



건물 에너지 모델링을 통한 오피스 건물의 지열 VRF 시스템의 에너지 성능 평가

Evaluation of Ground Source Variable Refrigerant Flow System for Medium Size Office Buildings in South Korea using Building Energy Modeling

곽병창*

Kwang, Byung Chang*

* LG Electronics USA Inc., Alpharetta, Georgia, USA. (byungchang.kwang@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this research is to analyze the energy performance of ground source variable refrigerant flow (GS-VRF) systems for prototype office buildings in various cities of South Korea. **Method:** In order to evaluate energy performances of GS-VRF system for a generic office building, this paper utilizes a whole-building energy simulation program, which is based on DOE-2.2 building simulation engine. Specifically, this paper compares the energy performance of GS-VRF systems to conventional space cooling and heating systems, including water source heat pumps (WSHPs), ground source heat pumps (GSHPs), and water source VRF (WS-VRFs) systems. **Result:** From the comparative analysis, it is found that ground source VRF systems consume lower site/source energy to provide cooling and heating to the prototype office buildings than other HVAC systems in all cities of South Korea ranging from 58% to 63% for WSHPs, 30% to 40% for GSHPs, and 41% to 55% for WS-VRFs. These results show the energy saving potential of ground source VRF systems for office buildings in South Korea to achieve high energy efficient buildings.

KEYWORD

고효율 에너지 오피스 건물
지열 VRF 시스템
지열 히트 펌프
건물 에너지 모델링

High energy efficient office building
Ground source VRF systems
Ground source heat pumps
Building energy modeling

ACCEPTANCE INFO

Received May 30, 2018
Final revision received June 19, 2018
Accepted June 24, 2018

© 2018 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

미국 에너지 정보청(U.S. Energy Information Administration, EIA)에 따르면 2016년 건물 분야(building sector)에서의 에너지 및 전기 소비가 미국 전체 사용량의 약 39%와 74%를 차지하는 것으로 나타났다 [1]. 특히, EIA 자료에 따르면 미국 건물에 에너지 사용량 가운데 공조설비가 차지하는 비중이 약 44%나 되는 것으로 나타났다 [2]. 이와 같은 결과는 2016년 미국 전체 에너지 및 전기 소비량 가운데 건물의 공조설비가 약 18%와 31%를 차지하는 것을 의미하기 때문에, 에너지 효율이 높은 공조설비를 사용하는 것은 개별 건축물의 에너지 저감효과뿐만 아니라, 국가 에너지 저감에도 효과가 높은 것을 의미한다.

2017년 한국에너지공단(Korea Energy Research Institute)의 KEA 에너지 편람에 따르면, 한국의 에너지 소비는 해마다 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 KEA 에너지 편람은 고효율 건물 보급과 확산 및 신·재생에너지의 보급 확대를 강조하였다 [3]. 한국에 이미 많이 알려진 Variable Refrigerant Flow(VRF) 시스템은 높은 에너지 효율 및 여

러 가지 이점을 바탕으로 미국 및 세계적으로 많은 주목을 받고 있는 시스템이다 [4-15].

기존의 히트 펌프 기본 원리를 바탕으로 작동하고 있지만, VRF 시스템은 냉매를 이용하여 하나의 실외기와 여러 개의 실내기를 조합할 수 있다는 특징을 가지고 있다. VRF 시스템 실외기는 열원을 기준으로 공랭식 VRF 시스템과 수랭식 VRF 시스템으로 구분된다 [4].

VRF 시스템이 관심을 받으면서 공랭식 VRF(Air-Cooled VRF) 및 수랭식 VRF(Water-Source VRF, WS-VRF) 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [5-15]. 예를 들어, Goetzler는 case study를 통해 높은 에너지 효율, 낮은 운영비용 등과 같은 VRF 시스템의 효과를 소개하였으며, rooftop variable-Air-Volume(VAV) 시스템과 비교하여 약 30%에서 40% 정도 HVAC 시스템 에너지 사용량을 절감할 수 있다고 주장하였다 [5].

