는 오피스 빌딩의 표준 규모(p.19)를 참고하여 시뮬레이션 대상 건축물의 규모를 지정한다[17]. Table 6.에 제시된 오피스 빌딩의 규모별 분류를 바탕으로 하여 보이드 공간 유형 배치 시뮬레이션에 사용할 기본 모델을 설정한다. 보이드 공간의 정의 상 2개 층 이상 바닥 또는 천장이 비어있으며 연결되어야 하므로 표준 유형 중 소규모 오피스는 설정 층수가 1개 층임에 시뮬레이션 모델에서 제외하여, 중규모와 대규모 오피스 두 유형만을 대상으로 한다.

Table 7.은 분석 대상 건축물의 베이스 모델 정보와 Rhino 및 Grasshopper 프로그램을 사용하여 분석 대상 오피스 빌딩을 모델링 하여 3D로 나타낸 것이다. 영국 강구조 협회(BCSA)와 Tata Steel에서 운영하는 SteelConstruction.info의 설계 가이드(Concept design, n.d.)에 따르면, 오피스 빌딩 구조 설계 시 기둥 간격은 5.4m에서 7m 사이로 제안된다[18]. 국내의 일반적 건축 계획에 따르면 구조별 일반적인 기둥 간격은 철근콘크리트 구조의 경우 5m~6m로 철골철근콘크리트구조의 경우 6m~7m를 기준으로 한다. 따라서 본 연구에서는 해당 내용을 참고하여 기둥 간격을 6m로 설정하여 보이드를 위치시킬 그리드 간격 역시 가로·세로 6m의 간격을 적용한다.

Table 6. DOE office building form assignments

Building type	Floor area	Aspect ratio	No. of floors	Floor to floor height
Small office	511 (m ²)	1.5	1	3.05 (m)
Medium office	53,628 (m ²)	1.5	3	3.96 (m)
Large office	46,320 (m ²)	1.5	12	3.96 (m)

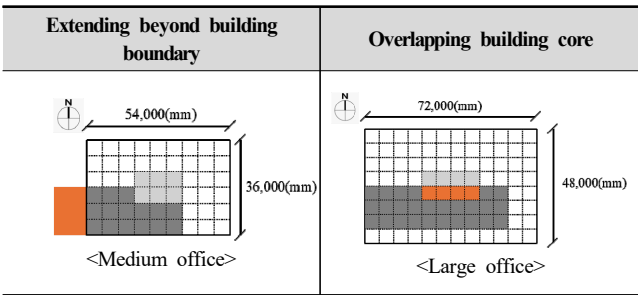
Table 7. Base model

Building type	Office	Aspect ratio	1:1.5
Location	Seoul	Core	Center core
Wall U-value	0.24W/m ² ·K	Roof U-value	0.15W/m ² ·K
Floor U-value	0.15W/m ² ·K	Window U-value	1.5W/m ² ·K
Floor to floor height	4m	Void ratio (%)	5, 10, 15, 20
EPW	Kor_so_Natl.Museum.of.Korea 471105_TMYx		
Medium office modeling		Large office modeling	
			
Floor area	1,944m ²	Floor area	3,456m ²
WWR (%)	33	WWR (%)	38
No. of floor	3F	No. of floor	12F
Total floor area	5,832m ²	Total floor area	41,472m ²

그에 따라 각 건물의 장단변 길이 또한 6m의 정수 배로 하며 DOE 표준 유형 조건을 만족하기 위해, 중규모 오피스는 장변 54m, 단변 36m로 그리드 공간 9×6으로, 대규모 오피스는 장변 72m, 단변 48m로 그리드 공간 12×8로 설정한다. 또한 기본 모델에서 열관류율은 건축물의 에너지 절약 설계기준의 중부 2지역 기준을 따라, 기상 데이터는 서울로 설정하며, 1개 층 층고는 4m이다. 모든 모델은 분석의 일관성 확보를 위해 동일한 구조 및 외피 성능 조건을 기반으로 설정하며, 보이드 위치 및 형태 변경에 따른 영향을 정량적으로 비교할 수 있도록 한다.

중규모 오피스 빌딩에서는 중심 코어와 편심 코어를 함께 사용하는 복합 코어 형태가 흔히 나타나며, 대규모 오피스 빌딩에서는 주로 중심 코어 형태가 적용되는 것으로 분석된다. 또한, ASHRAE Handbook 2019 (p.3.5)에 따르면 고층 오피스 빌딩의 경우 수직 설비 샤프트의 집중 배치를 위해 대체로 중심 코어가 사용된다고 언급하고 있다[19]. 이에 본 연구에서는 코어 형태를 중심 코어로 고정하여 분석한다. Im, New, and Bae (2019)에서 코어 면적을 소규모 오피스(9%), 중규모 오피스(10.4%)로 제시하며, 시뮬레이션의 편의성을 위해 그리드 개수를 기준으로 코어 면적을 설정한다[20]. 이에 따라 중규모 오피스는 11.11%, 대규모 오피스는 7.41%의 비율로 적용하였다. 총 연면적에서 해당 보이드 면적을 각각 계산하여 그리드 크기의 배수에 맞게 1% 오차 내 보이드 공간으로 지정할 셀 개수를 산정한다. 중규모 오피스에서는 5%(8개), 10%(16개), 15%(24개), 20%(32개)이며, 대규모 오피스에서는 각각 5%(60개), 10%(120

Table 8. Options of excluded conditions in void placement



개), 15%(180개), 20%(240개)이다. 각 건축물 유형의 층수 내에서 할당된 셀 개수가 정수로 나눌 수 있는 층수로 제한하며, 이를 바탕으로 각 층별 분포에 따른 기준 층 보이드 셀 개수를 도출한다.

