



가스엔진 VRF(Variable Refrigerant Flow) 히트펌프 시스템의 운전특성 및 이코노마이저 제어를 통한 에너지 절감 평가

Evaluation of Gas Engine VRF(Variable Refrigerant Flow) Heat Pump Performance and Energy Savings of Economizer Control

김혜림* · 전종욱** · 김강수***

Kim, Hye-Rim* · Jeon, Jong-Ug** · Kim, Kang-Soo***

* Department of Architecture, Korea University, Seoul, Korea (khr5849@gmail.com)

** Coauthor, Research Planning, Korea University, Seoul, Korea (jongugjeon@gmail.com)

*** Corresponding author, Department of Architecture, Korea University, Seoul, Korea (kskim@korea.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Building energy saving has been becoming important recently, and it could be achieved by improving HVAC system efficiency and operating HVAC system properly. The purpose of this study is to analyze gas engine VRF(Variable Refrigerant Flow) heat pump performance and to investigate energy effective economizer control in Korean climate. **Method:** In EnergyPlus, temperature-dependent cooling and heating performance of gas engine VRF heat pump was modeled and simulation results were compared to the actual gas consumption of the research facility. The energy saving potentials of differential dry bulb control and differential enthalpy control were also simulated and investigated. **Result:** The efficiency of gas engine VRF heat pump increases with decreasing outdoor air dry bulb temperature in summer and increasing outdoor air wet bulb temperature in winter. Differential dry bulb control saves 8% ventilation system sensible cooling energy, but use more 4% and 1% latent cooling energy in July and August when compared to the actual building outdoor air intake schedule. In Contrast, Differential enthalpy control saves 7% sensible and 11% latent cooling energy because Korea summer climate is hot and humid. As a result, differential enthalpy control is a suitable economizer control method for Korea considering climate characteristics.

KEYWORD

가스엔진 VRF 히트펌프
이코노마이저
에너지 시뮬레이션
에너지플러스

Gas engine VRF heat pump
Economizer
Energy simulation
EnergyPlus

ACCEPTANCE INFO

Received Jan 24, 2018
Final revision received Apr 16, 2018
Accepted Apr 21, 2018

© 2018 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

녹색건축물 조성 지원법의 개정에 따라 2017년 1월 20일부터 제로에너지건축물 인증제가 시행되었다 [1,2]. 제로에너지건축물은 건축물 단열성능을 극대화하고, 태양광 등 신재생에너지를 활용하여 건축물 기능에 필요한 에너지 사용량을 최소화 하는 건축물을 이르며, 2020년에 공공건물에 제로에너지건축물 인증제도를 의무화하고 2025년에 민간건물까지 확대하는 로드맵을 수립하였다.

제로에너지건축물 인증제도를 달성하기 위해서는 공조 시스템의 효율을 개선하고 단열성능을 강화하여 건물의 냉난방에너지 사용량을 줄이는 것이 중요하다. 또한 건물의 단열과 기밀 성능이 우수해지면서 통풍이 차단되고 오염된 실내 공기를 배출할 수 없다는 문제점이 발생할 수 있으므로 재실자의 생활환경에 적합한 실내 공기질을 유지하는 것이 필요하다. 즉 공조시스템의 효율을 개선하여 건물의 에너지 사용량을 줄이면서, 동시에 올바른 환기시스템 제어 방법을 적용하여 재실자가 쾌적함을 느낄

수 있는 실내 환경을 유지해야 한다.

가스엔진 VRF(Variable Refrigerant Flow) 히트펌프는 건물 냉난방 시스템 중 하나로 전기 VRF 히트펌프보다 COP(Coefficient of performance)는 낮지만 냉방시 PER(Primary energy ratio)은 전기 VRF 히트펌프와 유사하고 난방시 PER은 전기 VRF 히트펌프보다 우수하다. PER은 1차 에너지를 기준으로 시스템의 효율을 나타내는 지수로 1차 에너지 소요량에 대한 냉난방능력을 나타낸다. 또한 가스엔진 VRF 히트펌프는 배열회수, 운전 속도 조절로 시스템 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 따라서 시스템의 특성과 성능을 분석하여 효율을 높이면 1차 에너지 사용량을 줄이고 오염물질 배출을 줄일 수 있다는 점에서 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능 분석이 필요하다고 판단된다.