Kim et al.은 중형 오피스 건물 에너지 모델링을 통하여 다양한 미국 기후에서의 VAV 시스템과 공랭식 VRF 시스템의 성능 비교를 진행하였다. Kim et al.의 연구에서 HVAC 시스템 에너지 사용량은 42%까지 줄어든 것으로 나타났다 [10]. Zhou et al.도 공랭식 VRF를 VAV 시스템과 fan-coil plus fresh air systems (FPFAs)와 비교하였으며, 그 결과 VRF 시스템에 의해 건물 전체

에너지 사용량이 약 22.2%까지 줄어들었음을 보여주었다 [11]. Aynur et al.은 실험과 시뮬레이션을 통해 실존하는 오피스 건물에 대해 공랭식 VRF와 VAV 시스템의 성능을 비교하여 VRF가 57.9%까지 에너지 사용을 줄일 수 있음을 보여주었다 [14].

그런데, 공랭식 VRF 시스템과 비교하였을 때, 상대적으로 지열 VRF(Ground-Source VRF, GS-VRF)에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않은 상황이다. 비록 GS-VRF에 대해 구체적인 해석을 진행하지는 않았지만, Thornton et al.은 연구 보고서에서 지중열 교환기가 수랭식 VRF와 연결되어 에너지 저감 효과를 높일 수 있다고 언급하였다 [15].

Karr는 시뮬레이션을 이용하여 노약자 보호시설을 대상으로 GS-VRF가 공랭식 히트펌프 대비 약 41%까지 에너지 사용량을 줄일 수 있다고 하였다 [16]. 하지만, Karr의 보고서는 시뮬레이션을 진행한 건물에 관한 정보 및 시스템 효율과 용량 등과 같은 구체적인 정보가 없기 때문에 결과를 해석하는데 한계가 있다.

Im et al.은 미국 Rochester, MI에 위치한 대학 건물에 GS-VRF를 설치하여 성능 실험을 진행하였으며, 이 데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 진행하여 GS-VRF와 VAV 시스템의 에너지 성능을 비교하였다 [17]. Im et al.의 시뮬레이션 결과 GS-VRF가 VAV 시스템 대비 약 33% 정도 에너지를 저감하는 것을 보여주었다.

한국 자료 중에서도 GS-VRF를 소개하는 자료가 있었다. 김성실과 허인구는 지열을 이용한 VRF 시스템과 일반적인 형태의 지열히트펌프(Ground Source Heat Pump, GSHP)를 비교하여 GS-VRF의 에너지 효율이 냉방 11.2%, 난방 25.6% 더 높은 것을 보여주었다 [18]. 비록 김성실과 허인구는 GS-VRF의 실제 설치사례를 보여주고 있지만, 시스템 간 에너지 사용량을 비교하는 연구는 진행하지 않았으며, GSHP와의 효율 비교도 정격 상태에서의 효율 비교이기 때문에, 부분부하까지 고려한 구체적인 성능 비교에는 제한이 있었다.

앞에서 언급된 문헌조사에 따르면, GS-VRF는 공랭식 VRF에 비하여 아직 연구가 많이 이루어져 있지 않은 상황이다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 GS-VRF의 에너지 성능을 한국 기후에서 평가를 하는 것이며, 이와 함께 GSHP와 에너지 소비를 비교하여 GS-VRF의 에너지 저감효과를 분석하는 것이다. 이를 위하여 본 연구는 건물 에너지 모델링 방법을 이용하여 오피스 건물을 대상으로 시스템 간 에너지 사용량을 비교 해석한다. 본 연구에서 건물 에너지 해석을 위하여 공개된 수랭식 VRF 제품의 성능 데이터를 건물 에너지 해석 프로그램에 적용한다. 해석 결과는 전체 HVAC 에너지 소비량과 피크 전기 부하로 나타나게 된다.

2. 해석 방법

2.1. 건물 에너지 모델링

본 연구에서 사용한 해석 방법은 건물에너지 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 오피스 건물을 모델링하고, GS-VRF 시스템과

다른 HVAC 시스템의 에너지 성능을 비교 평가하는 것이다. HVAC 시스템 특성이 건물 에너지 성능에 주는 영향을 해석하기 위해 본 연구는 DOE-2.2 에너지 시뮬레이션 엔진을 사용하는 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 eQUEST를 이용하였다 [19, 20]. 본 연구에서 사용한 건물 에너지 모델링 프로세스는 Fig 1.에 표현되었다.