보이드 공간 배치는 장방형 및 정방형의 형태로만 지정하며, 각 유형의 기본 형태를 평면에서 수평이동, 단면에서 수직이동하며 보이드 공간의 위치를 이동시킨다. 이동하며 보이드 공간의 위치가 중심 코어와 중첩되는 경우와 건축물 외벽 경계선을 넘는 경우는 그리드 영역에서 제외하여 지정 범위 내에만 위치할 수 있도록 설정한다. Table 8.은 그에 따른 보이드 배치 불가 유형 조건 중 일부 예시이며,

Table 9. Options of Medium Office Void type

Medium office (10 ¹ , 280 ²)															
	A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.				
	5%	-	-		5%	-	-		5%	-	-				
	10%	-	-		10%	-	-		10%	-	-				
	15%	-	-		15%	2	8		15%	2	12				
	20%	2	4		20%	-	-		20%	-	-				
8×2			2×6			3×4			6×2			2×4			
	A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.
	5%	-	-		5%	-	-		5%	2	36		5%	2	48
	10%	2	24		10%	2	16		10%	-	-		10%	-	-
	15%	3	12		15%	3	8		15%	-	-		15%	-	-
	20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-
4×2			8×1			1×4			2×2			4×1			

Table 10. Options of large office void type

Large office (27 ¹ , 3,760 ²)																																			
	A.R.*	F.N.**	T.N.***		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.																				
	5%	-	-		5%	2	66		5%	-	-		5%	-	-																				
	10%	-	-		10%	4	54		10%	5	32		10%	5	48																				
	15%	5	16		15%	6	42		15%	-	-		15%	-	-																				
	20%	-	-		20%	8	30		20%	10	12		20%	10	18																				
12×3			10×3			3×8			4×6			8×3			12×2			4×5			10×2														
	A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.				
	5%	-	-		5%	-	-		5%	3	80		5%	3	120		5%	3	144		5%	4	144		5%	4	144								
	10%	5	80		10%	5	32		10%	6	56		10%	6	84		10%	8	80		10%	8	80		10%	10	78								
	15%	-	-		15%	-	-		15%	9	32		15%	9	48		15%	12	16		15%	12	16		15%	-	-								
	20%	10	30		20%	10	12		20%	12	8		20%	12	12		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-								
8×3			12×2			4×5			10×2			3×6			6×3			9×2			3×5			5×3			2×6			3×4			4×3		
	A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.
	5%	-	-		5%	-	-		5%	-	-		5%	-	-		5%	4	144		5%	5	208		5%	5	208		5%	5	208				
	10%	-	-		10%	-	-		10%	-	-		10%	-	-		10%	8	80		10%	10	60		10%	10	60		10%	10	138				
	15%	10	36		15%	10	42		15%	10	48		15%	-	-		15%	12	16		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-				
	20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-				
3×6			6×3			9×2			3×5			5×3			2×6			3×4			4×3			6×2			12×1			2×5			5×2		
	A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.
	5%	4	144		5%	5	144		5%	5	160		5%	5	208		5%	5	224		5%	6	168		5%	6	168		5%	6	224				
	10%	8	80		10%	10	54		10%	10	60		10%	10	78		10%	12	84		10%	12	24		10%	12	24		10%	12	32				
	15%	12	16		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-				
	20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-				
5×3			2×6			3×4			4×3			6×2			12×1			2×5			5×2			10×1			1×6			2×3			3×2		
	A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.		A.R.	F.N.	T.N.
	5%	5	224		5%	5	48		5%	6	168		5%	6	224		5%	6	224		5%	6	126		5%	10	126		5%	12	48				
	10%	10	84		10%	10	18		10%	12	24		10%	12	32		10%	12	32		10%	12	18		10%	-	-		10%	-	-				
	15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-		15%	-	-				
	20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-		20%	-	-				
6×1			1×5			5×1			6×1			1×5			5×1			6×1			1×5			5×1			6×1			1×5			5×1		

1: Number of options, 2: Total number of types, *A.R: Void area ratio, **F.N: Void floor number, ***T.N: Total number per type

Table 9.와 Table 10.은 각 유형 별 세부 보이드 형태를 평면상의 그리드로 시각화하여 나타내었다. 각 건물 규모에 해당하는 보이드의 가로 세로 비율을 1×4, 2×2의 형태로 표시하며 열은 회색으로 코어 위치, 짙은 회색으로 보이드의 위치를 나타내었다. 이와 같은 조건 설정으로 보이드 공간의 합리적인 배치 범위를 확보하여 보이드의 위치 및 형태에 따른 EUI 분석을 진행한다.

3.2. Grasshopper 알고리즘 구성

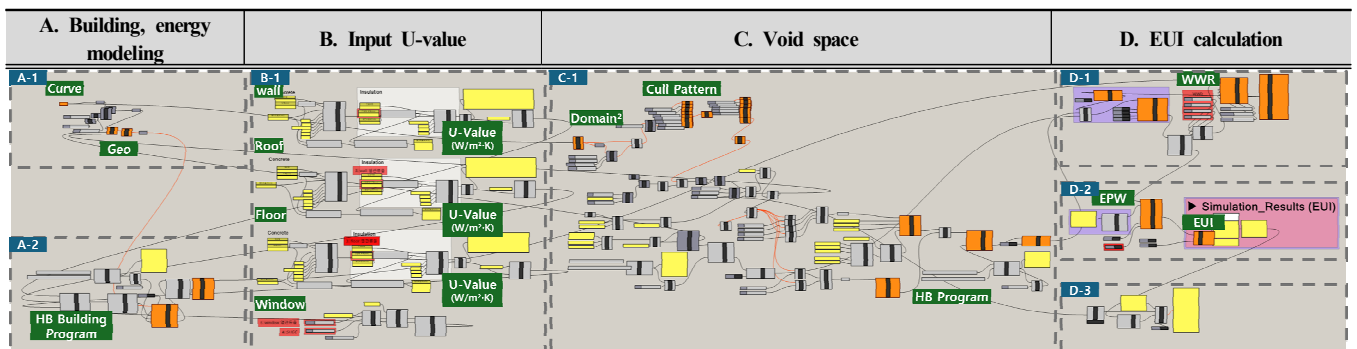
EUI 계산을 위한 Grasshopper 알고리즘은 Modeling부터 EUI Calculation까지 총 4단계로 구분하며, 각 과정별로 사용한 주요 컴포넌트는 Table 11.과 같다. 첫 번째인 Modeling 단계에서는 각 컴포넌트를 이용하여 분석 대상 오피스 빌딩의 전체적인 형태를 3D로 모델링하며 Curve와 Geo 컴포넌트로 직육면체 건물로 만들어 Face, Room, Model 순서로 EUI 계산을 위한 에너지 사용 공간으로 인식하게 한다. 두 번째 Input U-Value 단계에서는 각 컴포넌트에서 외벽, 바닥, 지붕, 창문에 대한 단열재 두께 및 벽체 재료 등을 입력하여 해당 벽체에 대한 열관류(U-value)를 설정한다. 세 번째 Void Space 단계에서는 전체 건물을 그리드로 나뉘 보이드 공간으로 설정할 범위를 지정한다. 네 번째 EUI 계산 단계에서는 인식된 HB Model에서 기후데이터를 기반으로 하여 냉방, 난방, 조명 등 각각의 EUI와 총 EUI를 계산한다.