이코노마이저는 외기를 도입하여 냉방부하를 제거하는 환기 시스템으로 효율적으로 운영하면 실내 공기질을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 냉방에너지도 절감할 수 있다. 국내에서는 냉난방기와 중간기를 구분해서 중간기에 외기를 100% 도입하여 공조하며 건물관리자의 경험과 판단으로 시기가 결정되는 경우가 많다. 본 연구의 사례건물 역시 <표3>과 같이 4~6월, 10~11월 기간 동안 외기냉방을 한다. 실내외 습습도를 비교하여 이코노마이저를 제어하는 것이 아니라 중간기에 계속적으로 이코노마

이저를 작동하기 때문에 오히려 에너지성능이 저하되기도 한다. 따라서 국내 기후에 적합하게 이코노마이저를 운영해야 한다.

본 연구에서는 대상건물에 설치된 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능을 분석한 뒤 동적 에너지 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus에 적용하여 실제 건물의 가스사용량과 비교하였다. 또한 대상건물에 이코노마이저를 적용하여 냉방에너지를 줄일 수 있는 제어 방법을 살펴보았다. 또한 환기시스템의 외기도입 비율, 현열 냉방에너지와 잠열 냉방에너지 사용량을 비교하여 국내 기후의 특성에 적합한 이코노마이저 제어 방법을 분석하였다.

1.2. 선행연구 고찰

히트펌프에 관한 연구를 살펴보면 Doo Yong Park(2017)의 [3]는 교육연구시설에 설치된 전기 VRF 히트펌프 시스템의 성능을 분석한 뒤 EnergyPlus에서 실제 전기 VRF 히트펌프의 거동을 모사하여 건물 시뮬레이션을 수행하였고, Lorenzo Pezzola(2016)의 [4]는 전기히트펌프, 가스히트펌프의 장단점, 효율, 경제성 등을 분석하였다. 국내에서 전기 VRF 히트펌프 뿐만 아니라 가스엔진 VRF 히트펌프 역시 사용되고 있으며, 가스엔진 VRF 히트펌프는 가스엔진과 연료의 특성 등이 시스템의 효율에 반영된다는 점에서 전기 VRF 히트펌프와 구분되기 때문에 가스엔진 VRF 히트펌프의 세부적인 운전 특성을 분석할 필요가 있다고 판단된다.

이코노마이저에 관련된 연구를 살펴보면 제어 방식에 따른 외기도입비율, 실내부하, 냉난방에너지 사용량을 비교하는 연구가 진행되어왔다. 임상훈(2002)의 [5]는 건구온도 이코노마이저 제어시 연간 약 21~25% 에너지부하를 절감할 수 있고 CO₂ 농도에 의한 DCV(Demand- Controlled Ventilation)를 병행하면 약 35% 연간에너지부하를 절감할 수 있다고 분석했다. 김효준(2016)의[6]는 엔탈피 이코노마이저 제어가 건구온도 이코노마이저 제어보다 공조기 에너지의 18%를 더 절감하여 효과적인 것으로 분석했다. Kuei-Peng Lee(2013)의 [7]는 17개 기후대에서 데이터센터를 대상으로 엔탈피 이코노마이저 제어의 에너지 절감량을 평가하였다. 고온 다습하거나 저온 건조한 기후에서는 이코노마이저 사용이 효과적이지 않고, 국내 기후와 유사한 Mixed-Humid 기후는 데이터센터에 엔탈피 이코노마이저를 적용하면 약 30% 에너지가 절감되어 이코노마이저 효용성이 높다고 분석했다. Jeong Eun Son(2015)의 [8]는 사무소 건물에서 이코노마이저 제어방식을 평가하였는데 건구온도제어가 냉동기 에너지의 5.8%, 엔탈피제어가 6.2% 냉동기 에너지를 절약하여 다습한 여름철 외기에서 건구온도 제어보다 엔탈피제어가 효율적인 것으로 분석했다. 지금까지의 국내 이코노마이저 제어에 대한 연구는 제어 방식에 따른 에너지 사용량 비교와 실내 환경 연구에 그쳤고, 기후와 시스템 작동에 대한 상관관계에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 이코노마이저 제어는 외기를 이용해서 실내 냉방 부하를 절감하는 것이 목적이므로 지역의 기후 특성에 따른 이코노마이저 제어에 대한 분석이 필요하다고 판단된다.