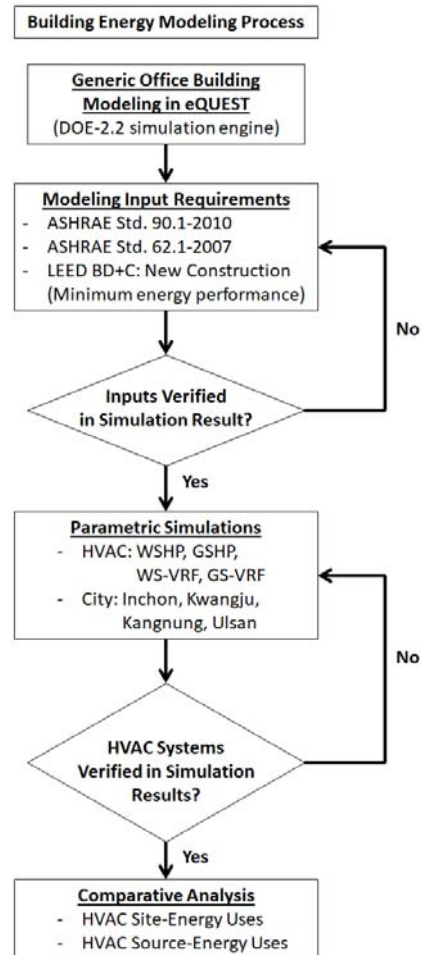


Fig 1. Building Energy Modeling Process

본 연구에서 모델링에 사용한 오피스 건물은 Fig 2.과 같이 eQUEST 프로그램이 제공하고 있는 일반적인(generic) 형태의 오피스 건물로서 각 층당 5개의 zone을 가지고 있다. 한국 기후가 ASHRAE Standard 90.1-2010에서 Climate Zone 4에 속하였으므로, ASHRAE Standard 90.1-2010에서 Climate Zone 4에 해당하는 건물의 외피재료를 선정되었다. 또한 건물의 조명 및 장비 부하 설정은 각각 ASHRAE Standard 90.1-2010와 Leadership in Energy and Environmental Design(LEED)의 제안사항에 맞추어 설정되었다. 그리고, 환기 기준은 ASHRAE Standard 62.1-2007의 오피스 건물 기준으로 설정되었다. Fig 1.에 제시된 것과 같이 시뮬레이션 결과 리포트를 검토하여 건물 모델링 과정 중 설정한 입력 값들이 제대로 결과에 반영이 되었는지 확인하는 과정을 거쳤으며, 또한 HVAC 시스템의 에너지 사용 결

과를 분석하여 모델링에 사용한 성능 곡선에 부합하는 결과가 나왔는지를 확인하는 과정을 통하여 건물 에너지 해석 결과를 검증하였다. Fig 1.에 나타난 것과 같이, GS-VRF의 에너지 저감 가능성을 해석하기 위하여 GS-VRF의 에너지 사용량을 수랭식 히트펌프(Water Source Heat Pump, WSHP)와 GSHP, 그리고 WS-VRF와 비교하였다. 모델링에 사용한 건물의 정보는 Table 1.에 정리되었다.

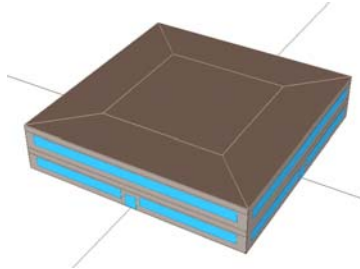


Fig 2. 3D Schematic image of a generic office building in eQUEST

Table 1. Specifications of the prototype office buildings [21]