Table 12.는 알고리즘의 전체적인 흐름을 단계별로 구분하여 나타낸 로드맵이다. 첫 단계인 A-1. Building modeling에서는 Rhino에서 기본 Base Line을 설정한 뒤, Grasshopper내 Curve 및 Surface 컴포넌트를 통해 단층 건물을 생성하고, 이를 Linear Array를 이용해 다층 건축물로 확장하여 전체 형태를 3D로 모델링한다. A-2. Building Program을 설정 단계에서는 HB Building Programs 컴포넌트를 활용해 ASHRAE 90.1 2019 기준의 중규모 및 대규모 오피스 빌딩 유형을 적용하고, 코어 및 보이드 공간을 제외한 나머지 공간은 Closed Office 용도로 지정하여 건물의 기능적 특성을 부여한다.

Table 11. DOE office building form assignments

Step	Grasshopper component
A. Modeling	Curve, Surface, Linear Array, Geometry, HB Face, HB Room, HB Model etc.
B. Input U-value	HB Opaque Material, HB etc.
C. Void space	Domain ² , Cull Pattern etc.
D. EUI calculation	LB Download Weather, HB End Use Intensity etc.

Table 12. Overall grasshopper algorithm



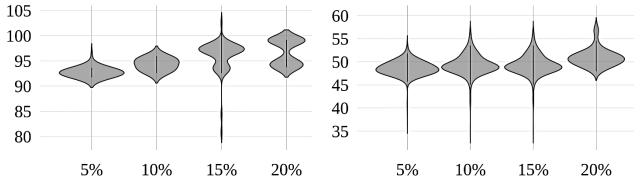
스 빌딩 유형을 적용하고, 코어 및 보이드 공간을 제외한 나머지 공간은 Closed Office 용도로 지정하여 건물의 기능적 특성을 부여한다. B. U-Value 입력에서는 에너지 절약 설계 기준에 따른 중부 2지역의 열관류율 기준 표를 참고하여 HB Opaque Material 컴포넌트에 각 벽체, 지붕, 바닥의 열전도율, 두께, 재료 특성 등을 입력해 열관류율을 산출하고, 창문은 HB Window Material 컴포넌트에 u-factor와 SHGC 값을 직접 입력하여 설정한다. C. Void Space 설정에서는 Boundary Surfaces, Divide Domain² 컴포넌트를 활용해 전체 건물을 격자형 그리드로 나누고, 그리드를 따라 위치 이동 시 건물의 외곽선 경계를 벗어나거나 중심 코어와 중첩되게 하는 그리드 영역을 Cull Pattern으로 제거한 후, 그리드의 중심점을 기준으로 설정하여 Number Slider로 보이드의 위치를 조정한다. D-1. EUI 계산에서는 건물 유형에 맞는 창면적비를 설정한 뒤, D-2. HB Model에서 입력한 데이터로 모델링 한 건물을 기반으로 분석 모델을 구성하고, LB Download Weather 컴포넌트를 통해 기후 데이터 (EPW)를 지정한다. 이후 HB Model to OSM 컴포넌트를 통해 에너지 시뮬레이션을 수행하며, 기후 데이터는 OneBuilding에서 제공하는 EPW 파일을 사용한다[21]. 마지막으로, D-3. Collibri 컴포넌트를 활용해 보이드 공간의 위치를 조절하던 Number Slider를 변수로 설정하고 동일 형태 내 다양한 위치에 따른 유형들의 냉난방 EUI를 일괄적으로 계산하여 효율적인 비교 분석이 가능하도록 한다.

4. 보이드 공간 유형에 따른 냉난방 EUI 분석

4.1. 보이드 면적 비율에 따른 냉난방 EUI 분포

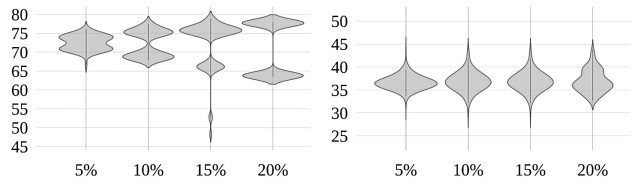
Fig. 1.은 각 Building Type에 따른 냉방 EUI 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 X축은 보이드의 면적 비율을, Y축은 EUI값을 나타낸다. 중규모의 Cooling EUI 분포는 보이드 10% 면적 비율에서 분포 폭이 가장 좁아 데이터값들이 집중된 반면, 15% 면적에서는 분포 폭이 상대적으로 넓어 변동성이 크다는 점을 알 수 있다. 이는 10% 면적에서 냉방 에너지 소비가 보다 일관되게 나타난다는 것을 의미한다. 반면 대규모는 전반적으로 모든 면적 비율에서 분포 폭이 고르게 유지되며, 특히 20% 면적에서 분포 폭이 가장 좁아 안정적인 유형으로 분석할 수 있다.

Fig. 2.는 난방 EUI의 분포를 나타낸 그래프이다. 대규모에서는 모든 면적 비율에서 분포 폭이 비교적 균일하게 유지되어 안정적인



a) Medium office

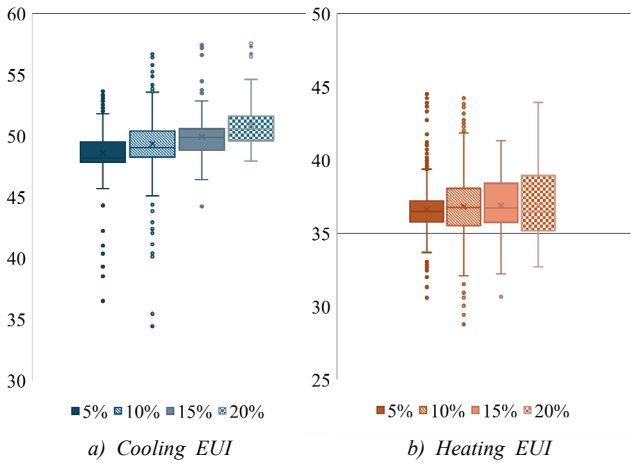
Fig. 1. Cooling EUI



a) Medium office

b) Large office

Fig. 2. Heating EUI



a) Cooling EUI

b) Heating EUI

Fig. 3. Large office boxplot

특성을 보이는 반면, 중규모에서는 면적 비율이 증가할수록 이분형 분포가 뚜렷해져 값들이 극단적으로 분리되는 경향이 나타났다. 이는 중규모에서 보이드 면적이 커질수록 난방 에너지 사용이 면적 변화에 더 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다.