2. 이론

2.1. 가스엔진 VRF 히트펌프

가스엔진 VRF 히트펌프는 가스엔진으로 압축기를 작동하는 히트펌프이며 가스엔진, 압축기, 팽창밸브, 응축기, 증발기로 이루어진다. 이 시스템은 실내 부하에 따라 엔진과 압축기가 가변속 운전을 하기 때문에 부분부하 효율이 높다. 가스 엔진의 배기가스와 엔진 냉각수에서 배열을 회수하여 난방이나 제상(defrost)에 이용한다 [9]. 응축기측 건구온도와 증발기측 습구온도에 따라서 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉난방출력과 냉난방 에너지 소모량이 달라진다. (식1)은 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉방출력 수정함수로 정격냉방출력에 응축기측 실외건구온도와 증발기측 실내습구온도를 대입한 $CAPFT_{cooling}$ 를 곱하면 해당 온도에서의 냉방출력을 알 수 있다. (식2)는 냉방에너지 소모량 수정함수이고 정격가스소모량에 $EIRFT_{cooling}$ 를 대입하면 해당 온도에서의 가스에너지 소모량을 알 수 있다. (식3)은 난방출력 수정함수, (식4)는 난방에너지 소모량 수정함수이다 [10,11].

$$CAPFT_{cooling} = a + b(T_{ub,i}) + c(T_{ub,i})^2 + d(T_c) + e(T_c)^2 + f(T_{ub,i})(T_c) \dots\dots (식1)$$

$$EIPFT_{cooling} = a + b(T_{ub,i}) + c(T_{ub,i})^2 + d(T_c) + e(T_c)^2 + f(T_{ub,i})(T_c) \dots\dots (식2)$$

$$CAPFT_{heating} = a + b(T_c) + c(T_c)^2 + d(T_{ub,i}) + e(T_{ub,i})^2 + f(T_{ub,i})(T_c) \dots\dots (식3)$$

$$EIPFT_{heating} = a + b(T_c) + c(T_c)^2 + d(T_{ub,i}) + e(T_{ub,i})^2 + f(T_{ub,i})(T_c) \dots\dots (식4)$$

여기서,

$CAPFT_{cooling}$: Heat pump cooling capacity ratio modifier

$EIRFT_{cooling}$: Cooling energy input ratio modifier

$CAPFT_{heating}$: Heat pump heating capacity ratio modifier

$EIRFT_{heating}$: Heating energy input ratio modifier

a - f: equation coefficients for modifier

$T_{ub,i}$: wet-bulb temperature of air entering the evaporator (° C)

T_c : temperature of air entering an air-cooled condenser (° C)

2.2. 이코노마이저(Economizer)

1) 이코노마이저 개념

이코노마이저는 냉방부하를 제거하기 위하여 자동으로 댐퍼를 조절하여 외기를 도입하는 시스템이다 [12]. ‘건축물의 에너지절약 설계기준’에 따르면 외기를 도입하여 냉방부하를 감소시킬 수 있는 경우 이코노마이저를 사용할 수 있다 [13].

2) ANSI/ASHREA 기준

외기 온도나 습도가 높아지면 외기 도입이 건물의 에너지 사용량 증가를 유발하므로 이런 경우 최소한의 외기를 도입해야 에너지를 절약할 수 있다. 따라서 ASHREA는 <표1>과 같이 Degree-day를 기준으로 International climate zone을 정의하고, <표2>와 같이 기후대에 따라 이코노마이저 제어방법을 제시하고 있다 [12]. Degree-day는 각 기후대가 냉난방이 얼마나 필요한지 온도를 기준으로 판별하기 위해서 만든 지수이다. Cooling degree-day base 10° C(CDD10° C)는 일평균온도가 10° C 이상일 때, 1년 동안 일평균온도와 10° C의 차를 모두 더한 값으로 연간 냉방이 필요한 시간을 이른다. Heating degree-day base 18° C(HDD18° C)는 일평균온도가 18° C

이하일 때, 1년 동안 일평균온도와 18° C의 차를 모두 더한 값으로 연간 난방이 필요한 시간을 이른다.