ASHRAE Climate Zone	4
Design Temperature	Cooling mode : 29°C dry-bulb Heating mode : -18°C dry-bulb
Number of Floors	2 stories
Total Conditioned Floor Area	2,322 m ²
Floor-to-Floor Height	3 m
Window-Wall Ratio (WWR)	40%
Thermal Conductivity of Roofs	U-value 0.22 W/m ² ·°C
Thermal Conductivity of Exterior Walls	U-value 0.51 W/m ² ·°C
Thermal Conductivity of Window Glazing	U-value 2.56 W/m ² ·°C (Solar Heat Gain Coefficient 0.4)
Lighting Power Density	10.12 W/m ²
Equipment Power Density	5.53 W/m ²
Operation Schedule	Monday – Friday : 8am – 5pm Saturday, Sunday, Holiday : Closed
Thermostat set-point	Cooling mode - Occupied hours : 24.4°C - Unoccupied hours : 27.8°C Heating mode - Occupied hours : 21.1°C - Unoccupied hours : 17.8°C
Supply Air Temperature	Cooling mode : 12.8°C dry-bulb Heating mode : 40.6°C dry-bulb

건물 에너지 해석에 많이 사용되고 있는 eQUEST는 DOE-2.2 시뮬레이션 엔진을 통하여 VAV 시스템, GSHP 시스템, 수랭식 VRF 및 GS-VRF 시스템을 비롯한 다양한 HVAC 시스템을 모델링할 수 있다. 그리고 eQUEST는 G-function 방법을 사용하여 GSHP와 GS-VRF 시스템에 필요한 수직형 borehole을 모델링하여 GSHP와 GS-VRF 시스템에 들어가는 유체의 온도(Entering Water Temperature, EWT)를 계산할 수 있다 [20]. GSHP와 GS-VRF 시스템 모델링에 사용된 데이터가 Table 2.에 정리되었다.

한편, 일반적으로 지열 교환기를 잘못 설계하게 되면 지열 교환기를 통과하여 히트 펌프로 들어가는 유입수의 온도가 히트 펌프 허용 온도 구간을 벗어나는 문제가 발생하게 된다. 특히 연간

냉난방 부하가 균형적이지 않은 건물에서 이와 같은 문제가 발생되기 쉽다. 이 문제의 원인은 시간이 지나면서 건물과 땅의 열교환이 불균형적이어서 땅에 열이 차거나 빠지면서 발생하게 되는 것이다 [22]. 따라서 본 연구에서는 지열 교환기 설정과정에서 시뮬레이션 기간을 20년으로 설정하였다.

Table 2. Description of vertical ground heat exchangers for GSHPs and GS-VRF systems [20]

Depth of Boreholes	76 m
Diameter of Boreholes	0.152 m
Thermal Conductivity of Grout	1.47 W/m·K
Thermal Conductivity of Ground	2.91 W/m·K
Thermal Diffusivity of Ground	1.11 x 10 ⁻⁶ m ² /s
Fluid Type	Ethylene Glycol
Heat Exchanger Pipe Diameter (Outside)	0.0267 m
Heat Exchanger Pipe Diameter (Inside)	0.0218 m
Heat Exchanger Pipe Conductivity	0.398 W/m·K

2.2. 지열 VRF 모델링

본 연구에서 사용한 GSHP와 GS-VRF 모델링 조건은 미국 ASHRAE Standard 90.1-2010에서 정의된 조건을 따랐으며, 이러한 조건들은 Table 3.에 요약되어 있다 [21]. 앞에서 언급된 바와 같이, VRF 시스템의 장점 가운데 하나는 부분 부하 조건에서 높은 에너지 효율을 얻을 수 있다는 것이다. 하지만, 본 연구에서 사용한 eQUEST 프로그램에는 VRF 시스템의 성능 곡선이 기본으로 제공되고 있지 않기 때문에, 본 연구는 실제 수랭식 VRF 제품의 엔지니어링 데이터를 바탕으로 만든 성능곡선을 사용하였다 [23].

한편, ASHRAE Standard 90.1-2010에 따르면 closed-loop 지열교환기를 이용한 GS-VRF의 EWT 정격 조건은 냉방 모드에서 25°C, 그리고 난방 모드에서 0°C이며, 수랭식 VRF의 EWT 정격 조건은 냉방시 30°C, 난방 운전시 20°C이다. 본 연구의 목적은 GSHP와 GS-VRF의 에너지 성능 비교이기 때문에, 환기에 필요한 외부 공기 처리는 동일하게 설정되었다.