4.2. 보이드 유형에 따른 냉난방 EUI 최대 최소 분석

본 연구에서는 냉난방 EUI의 이상치(outlier)를 분석하기 위해 Excel의 박스 플롯(Boxplot) 기능을 활용한다. 박스 플롯은 제1사분위 수(Q1)와 제3사분위 수(Q3)를 기준으로 사분위 범위(IQR, Interquartile Range)를 계산하며, 일반적으로 $Q1 - 1.5 \times IQR$ 보다 작거나 $Q3 + 1.5 \times IQR$ 보다 큰 값을 이상치로 간주한다.

Fig. 3.과 같이, 박스 플롯은 Q1과 Q3 사이 값을 박스로 나타내며, 이 구간에서 $\pm 1.5 \times IQR$ 범위 내의 최솟값과 최댓값에 직선을 그려 표시한다. 이 범위를 벗어나는 값은 이상치로 판단되어 점 형태로 시각화된다. 데이터 마이닝 분야의 표준 참고서인 Outlier Analysis (Aggarwal, 2017)의 개념적 틀을 참고하여 $\pm 1.5 \times IQR$ 에 해당하는 이상치를 식별하고 분석에서 제외한다[22]. 제외된 사례는 대규

Table 13. EUI comparison

Type		Cooling	Heating	Total	Total Avg.	Rate
Medium office	5%	91.73 ~96.43	66.68 ~76.15	161.92 ~169.29	165.20	±0%
	10%	92.37 ~95.95	67.89 ~77.50	161.78 ~173.24	166.64	+0.86%
	15%	80.76 ~102.58	52.91 ~78.81	148.57 ~177.02	169.27	+2.40%
	20%	93.75 ~99.16	63.48 ~77.90	157.77 ~176.88	167.40	+1.31%
Large office	5%	40.38 ~52.64	32.83 ~41.80	80.14 ~89.09	85.37	±0%
	10%	40.12 ~55.79	30.05 ~44.28	72.86 ~93.53	86.40	+1.19%
	15%	44.23 ~57.42	30.67 ~41.33	74.99 ~97.06	86.88	+1.74%
	20%	32.22 ~52.49	32.70 ~43.93	79.45 ~96.42	88.31	+3.33%

*Cells with gray shading indicate the reference value.

모는 5% 면적 비율의 10×3에서 12개, 12×1에서 28개, 10% 면적 비율의 3×8에서 6개, 12×2에서 8개, 15% 면적 비율의 10×3에서 6개 유형이 각각 제외된다. 이에 따라 총 4,040개 유형에서 중규모에서 280개 유형 중 2개로 약 0.7%, 대규모에서 3,760개 유형 중 60개로 약 1.6%에 해당하는 유형이 분석에서 제외되었으며 이는 전체 유형 중 62개로 약 1.53%에 해당한다. 이후의 EUI 최대·최소 및 최적 유형 도출은 이상치를 제외한 중규모의 278개, 대규모의 3,700개 총 3,978개 데이터를 기반으로 수행한다. 이러한 이상치는 데이터 분포를 왜곡하여 분석 결과의 신뢰도를 저하시킬 수 있으며, Nascimento 외(2021)는 이상치 제거를 통해 데이터 신뢰성을 확보하고 모델 성능을 향상시켰다[23].

Table 13.은 유형별 냉난방 EUI의 최댓값, 최솟값, 평균값을 요약하여 냉난방 합계 EUI 차이를 5% 단위로 비교한 것이며, Table 14.는 전체 결과를 나타낸다. 보이드 유형은 층별 보이드 셀 수를 기준으로 내림차순 정렬하고, 동일한 셀 수 내에서는 인수 쌍의 앞자리 값을 기준으로 오름차순으로 정렬하였다. 중규모의 냉방 EUI는 5% 면적에서 최대 96.43kWh/m²(2×2유형), 최소 91.73kWh/m²(1×4유형)로 나타났고, 10% 면적에서는 최대 95.95kWh/m²(2×4유형), 최소 92.57kWh/m²(4×2유형)로 유사한 범위를 보인다. 15% 면적에서는 냉방 최대 102.58kWh/m²(2×6유형), 최소 80.76kWh/m²(2×6유형)로 변동 폭이 커지며, 20% 면적에서는 최대 99.16kWh/m², 최소 93.75kWh/m²로 나타낸다. 난방 EUI는 면적 비율이 증가할수록 최댓값이 높아지는 것으로 분석되며 최대와 최소는 모두 15% 면적에서 최소 52.91kWh/m²(2×6유형), 최대 78.87kWh/m²(8×1유형)로 나타났다. 냉난방 EUI 모두 변동 폭이 가장 큰 면적 비율은 15%이며 이는 다른 면적 비율 유형에 비해 보이드 배치가 다양하기 때문으로 분석된다.

대규모의 냉방 EUI는 5% 면적에서 최대 52.64kWh/m²(10×3유형), 최소 40.38kWh/m²(12×1유형)로 시작해 15% 면적에서 최대 57.42kWh/m²(10×3유형), 최소 44.23kWh/m²(12×3유형)로 증가한다. 난방 EUI는 10% 면적에서 최대 44.28kWh/m²(10×1유형), 최소 30.05kWh/m²(12×2유형)로 가장 큰 편차를 보인다.