Table 1. International Climate Zone Definitions [12]

Name	Thermal Criteria
Very Hot-Humid(1A), Dry(1B)	5000<CDD10°C
Hot-Humid(2A), Dry(2B)	3500<CDD10°C≤5000
Warm-Humid(3A), Dry(3B)	2500<CDD10°C≤3500
Warm-Marine	CDD10°C≤2500 and HDD18°C≤2000
Mixed-Humid(4A), Dry(4B)	CDD10°C≤2500 and 2000<HDD18°C≤3000
Mixed-Marine	2000<HDD18°C≤3000
Cool-Humid(5A), Dry(5B), Marine(5C)	3000<HDD18°C≤4000
Cold-Humid(4A), Dry(4B)	4000<HDD18°C≤5000
Very Cold	5000<HDD18°C≤7000
Subarctic	7000<HDD18°C

이처럼 기후대에 따라 이코노마이저 제어를 분류한 것은 외기의 상태가 이코노마이저 작동시 건물의 냉방에너지에 영향을 미치기 때문이다. 예컨대 덥고 습한 기후대에서 건구온도 제어방법을 적용하면 외기도입으로 잠열 부하가 증가할 수 있다 [14].

4장에서는 기상자료포털 [15]에서 제공하는 2016년 일평균 기온 자료를 이용하여 국내 4지역의 기후대를 분석한 뒤 적용 가능한 이코노마이저 제어방법을 살펴보았다. 예컨대 서울의 경우 Degree-day 기준이 Mixed-Humid(4A)에 가장 가깝기 때문에 외기 건구온도를 기준으로 이코노마이저를 제어하는 Fixed dry bulb와 Differential dry bulb보다 엔탈피를 기준으로 제어하는 Fixed enthalpy와 Differential enthalpy가 적합한 것으로 보인다. 4장에서 지역별로 기후를 분석한 뒤, 대상건물의 환기시스템을 담당하는 공조기에 건구온도제어(Differential dry bulb)와 엔탈피제어(Differential enthalpy) 방식을 적용하여 시뮬레이션 하였고 기후와 이코노마이저 제어의 상관관계를 고찰하였다. <표2>에서 설명하듯이 건구온도제어는 외기 온도가 실내보다 낮을 경우 Bypass로 외기를 100% 도입하고 엔탈피제어는 외기 엔탈피가 실내보다 낮을 경우 Bypass로 외기를 100% 도입하는 이코노마이저 제어 방식이다.

Table 2. Control Settings for Air Economizers [12]

Climate	Differential dry bulb	Differential enthalpy
	1b,2b,3b,3c,4b,4c, 5a,5b,5c,6a,6b,7,8	All (4a, 3a included)
Required High Limit (Economizer Off When)	$T_{OA} > T_{RA}$ Outdoor air temperature exceeds return air temperature	$h_{OA} > h_{RA}$ Outdoor air dry bulb exceeds return air enthalpy

3. 가스엔진 VRF 히트펌프가 설치된 건물의 에너지 측정과 시뮬레이션 결과 비교

3.1. 대상건물 개요

본 연구에서는 K대학교의 교육 연구 시설을 대상 건물로 선정하였다.