Table 3. Specifications of various HVAC systems in building energy modeling [21, 23]

System Type	Sys. 1 WSHP	Sys. 2 GSHP	Sys. 3 WS-VRF	Sys. 4 GS-VRF
Cooling Efficiency	COP : 3.52 at EWT* of 30°C	COP : 3.93 at EWT of 25°C	COP : 5.20 at EWT of 30°C	COP : 6.14 at EWT of 25°C
Heating Efficiency	COP : 4.2 at EWT of 20°C Hot water boiler (eff. 80%)	COP : 3.10 at EWT of 0°C	COP : 5.76 at EWT of 20°C Hot water boiler (eff. 80%)	COP : 2.99 at EWT of 0°C
Fans (kW/CFM)	0.000300	0.000300	0.000127	0.000127
Outside Air	Mixed Air	Mixed Air	Mixed Air	Mixed Air

* EWT: Entering water temperature

2.3. 기후 분석

앞에서 언급된 바와 같이, 한국의 기후는 미국 ASHRAE Standard 90.1-2010에서 Climate Zone 4에 속하여 있다 [21]. 본 연구에서 사용한 4 곳의 한국 기후조건이 Table 4.에 요약 정리되어 있다. Table 4.의 각 도시별 기상 데이터는 미국 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)가 관리하는 EnergyPlus에서 제공하는 기상자료이며, DOE-2.2 시뮬레이션 엔진에서 사용될 수 있도록 변환되었다 [24, 25].

Table 4. Climate characteristics for 4 selected cities in South Korea

City	ASHRAE Climate Zone	Design Temperature [26]		Annual Average Ground Temperature [23]
		Cooling	Heating	
Inchon	4	31.1°C	-10.7°C	11.3°C
Kwangju	4	32.4°C	-6.8°C	13.2°C
Kangnung	4	32.9°C	-8.2°C	12.4°C
Ulsan	4	33.1°C	-6.2°C	13.4°C

3. 결과

4개 도시에 대한 각 HVAC 시스템의 site-energy 사용량 결과는 Fig 3.와 Fig 4.에 정리되어 있으며, 각 HVAC 시스템의 source-energy 사용량 결과는 Fig 5.와 Fig 6.에 정리되어 있다. Site-energy는 건물에서 사용하는 에너지양을 의미하는 것으로서 건물 에너지 시뮬레이션을 통해 구한 결과이며, source-energy는 건물이 필요로 하는 site-energy를 공급하기 위해 생산하는데 필요한 에너지양을 의미한다. 이때 공급 과정에서 손실되는 에너지양도 source-energy 사용량 계산에 반영이 된다 [27]. 미국 Energy Star의 Technical Reference: Source Energy에 따르면, 전기의 경우 site-energy를 source-energy로 환산하는데 3.14배를 site-energy에 곱해주어야 한다 [27]. Fig 3. ~ Fig 6.에서 나타난 것과 같이 4개의 모든 도시에서 GS-VRF 시스템이 가장 적은 site-energy와 source-energy를 소비한 것으로 나타났다. 또한, GSHP와 GS-VRF가 수랭식 히트펌프와 수랭식 VRF보다 더 적은 냉난방 에너지를 사용한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는, 지열 시스템은 지열을 열원 및 열침으로 활용하기 때문에 열침 및 열원으로서는 별도의 냉각탑이나 보일러와 같은 장비가 필요하지 않기 때문이다. 지열 시스템과 비교하였을 때, 수랭식 시스템은 열침과 열원을 위해 냉각탑과 보일러를 설치하여야 한다. 즉, 수랭식 시스템은 냉각탑과 보일러가 사용하는 에너지에 의해 지열 시스템과 비교하였을 때 더 많은 냉난방 에너지를 사용하게 되는 것이다. 또한, 지열 시스템의 응축수 온도가 수랭식 시스템의 응축수 온도보다 낮게 설정되기 때문에 더 높은 에너지 효율을 확보할 수 있다.