중규모에서 냉난방 합계 EUI의 최댓값과 최솟값은 각각 177.02 kWh/m²(15%, 8×1유형)와 148.57kWh/m²(10%, 2×6유형)였

Table 14. Summary of EUI by void type

Office building type			EUI (kWh/m ²)								
Building type	Void ratio	Void type	Cooling EUI			Heating EUI			Total EUI		
			Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.
Medium office	5%	1×4	93.62	*91.83	92.63	75.66	70.16	72.82	169.29	162.00	165.45
		2×2	96.43	91.73	92.76	76.15	66.68	72.23	168.75	161.92	164.99
		4×1	93.45	91.81	92.70	74.80	70.16	72.47	168.13	162.00	165.17
	10%	2×4	95.95	92.77	94.38	76.66	68.58	72.46	172.59	161.36	166.84
		4×2	95.46	92.57	94.07	75.21	67.89	71.60	170.68	160.77	165.67
		8×1	95.75	93.19	94.60	77.50	68.56	72.82	173.24	161.78	167.42
	15%	2×6	102.58	80.76	93.95	76.49	52.91	67.73	173.35	148.57	161.68
		3×4	97.20	93.24	95.23	76.98	65.80	71.27	174.17	159.05	166.50
		6×2	97.79	93.44	95.47	76.68	65.34	71.09	174.47	158.85	166.56
		2×4	98.74	96.92	97.72	77.69	75.27	76.25	176.39	172.22	173.98
		4×2	97.66	96.63	97.27	75.40	74.51	74.89	172.97	171.42	172.15
	20%	8×1	98.34	97.22	97.76	78.81	75.19	76.99	177.02	172.47	174.75
		8×2	99.16	93.75	96.66	77.90	63.48	70.75	176.88	157.77	167.40
	Large office	5%	10×3	52.64	48.62	50.93	36.91	32.83	35.45	89.09	82.66
4×5			50.73	46.43	49.35	36.58	33.70	35.46	87.11	80.14	84.81
10×2			51.07	46.48	49.55	37.13	34.00	35.88	87.82	80.50	85.43
3×5			51.36	46.31	49.13	37.65	34.46	36.10	89.01	80.79	85.23
5×3			51.33	46.32	49.10	37.16	34.08	35.58	88.34	80.59	84.69
2×6			50.11	46.47	48.61	38.05	34.76	36.47	88.16	81.26	85.08
3×4			50.05	46.45	48.56	37.19	34.77	36.15	87.23	81.25	84.71
4×3			50.10	46.46	48.56	36.79	34.31	35.74	86.725	81.20	84.30
6×2			50.16	46.45	48.61	37.29	34.77	36.16	87.369	81.25	84.77
12×1			49.51	40.38	47.68	41.80	34.58	36.30	90.48	80.76	83.98
2×5			50.36	46.91	48.59	38.91	35.22	36.86	89.267	82.36	85.45
5×2			50.54	46.90	48.62	38.33	35.22	36.59	88.813	82.35	85.20
10×1			50.36	46.97	48.52	40.43	35.18	37.58	90.639	82.38	86.10
1×6			48.01	47.67	47.86	39.95	36.03	38.34	87.696	83.73	86.20
2×3			49.74	47.02	48.01	38.80	35.34	37.33	87.123	83.49	85.34
3×2			48.24	47.58	48.03	38.83	36.07	37.37	86.872	83.70	85.40
6×1			48.12	47.63	47.93	40.18	36.02	37.99	88.022	83.70	85.92
1×5			48.21	47.93	48.00	39.99	36.50	38.62	87.92	84.58	86.63
5×1		48.31	47.99	48.11	40.20	36.48	38.36	88.20	84.53	86.47	
10%		10×3	55.43	45.31	50.73	38.29	32.08	35.01	93.53	77.47	85.74
		3×8	55.79	40.39	48.81	43.85	30.60	36.57	99.25	72.86	85.38
		4×6	52.49	45.61	49.44	37.11	33.10	35.17	89.583	78.72	84.61
		8×3	52.80	45.67	49.69	36.90	32.49	34.79	89.479	78.22	84.48
		12×2	54.37	40.12	48.30	42.63	30.05	35.99	97	75.12	84.29
		4×5	53.49	46.60	49.61	38.67	33.81	35.76	92.155	80.87	85.37
		10×2	54.03	46.69	49.93	40.53	34.51	36.90	94.512	81.68	86.83
		3×5	51.98	47.47	49.35	40.08	35.44	37.20	92.06	82.95	86.55
		5×3	52.06	47.45	49.37	38.29	34.63	35.93	90.138	82.50	85.31
		2×6	49.24	48.20	48.86	40.83	36.27	38.42	89.84	84.52	87.28
		3×4	49.25	48.15	48.87	39.08	36.30	37.77	88.215	84.50	86.64
		4×3	50.31	47.34	48.90	37.94	34.43	36.76	86.943	83.05	85.67
		6×2	49.36	48.16	48.96	39.24	36.27	37.76	88.523	84.49	86.72
		12×1	48.34	47.94	48.11	42.82	35.96	39.53	90.764	84.00	87.65
		2×5	49.39	48.98	49.28	41.25	37.24	39.23	90.551	86.29	88.51
		5×2	49.59	48.93	49.40	40.09	37.21	38.67	89.619	86.23	88.08
		10×1	49.45	48.94	49.09	44.28	37.14	40.69	93.29	86.26	89.78
		15%	12×3	54.67	44.23	50.05	36.76	30.67	33.75	91.23	74.99
10×3			57.42	46.43	51.06	39.87	32.22	35.02	97.06	79.45	86.08
4×5			51.51	47.45	48.88	36.56	34.18	35.43	87.44	81.65	84.31
10×2			52.21	47.71	49.36	39.98	35.49	37.57	91.88	83.27	86.93
3×6			50.50	48.82	49.80	40.62	36.51	38.20	90.97	85.39	88.00
6×3			50.44	48.80	49.85	37.00	35.46	36.06	87.23	84.28	85.92
9×2			50.54	48.84	49.85	40.91	36.45	38.48	91.39	85.36	88.33
3×5			50.84	50.06	50.57	41.33	38.03	39.58	92.14	88.18	90.15
5×3			51.04	50.05	50.70	38.42	36.93	37.65	89.23	87.57	88.36
20%			10×3	57.56	47.96	51.43	40.07	32.70	35.07	97.37	80.70
	3×8		51.81	49.58	50.83	40.76	36.73	38.69	92.41	86.37	89.51
	4×6		51.09	49.41	50.28	38.08	35.55	36.61	89.15	84.99	86.89
	8×3	51.63	49.53	50.78	36.92	34.38	35.70	88.31	83.95	86.48	
	12×2	50.11	48.99	49.52	40.33	36.12	38.17	90.32	85.22	87.69	
4×5	51.96	51.25	51.61	39.41	37.54	38.58	91.34	88.83	90.19		
10×2	52.49	51.41	51.97	43.93	38.81	41.06	96.42	90.33	93.02		

*Maximum and minimum values in each column are highlighted with bold italics and shaded cells.