Table 3. Building and simulation image

Building	Simulation
----------	------------

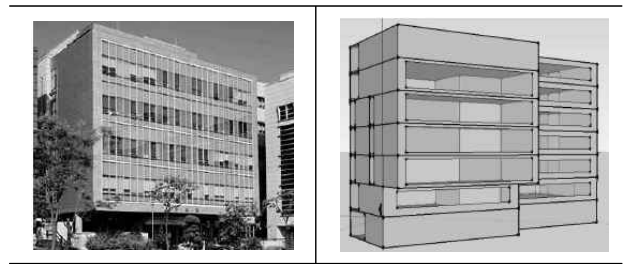


Table 4. Building Information

Category	
Building type	Research facility
Number of stories	7
Orientation	South-east
Gross floor area	5,344 m ²
Exterior wall thermal transmittance	0.49 W/(m ² ·k)
Set point temperature	Cooling/Heating set point: 25°C/22°C
Occupancy	Lecture hall: 10, m ² /person Office: 40 m ² /person Corridor: 80 m ² /person
Equipment	Lecture hall & Office: 20 W/m ² Corridor: 12 W/m ²
Lighting	Lecture hall & Office: 16 W/m ² Corridor: 3 W/m ²
Central HVAC	CAV (4 AHU, 2 GHP)
Decentralized HVAC	13 GHP
	Cooling/Heating Capacity: 71.0/80.0(kW)
	Cooling/Heating Energy Consumption: 58.5/57.2(kW)
HVAC operating time	Weekdays: 8a.m ~ 18p.m
	Saturday: 8a.m ~ 13p.m
Outdoor air fraction	Jan~Mar, Jul~Aug, Nov~Dec:30% Apr~Jun, Sep~Oct:100%
Measurement period	Jan 2016 ~ Dec 2016 (12 months)

<그림1>은 대상건물의 냉난방 설비 시스템을 계통도이다.

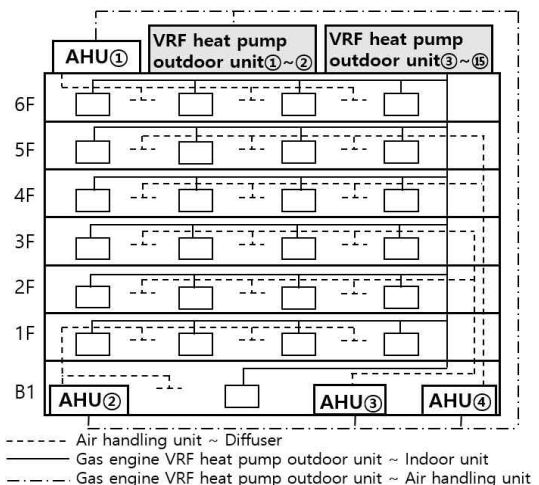


Fig 1. HVAC system of base building

대상건물은 실내부하를 담당하는 개별공조와 환기를 담당하는 중앙공조로 구성된다. 모델과 용량이 동일한 15대의 가스엔진 VRF 히트펌프 실외기 중 2대가 공조기 4대의 냉난방 DX 코일의 열원이다. 4대의 공조기는 Constant air volume(CAV) 방식으로 대상건물을 환기한다. 이코노마이저가 작동하면 공조기 내 Bypass 덕트로 외기가 100% 도입된다. 가스엔진 VRF 히트펌프 실외기 13대는 실내기 71대와 연결되어 개별공조를 담당한다.

3.2. EnergyPlus 설비시스템 모델링

〈그림2〉는 대상건물의 설비시스템을 EnergyPlus에서 구현한 계통도이다. 중앙공조는 Unitary heat pump system을 이용하였고 외기를 도입하는 Outdoor air mixer에서 이코노마이저를 제어하도록 모델링했다. 개별공조는 OutdoorUnit:VRF(실외기)와 여러 대의 IndoorUnit:VRF(실내기)가 연결된다. Unitary heat pump system과 IndoorUnit:VRF의 DX coil에 3.3장에서 분석한 가스엔진 VRF 히트펌프의 운전 성능을 입력하였다.

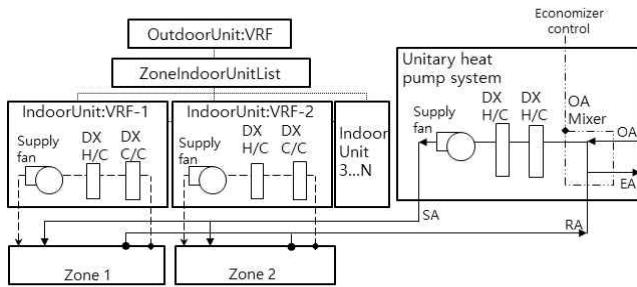


Fig 2. HVAC modeling in EnergyPlus

3.3. 가스엔진 VRF 히트펌프 모델링

일본 A사에서 제공하는 대상 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능 데이터를 바탕으로 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉난방기 운전특성을 반영한 (식1)~(식4) 성능곡선을 회귀분석법으로 도출하여 동적 에너지 시뮬레이션 프로그램 EnergyPlus에 적용하였다. 〈그림3~6〉은 대상건물의 공조기의 DX 코일 및 개별 냉난방에 동일하게 적용된 가스엔진 VRF 히트펌프 냉난방 운전특성이다.