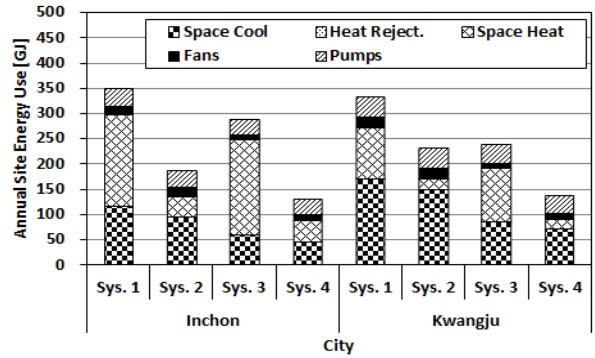


Fig 3. Annual HVAC site-energy consumptions of the prototype office buildings in Inchon and Kwangju

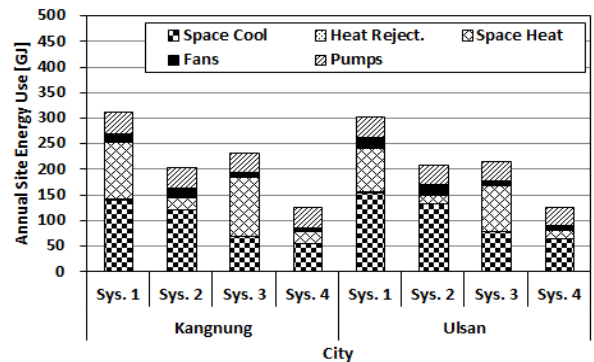


Fig 4. Annual HVAC site-energy consumptions of the prototype office buildings in Kangnung and Ulsan

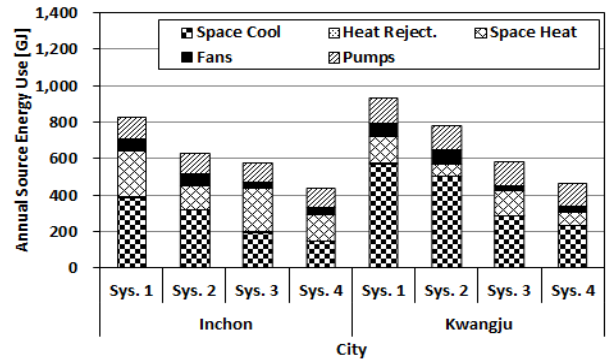


Fig 5. Annual HVAC source-energy consumptions of the prototype office buildings in Inchon and Kwangju

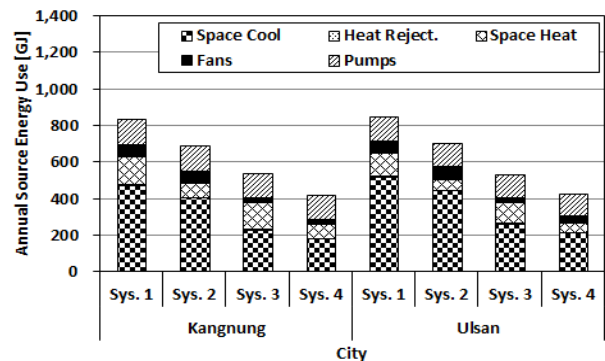


Fig 6. Annual HVAC source-energy consumptions of the prototype office buildings in Kangnung and Ulsan

4개 도시에서 GS-VRF 시스템에 의한 HVAC site-energy 및 source-energy 사용량 저감율은 Table 5.에서 정리되었다. Table 5.에서 나타난 것과 같이, GS-VRF 시스템에 의한 에너지 사용 저감율이 가장 큰 도시는 Incheon으로 나타났으며, GS-VRF 시스템을 WSHP와 비교하였을 때 에너지 저감율이 가장 큰 것으로 나타났다.