Table 15. Optimizing model

Medium office	5%	M1. 2×2_16						
				2 nd Floor (F.N. 2)				
		Cooling	91.74	Heating	70.18	Total*	161.92	
Medium office	10%	M2. 4×2_12						
				2 nd Floor (F.N. 2)				
		Cooling	92.69	Heating	68.09	Total	160.78	
Medium office	15%	M3. 2×6_6						
				2 nd Floor (F.N. 2)				
		Cooling	80.76	Heating	67.81	Total	148.57	
Medium office	20%	M4. 8×2_6						
				2 nd Floor (F.N. 2)				
		Cooling	93.75	Heating	64.02	Total	157.77	
Large office	5%	L1. 12×1_28						
				4 th Floor (F.N. 5)				
		Cooling	45.68	Heating	35.08	Total	80.76	
	Large office	10%	L2. 12×2_12					
					4 th Floor (F.N. 5)			
			Cooling	45.08	Heating	30.05	Total	75.13
Large office	15%	L3. 12×3_11						
				3 rd Floor (F.N. 5)				
		Cooling	44.32	Heating	30.67	Total	74.99	
Large office	20%	L4. 8×3_16						
				1 st Floor (F.N. 10)				
		Cooling	49.57	Heating	34.38	Total	83.95	

*Total : Cooling EUI (kWh/m²) + Heating EUI (kWh/m²)

며, 대규모에서는 최대 97.06kWh/m²(15%, 10×3유형), 최소 72.86kWh/m²(10%, 3×8유형)로 나타난다. 전체 유형에 대한 냉난방 합계 EUI 평균은 중규모에서 167.58kWh/m², 대규모에서는 86.37kWh/m²로 계산된다. 냉난방 합계 EUI 평균이 가장 높은 유형은 중규모의 15% 8×1유형, 대규모의 20% 10×2유형이었고, 가장 낮은 유형은 각각 중규모의 15% 2×6유형, 대규모의 15% 12×3유형으로 확인된다. 냉난방 합계 EUI에서 중규모의 20% 유형을 제외하고는 보이드의 면적 비율이 높아질수록 EUI 값도 커지는 경향으로 분석되었다. 중규모의 20% 유형은 다른 유형보다 면적이 커서 건물 내 보이드의 배치 가능 위치가 제한되기 때문에 상대적으로 편차가 적은 것으로 판단된다.

4.3. 보이드 유형에 따른 최적 유형 도출

본 연구에서는 각 건물 유형별로 냉난방 EUI 합계의 평균값이 가장 낮은 유형을 보이드 공간 설계에 가장 효율적인 유형으로 판단하였으며, 해당 유형 내에서 가장 낮은 EUI 값을 나타내는 위치를 포함한 유형을 최적 유형으로 정의한다. 이 기준에 따라 도출된 최적 유형은 Table 15.와 같다.

중규모 건물의 경우, 보이드 면적 비율별 최적안은 각각 5%에서 2×2 위치 16, 10%에서 4×2 위치 12, 15%에서 2×6 위치 6, 20%에서 8×2 위치 6으로 나타난다. 이를 M1~M4로 구분한다. 각 위치 번호는 해당 유형 내에서 보이드 공간의 배치 가능한 경우를 구분하기 위해 설정된 식별 번호로, 평균 기준 좌측 하단에서 우측 상단으로 수평 이동 순서를 우선 적용하고, 이후 층별 수직 방향으로 순차적으로 부여하였다. 이에 따라 M1과 M2는 남동 방향 외벽에 면한 최상층에서, M3는 동측 외벽에 인접하며 남북 방향 외벽과 면한 최상층에서, M4는 동서 방향 외벽과 면하며 북측 외벽과 인접한 위치에서 최적 안이 도출된다. 대규모 건물의 경우, 5%에서 12×1 위치 28, 10%에서 12×2 위치 12, 15%에서 12×3 위치 11, 20%에서 8×3 위치 16이 각각 최적 안으로 분석되며, 이를 Table 15.와 같이 L1~L4로 나타내었다. L1은 북측 외벽, L2는 남측 외벽과 인접하며 동서 방향 외벽과 맞닿은 형태, L3는 북·동·서 외벽 모두와 접한 형태, L4는 북서 방향 외벽과 인접한 형태에서 최적 안이 도출된다.

중규모에서는 15% 보이드 면적 유형이 가장 낮은 냉난방 합계 EUI를 기록하며, 모든 최적 유형에서 보이드는 최상층을 포함하여 배치되는 경향을 보인다. 이는 건물 규모 특성상 보이드 공간이 주로 최상층, 최하층 또는 양 끝 층을 포함하는 형태로 위치하기 때문이다. 반면, 대규모는 보이드 면적 비율과 관계없이 장단변 길이의 차이가 크고 평면 배치 비율이 높은 유형이 최적 안으로 나타나며, 보이드의 수직 위치는 대부분 중간층에 분포한다. 최상층과 최하층을 포함하지 않는 보이드 배치는 외기와 접하는 면적이 작아져 냉난방 성능이 우수한 것으로 분석된다. 최적 유형별 냉난방 합계 EUI 평균을 전체 평균과 비교한 결과, 중규모의 M1~M4 유형은 각각 3.49%, 4.23%, 12.80%, 6.22% 낮은 수치를 기록하고, 대규모의 L1~L4 유형은 6.95%, 14.96%, 15.18%, 2.88% 낮은 수치를 보인다. 특히 대규모에서는 유형 간 성능 차이가 중규모보다 최대 32% 크게 나타나며, L3 유형이 15.18% 감소로 가장 큰 효과를 보인다.