〈그림3〉은 냉방시 실내습구온도가 19° C일 때 실외건구온도 변화에 따른 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉방능력비(Cooling capacity ratio)를 나타낸 그래프이며, 냉방능력비는 정격냉방능력에 대한 냉방능력이다. 냉방기에 외기 건구온도가 높을수록 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉방능력은 감소함을 알 수 있다.

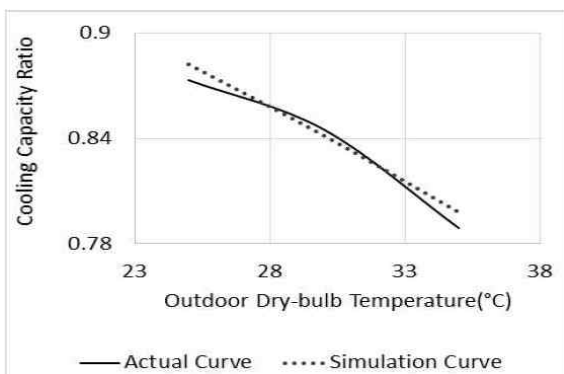


Fig 3. Cooling capacity ratio comparison between Actual curve and Simulation curve (Indoor wet-bulb = 19°C)

〈그림4〉는 냉방시 실내습구온도가 19° C 일 때 실외건구온도 변화에 따른 가스엔진 VRF 히트펌프의 가스소모량비(Cooling energy input ratio)를 나타낸 그래프이고, 가스소모량비는 냉방시 정격가스소모량에 대한 가스소모량을 나타낸다. 냉

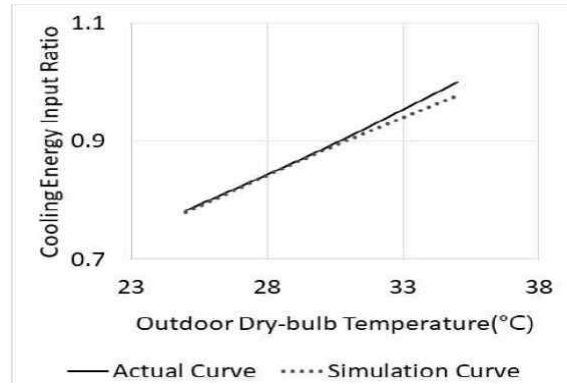


Fig 4. Cooling energy input ratio comparison between Actual curve and Simulation curve (Indoor wet-bulb = 19°C)

방기에 외기 건구온도가 높을수록 가스엔진 VRF 히트펌프의 가스소모량은 증가함을 알 수 있다. 〈그림3,4〉에서 나타나듯이 냉방기에는 외기 건구온도가 높을수록 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉방능력은 감소하고 가스소모량은 증가하므로 냉방효율이 감소한다. 〈그림3,4〉에서 Actual curve는 실제 대상 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능곡선이고 Simulation curve는 시뮬레이션 성능곡선으로 시뮬레이션이 실제 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉방기 거동을 유사하게 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

〈그림5〉는 난방시 실내건구온도가 16° C 일 때 실외습구온도 변화에 따른 가스엔진 VRF 히트펌프의 난방능력비(Heating capacity ratio)를 나타낸 그래프이며 난방능력비는 정격난방능력에 대한 난방능력이다. 난방기에 외기 습구온도가 낮을수록 가스엔진 VRF 히트펌프의 난방능력이 감소함을 알 수 있다.

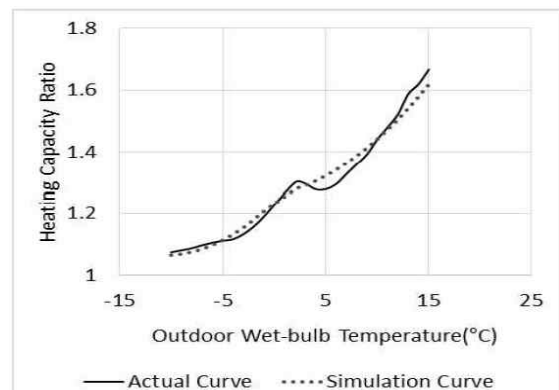


Fig 5. Heating capacity ratio comparison between Actual curve and Simulation curve (Indoor dry-bulb = 16°C)