Table 5. Percent savings of annual site/source energy consumptions by GS-VRF systems

City	Percent Site-Energy Saving by GS-VRF			Percent Source-Energy Saving by GS-VRF		
	Sys. 1	Sys. 2	Sys. 3	Sys. 1	Sys. 2	Sys. 3
Incheon	63%	30%	55%	47%	30%	24%
Kwangju	59%	40%	42%	50%	40%	20%
Kangnung	60%	39%	46%	50%	39%	22%
Ulsan	58%	40%	41%	50%	40%	20%

본 연구에서 해석한 오피스 건물의 HVAC 시스템 피크 전기 에너지 수요는 Table 6.에 정리되어있다. Table 6.에서 볼 수 있듯이, 수랭식 VRF와 GS-VRF 시스템은 높은 에너지 성능으로 인하여 WSHP와 GSHP 시스템보다 피크 에너지가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 Table 3.에서 보여준 것과 같이, 각 시스템의 정격 조건에서 GS-VRF의 시스템 난방 효율이 WS-VRF보다 낮기 때문에, 난방 기간 동안 GS-VRF의 피크 전기 에너지 수요가 WS-VRF 보다 높다.

Table 6. Peak energy demand for HVAC systems of the prototype office buildings in cooling and heating operations

Peak Demand [kW]		Sys. 1	Sys. 2	Sys. 3	Sys. 4
Incheon	Cooling Mode	101	90	71	65
	Heating Mode	95	99	82	83
Kwangju	Cooling Mode	114	106	79	74
	Heating Mode	98	104	81	86
Kangnung	Cooling Mode	118	112	82	78
	Heating Mode	103	110	84	88
Ulsan	Cooling Mode	112	103	79	73
	Heating Mode	93	97	78	82

4. 결론

본 연구의 목적은 한국의 대표적인 기후에 위치한 오피스 건물에 대하여 다양한 HVAC 시스템 대비 GS-VRF의 에너지 성능을 비교 평가하는 것이었다. 이를 위하여, 본 연구는 건물 에너지

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 오피스 건물을 모델링하였으며, ASHRAE Standard 90.1-2010에서 한국 기후에 해당하는 건물 조건을 찾아 모델링에 반영하였다. GS-VRF에 사용되는 수랭식 VRF 시스템은 실제 제품의 엔지니어링 데이터를 바탕으로 모델링되었다. GS-VRF와 GSHP에 사용되는 지열 교환기 모델링을 위하여 수직형 지열교환기의 열 응답계수 모델인 G-function 방법이 사용되었다.

다양한 HVAC 시스템을 적용한 건물 에너지 해석 결과, 모델링에 사용된 4개의 한국 도시에서 GS-VRF 시스템에 의한 HVAC 시스템 site-energy 사용량 절감 비율이 WSHP 대비 58%~63%, GSHP 대비 30%~40%, WS-VRF 대비 41%~55%인 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 GS-VRF 시스템의 높은 에너지 효율과, 열원 및 열침으로 지열을 사용함으로써 별도의 냉각탑과 온수 보일러 사용이 필요하지 않았기 때문에 나타난 결과이다.

본 논문에서 제시한 결과는 GS-VRF 시스템이 앞으로 한국 기후에 적합한 친환경 오피스 건축을 구현하는데 있어서 고효율 에너지 HVAC 시스템으로서의 가능성을 보여주고 있다. 하지만, 다른 시스템과 비교하였을 때 GS-VRF 시스템의 우수성을 보여주기 위해서는, 비용 효율성도 평가하여야 할 것이다. 즉, 건물 생애주기 동안 GS-VRF가 다른 HVAC 시스템과 비교하였을 때 에너지 성능의 우수성과 함께 비용 효율성을 보여주어야 할 것이다.