형태적 측면에서, 대규모의 최적 유형들은 동서 방향으로 변이 긴 직

사각형 평면 구조를 가지며, 보이드가 건물의 동서 방향의 중심부나 중층에 배치되어 에너지 성능 향상에 기여하는 것으로 나타난다. 이는 동서 방향으로 긴 평면 형태가 외기와 접하는 보이드 면적을 줄이고, 중층 배치가 상하층의 단열 효과를 극대화하여 냉난방 부하를 완화하기 때문이다. 반면, 중규모는 최대 3층 건물이기에 보이드가 자연스럽게 최상층이나 전 층에 걸쳐 배치되는 한계가 있어, 최상층 배치가 설계적 의도라기보다 층수 제약에 따른 결과로 판단된다. 또한, 중규모의 최적 유형에는 동서 방향뿐 아니라 남북 방향으로 긴 평면 형태도 포함되어 있어, 형태보다는 보이드 위치, 외기 접촉 정도 등이 냉난방 성능에 더 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

따라서, 대규모에서는 보이드의 수평적 배치 형태와 중층 배치가 냉난방 성능 향상에 중요한 설계 요소로 작용하는 반면, 중규모는 층수 및 형태 영향이 제한적이므로, 보이드 면적 비율과 외기 접촉, 주변 공간 구성 등이 에너지 효율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다.

4.4. 소결

보이드 공간은 시각적 개방감과 자연 환기·채광을 제공하여 냉난방 에너지에 영향을 미친다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 면적 비율, 형태, 위치에 따른 EUI를 분석하고, 설계 단계에서 최적 보이드 유형을 도출하였다. 중·대규모 모두에서 보이드 특성에 따른 EUI 편차가 확인되었다. 중규모의 경우 냉방 EUI는 15% 면적에서 가장 큰 변동 폭을 보이며, 난방 EUI 역시 보이드 15%에서 최대와 최소 모두 나타난다. 대규모에서는 냉방 EUI가 보이드 면적 비율 증가에 따라 점진적으로 증가하며, 난방 EUI는 20% 면적에서 가장 큰 편차를 기록하였다. 세부적으로, 중규모의 경우 냉방 EUI는 80.76~102.58kWh/m², 난방 EUI는 48.19~78.81kWh/m², 냉난방 합계는 137.03~177.02kWh/m²의 범위를 보이며, 대규모는 냉방 EUI 34.43~57.56kWh/m², 난방 EUI 28.78~44.51kWh/m², 냉난방 합계는 63.86~97.37kWh/m²로 나타난다. 냉난방 합계 EUI 평균이 가장 낮게 나타나는 효율적인 유형은 중규모의 보이드 5%에서 2×2, 10%에서 4×2, 15%에서 2×6, 20%에서는 8×2유형이, 대규모는 각각 12×1, 12×2, 12×3, 8×3 유형이 가장 효율적인 유형으로 도출되었다. 효율적인 유형 내 각 오피스 빌딩 유형마다 위치를 포함하여 4개씩 총 8개의 최적 유형을 도출하였다. 도출한 최적 유형의 특성을 분석하면 형태적 측면에서 대규모는 동서 방향으로 긴 직사각형 평면과 중층에 배치된 보이드가 냉난방 성능 향상에 중요한 역할을 한다. 이는 보이드가 외기와 접하는 면적을 줄이고 상하층의 단열 효과를 높여 에너지 부하를 완화하기 때문이다. 반면 저층인 중규모는 최적 유형의 보이드 공간이 주로 최상층에 위치하며, 평면 형태보다는 보이드 위치, 면적 비율, 외기 접촉 정도가 냉난방 효율에 더 큰 영향을 미친다. 특히 대규모에서는 수평으로 넓은 유형의 보이드 배치가 더욱 효과적인 것으로 분석된다.

5. 결론

본 연구는 Rhino Grasshopper를 활용해 오피스 빌딩 규모에 적합한 보이드 최적 유형을 모델링하고 EUI를 계산하는 것을 목적으로

로 한다. 냉난방 합계 EUI 평균이 가장 낮은 유형을 효율적 유형으로 정의하고, 그 중 EUI가 가장 낮은 위치의 유형을 최적 유형으로 판단한다. 중규모에서는 보이드 면적이 5%, 10%, 15%, 20%일 때 각각 2×2, 4×2, 2×6, 8×2유형이 효율적인 유형으로 도출되었으며, 대규모에서는 12×1, 12×2, 12×3, 10×3유형이 각각 효율적인 유형으로 나타났다. 각 유형 내 위치 번호는 보이드 공간이 배치된 공간적 위치를 의미하며, 이를 기준으로 EUI가 가장 낮은 위치를 선정한 결과, 중규모의 최적 유형은 각각 2×2유형의 위치 16, 4×2유형의 위치 12, 2×6유형의 위치 6, 8×2유형의 위치 6으로 확인된다. 대규모는 12×1유형의 위치 28, 12×2유형의 위치 12, 12×3유형의 위치 11, 8×3유형의 위치 16이 최적 유형으로 분석된다. 최적 유형의 냉난방 합계 EUI는 전체 유형 평균 대비 2.88~15.17% 차이를 보이며, 대규모 오피스에서 중규모보다 상대적으로 편차가 크다. 형태적 측면에서는 동서 방향으로 장변을 가진 평면과 평면 방향으로 확장된 보이드 배치가 더 효과적이다.

본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 보이드 면적 비율에 따라 EUI 값이 유의미하게 달라졌으며, 보이드의 형태뿐만 아니라 수직적 위치 또한 EUI에 영향을 미치는 주요 변수로 작용한다. 특히, 같은 면적 비율을 갖더라도 보이드가 배치된 층수에 따라 냉난방 에너지 소비량이 다르게 나타났으며, 이는 보이드 공간이 환기, 채광, 내부 열 환경 조절 등에 직·간접적인 영향을 미친 결과로 해석된다.

둘째, 보이드 면적 비율이 높아질수록 EUI가 커지는 경향을 보이나, 일부 경우에는 면적 비율이 높더라도 최적의 형태와 위치에 따라 EUI가 낮게 도출되기도 한다. 이는 보이드 설계 시 단순히 면적을 줄이기보다는 건물 규모에 적합한 적정 비율과 배치 형태를 고려해야 한다는 의미를 가진다.

셋째, 중규모는 건물 구조상 보이드가 최상층 또는 최하층에 접하는 방식만 가능했으며, 대규모의 경우에는 중간층에 위치하는 보이드가 EUI를 더 효과적으로 낮추는 것으로 나타났다. 또한, 동서 방향으로 장방형을 가진 형태일수록 EUI 값이 낮게 나타났으며, 수직보다는 평면적으로 넓은 형태가 EUI 절감에 유리한 경향을 보인다.