〈그림6〉은 난방시 실내건구온도가 16° C 일 때 실외습구온도 변화에 따른 가스엔진 VRF 히트펌프의 가스소모량비(Heating energy input ratio)를 나타낸 그래프이고 가스소모량비는 난방시 정격가스소모량에 대한 가스소모량을 나타낸다. 난방기에 외기 습구온도가 낮을수록 가스엔진 VRF 히트펌프의 가스소모량은 증가함을 알 수 있다. 〈그림5,6〉에서 나타나듯이 난방기에는 외기 습구온도가 낮을수록 가스엔진 VRF 히트펌프의 난방능력이 감소하고 가스소모량이 증가하므로 난방효율이 감소한다. 〈그림5,6〉에서 Actual curve와 Simulation curve가 유사하므로 시뮬레이션이 실제 가스엔진 VRF 히트펌프의 난방기

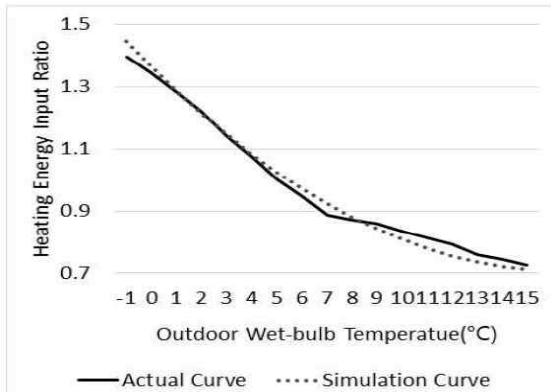


Fig 6. Heating energy input ratio comparison between Actual curve and Simulation curve (Indoor dry-bulb = 16°C)

구동을 유사하게 모사하고 있음을 알 수 있다.

〈표5〉는 실제 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능곡선(Actual Curve)과 에너지 시뮬레이션에서 구현한 성능곡선(Simulation Curve)의 오차를 나타낸다. MBE가 -1.06%이내, Cv(RMSE)가 3.16%이내로 에너지 시뮬레이션이 대상건물에 설치된 가스엔진 VRF 히트펌프의 구동을 유사하게 구현한다고 판단된다.

Table 5. MBE and Cv(RMSE) of Simulation curves

Curve name	MBE	Cv(RMSE)
CAPFT _{cooling}	-1.06%	1.68%
EIRFT _{cooling}	0.00%	3.16%
CAPFT _{heating}	0.00%	2.41%
EIRFT _{heating}	0.00%	2.85%

3.4. 시뮬레이션 결과 및 검증

〈그림7〉은 측정기간(2016년 1월~2016년 12월)동안 대상건물의 실제 가스사용량과 가스엔진 VRF 히트펌프 성능곡선을 중앙 및 개별 냉난방에 적용하여 수행한 건물 에너지 시뮬레이션 결과를 월별로 비교한 그래프이다.

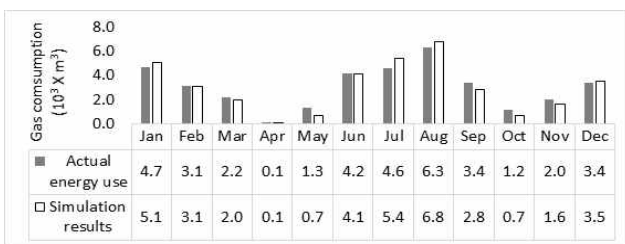


Fig 7. Comparison between actual gas consumption and simulation results

연간 대상건물의 가스사용량은 36,509Nm³, 시뮬레이션 결과는 35,947Nm³이다. MBE 1.54%, Cv(RMSE) 13.50%로 미국 에너지성[16]에서 제시하는 오차 범위에 부합한다. 월 단위로 비교할 경우 MBE 허용오차범위는 ±5%, Cv(RMSE) 허용오차범위는 15%이다. MBE와 Cv(RMSE)는 식(5)~(8)와 같다.