Reference

- [1] U.S. Energy Information Administration, Monthly Energy Review, <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/#consumption> 2018.03.15
- [2] U.S. Energy Information Administration, 2012 CBECS Survey Data, COMMERCIAL BUILDINGS ENERGY CONSUMPTION SURVEY (CBECS), <https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2012/index.php?view=consumption#e1-e11>, 2018.02.20
- [3] 한국에너지공단, KEA 에너지 편람, 2017 Korea Energy Agency Handbook. 2017
- [4] ASHRAE Research, ASHRAE HANDBOOK – HVAC Systems and Equipment, 2012
- [5] Goetzler W., Variable Refrigerant Flow Systems, ASHRAE Journal, 2007.04, pp.24
- [6] Afify R., Designing VRF Systems, ASHRAE Journal, June 2008, pp.52
- [7] Harris A. D., VRF Market Share Increasing in US”, The NEWS Magazine, online article, Publication data 11/25/2013, <http://www.achrnews.com/articles/124870-vrf-market-share-increasing-in-us>, 2018.02.15
- [8] Krawcke N., VRF Gaining Acceptance in U.S. Marketplace, The NEWS Magazine, online article, Publication data 11/24/2014, Available online: <http://www.achrnews.com/articles/128132-vrf-gaining-acceptance-in-us-marketplace>, 2018.02.15
- [9] Koh J., Zhai J.Z., Rivas J.A., Comparative Energy Analysis of VRF and VAV Systems Under Cooling Mode, ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability, Volume 1, San Francisco, California, USA, July 19–23, 2009, pp 411-418
- [10] Kim D., Cox S.J., Cho H., Im P., Evaluation of energy savings potential of variable refrigerant flow (VRF) from variable air volume (VAV) in the U.S. climate locations, Energy Reports, Vol. 3, 2017, pp. 85-93
- [11] Zhou Y.P., Wu J.Y., Wang R.Z., Shiochi S., Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions, Energy and Buildings, Vol. 39 (2), 2007, pp. 212-220

- [12] Im P., Mini M., Munk J.D., Lee J., Cooling season full and part load performance evaluation of Variable Refrigerant Flow (VRF) system using an occupancy simulated research building”, 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue University, Indiana, USA, July 11-14, 2016, pp 10
- [13] Liu X., Hong T., Comparison of energy efficiency between variable refrigerant flow systems and ground source heat pump systems, *Energy and Buildings*, Vol. 42 (5), 2010, pp 584-589
- [14] Aynur T.N., Hwang Y., Radermacher R., Simulation comparison of VAV and VRF air conditioning systems in an existing building for the cooling season, *Energy and Buildings*, Vol. 41, 2009, pp 1143-1150
- [15] Thornton B., Wagner A., *Variable Refrigerant Flow Systems*, Pacific Northwest National Laboratory, 2012
- [16] Marcia Karr, *Ground source Variable Refrigerant Flow Heat Pumps: A Solution for Affordable Housing, Assisted Living, Hotels and Dorms*, Washington State University Extension Energy Program, 2011
- [17] Im P., Liu X., Performance Evaluation of a Ground Source Variable Refrigerant Flow (VRF) System for a University Building in Cold Climate, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2015
- [18] 김성실, 허인규, 지열이용 VRF 시스템, *지열에너지지널*, 제4권 제2호, 2008, pp. 53-62 // Kim, Seong-Sil, Hur, Inn-Ku, Ground-Source VRF Systems, *Korea Journal of Geothermal Energy*, Vol.4, No.2, 2008, pp. 53-62
- [19] Krarti, M., *Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2010
- [20] James J. Hirsch & Associates, Lawrence Berkeley National Laboratory, DOE-2.2 Building Energy Use and Cost Analysis Program, Volume 2: Dictionary, 2014
- [21] ASHRAE, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2010
- [22] Fisher, D.E., Rees, S.J., Modeling ground source heat pump systems in a building energy simulation program (ENERGYPLUS), *Building Simulation 2005 Ninth International IBPSA Conference*, Montreal, Canada, August 15-18, 2005, pp 311-318
- [23] LG Electronics U.S.A. Inc., Multi V™ Water IV Performance Data Manual, <http://www.lg-vrf.com/water-source.aspx>, 2018.02.15
- [24] Weather Data, <https://energyplus.net/weather> 2018.05.20
- [25] Weather Data & Weather Data Processing Utility Programs, 2018.02.15 http://doe2.com/index_wth.html
- [26] ASHRAE, 2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals, 2005
- [27] Energy Star, Technical Reference: Source Energy, <https://portfoliomanager.energystar.gov/pdf/reference/Source%20Energy.pdf>, 2018.03.15