본 연구의 한계로는 보이드 면적 비율의 사례 기반의 세분화된 변수 적용이 부족했으며, 보이드의 형태는 장방형과 정방형에 한정되어 연속되지 않은 보이드에 대한 분석은 포함되지 않았다. 향후 연구에서는 창면적비, 장단변비 등 건축 설계 요소와 다양한 보이드 형태 및 배치 전략을 포함한 구체적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임((No.2022R1F1A1071029).

References

- [1] U.S. Department of Energy, Energy.gov, <https://www.energy.gov/>, 2025.05.26.
- [2] U.S. Environmental Protection Agency, ENERGY STAR, <https://www.energystar.gov/>, 2025.03.08.

- [3] Lddybug Tools, <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>
- [4] 서희선, 현대 오피스 건축에서 나타나는 보이드 공간 배치에 관한 연구, 홍익대학교 석사학위논문, 2023. <https://www.riss.kr/link?id=T16817191> // (H.S. Seo, A study on the void space arrangement in contemporary office architecture (Master's Thesis), Korea: Hongik University, 2023. <https://www.riss.kr/link?id=T16817191>)
- [5] 문성식, 복합상업시설 내 보이드 공간의 계획적 특성과 변화에 관한 연구: 내부가로의 공간구조 분석과 보이드 공간의 면적비 변화를 중심으로, 중앙대학교 석사학위논문, 2016. <http://www.riss.kr/link?id=T14021310> // (S.S. Moon, A study on the changing architectural properties of void space in mixed-use commercial complexes (Master's Thesis), Korea: Chung-Ang University, 2016. <http://www.riss.kr/link?id=T14021310>)
- [6] 공도영, 송석재, 김용성, 보이드 공간에 의한 건축 입면 다양성에 관한 연구 - 업무시설을 중심으로 -, 한국공간디자인학회 논문집, 제19권 제5호, 2024, pp.525-538. // (D.Y. Gong, S.J. Song, Y.S. Kim, A study on architectural elevation diversity by void space - Focusing on business facilities -, Journal of Korea Institute of Spatial Design, 19(5), 2024, pp.525-538.)
- [7] C.O. Iroham et al., Assessing void in Grade-A office buildings in Lagos metropolis, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 993, 2022, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/993/1/012003>
- [8] A. Momenaei, A. Ardekani, S. Khaghani, Enhancing energy efficiency of high-rise buildings through generative design of balcony configurations, Journal of Architectural Engineering, 31(1), 2024. <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1871>
- [9] 최재규, 강명수, 공공청사 아트리움 구조의 유형별 열환경 분석, 대한건축학회논문집, 제41권 제2호, 2025, pp.261-272. // (J.K. Choi, M.S. Kang, Analyzing the thermal environment of atrium types in government office buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea, 41(2), 2025, pp.261-272.)
- [10] 강다은, 업무시설의 아트리움 공간계획에 관한 연구, 홍익대학교 석사학위논문, 2024. <https://www.riss.kr/link?id=T17082424> // (D.E. Kang, A study on the atrium space planning in business facilities (Master's Thesis), Korea: Hongik University, 2024. <https://www.riss.kr/link?id=T17082424>)
- [11] A.B. Spaeth, W. Jabi, The virtual and the physical: Between the representation of space and the making of space, eCAADe RIS 2017 Proceedings, 2017. https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/99909/7/eCAADeRIS2017_proceedings%20Amer.pdf
- [12] 표용석, 국내 소형 공공 도서관 설계 공모 작품에서 나타난 보이드 공간 디자인 특성에 관한 연구, 한국공간디자인학회 논문집, 제19권 제4호, 2024, pp.489-498. // (E. Pyo, A Study on Void Space Design Characteristics in Korean Small Public Library Architectural Design Competition Works, 19(4), 2024, pp.489-498.)
- [13] 김경은, 푸아디안피 사우피카, 문자영, 대형쇼핑몰 아트리움형 휴게공간의 공간특성 연구, 한국: 한국실내디자인학회 학술대회논문집, 2021.11, pp.164-168. // (K.E. Kim, F. Saufika, J.Y. Mum, A study on spatial characteristic analysis of atrium-type rest place in shopping mall, Korea: 2021 KIID Autumn Conference Proceedings, 2021.11, pp.164-168.)
- [14] 김시홍, 보이드 공간개념을 적용한 도서관 설계 계획안, 동국대학교 석사학위논문, 2022. <http://www.riss.kr/link?id=T16061286> // (S.H. Kim, A design of a public library that applies the concept of a void space (Master's Thesis), Korea: Dongguk University, 2022. <http://www.riss.kr/link?id=T16061286>)
- [15] N. Che Din, T. Zhi, C. Soon, Evaluation of acoustical performance for atrium design with respect to skylight geometry and material in the tropics, Pertanika Journal of Science and Technology, 30(4), 2022, pp.2983-2997. <https://doi.org/10.47836/pjst.30.4.35>
- [16] H.S. El Samaty, J.Z. Feidi, A.M. Refaat, The impact of glazed barriers on the visual and functional performance of transition spaces in college buildings using space syntax, Ain Shams Engineering Journal, 14(9), 2024, 102119.
- [17] M. Deru et al., U.S. department of energy commercial reference building models of the national building stock, National Renewable Energy Laboratory (U.S.), 2011. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc841313/m2/1/high_res_d/1009264.pdf
- [18] SteelConstruction.info, Concept design, https://www.steelconstruction.info/Concept_design, 2025.04.29.
- [19] Ashrae, ASHRAE Handbook—Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications, 2019.
- [20] P. Im, J. New, Y. Bae, Updated OpenStudio (OS) small and medium office prototype models, Building Simulation Conference, 2019, pp.1311-1317. <https://www.osti.gov/biblio/1607029>
- [21] Climate.OneBuilding.org, Climate Data Repository, <https://climate.onebuilding.org/> 2025.04.13.
- [22] C.C. Aggarwal, Outlier analysis, 2nd ed., Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3>.
- [23] G.F. Martin Nascimento et al., Outlier detection in buildings' power consumption data using forecast error, Energies, 14(24), 2021, 8325. <https://doi.org/10.3390/en14248325>