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{period} (S - M)_{interval}}{\sum_{period} M_{interval}} \times 100 \dots\dots\dots (식5)$$

$$RMSE_{period} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{interval}^2}{N_{interval}}} \dots\dots\dots (식6)$$

$$A_{period} = \sum_{period} M_{interval} \div N_{interval} \dots\dots\dots (식7)$$

$$C_v(RMSE_{period}) = RMSE_{period} \div A_{period} \times 100 \dots\dots (식8)$$

여기서,

S : Simulated energy consumption during the time interval

M : Measured energy consumption during the time interval

N_{interval} : Number of time intervals in period

이와 같이 3장에서는 가스엔진 VRF 히트펌프의 냉난방능력을 적용한 에너지 시뮬레이션을 실시하였고, 대상 건물의 실제 에너지 사용량과 시뮬레이션 결과가 유사함을 확인하였다. 4장에서는 에너지 사용량을 줄이는 방안을 모색하기 위해서 현재 건물의 공조시스템 및 운영스케줄에 이코노마이저를 적용하여 시뮬레이션 하였다. 현재 건물의 공조 시스템 및 운영 스케줄인 Base case를 기준으로 이코노마이저 제어의 에너지 절감 효과를 평가하였다.

4. EnergyPlus 시뮬레이션을 통한 환기시스템의 이코노마이저 제어 평가

4.1. 국내 Climate Zone

국내 기후에 적합한 이코노마이저 제어방법을 분석하기 위해서 2016년도 서울, 대구, 부산, 제주도의 Cooling degree-day와 Heating degree-day를 산출한 뒤 〈표1〉의 International climate zone 정의에 따라 각 지역의 Climate zone을 결정하였다. 기상자료개방포털 [15]에서 제공하는 지역별 일 평균기는 자료로 Cooling Degree-day base 10° C와 Heating Degree-day base 18° C를 산출하였다. 〈표6〉은 지역별 Climate Zone을 나타내며 서울과 대구는 Mixed-Humid 4A, 부산과 제주는 Warm-Humid 3A에 가장 가까운 것으로 판단된다.

Table 6. Degree-day and climate zone of 4 locations

Location	CDD10°C	HDD18°C	Zone Number
Seoul	2520.6	2572.9	4A
Daegu	2537.4	2146.5	4A
Busan	2618.8	1707.7	3A
Jeju-do	2890.4	1388.2	3A

〈그림8〉은 연간 서울 기후에서 건구온도 기준으로 이코노마이저를 제어하면 에너지 냉방에너지 소모량이 증가하는 기후대를 습공기선도에 표시한 그림이다. 해당 기후대에서 건구온도를 기준으로 이코노마이저를 제어할 경우 냉방기에 온도는 실내보다 낮지만 습도는 실내보다 높은 외기가 도입되므로 잠열 부하가 증가한다. ASHREA 기준에 따르면 국내 기후대와 유사한 4A, 3A에서는 건구온도 이코노마이저 제어보다 엔탈피 이코노마이저 제어가 적합한데[12], 실제로 각 이코노마이저 제어가 국내 기후에서 냉방에너지 절감에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

4.2. EnergyPlus 이코노마이저 모델링 및 제어 방법

〈그림9〉는 환기시스템의 이코노마이저 제어 방법이다. 외기

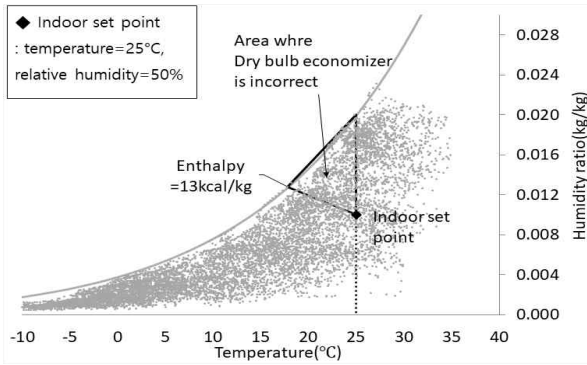


Fig. 8. Annual outdoor air condition in Seoul and economizer control errors [14]

와 환기 센서에서 측정된 공기의 온도 혹은 엔탈피가 이코노마이저 컨트롤러로 전송된다. 이코노마이저 컨트롤러에서 외기 댐퍼, 혼합 댐퍼, 배기 댐퍼를 조정하여 이코노마이저를 제어한다.

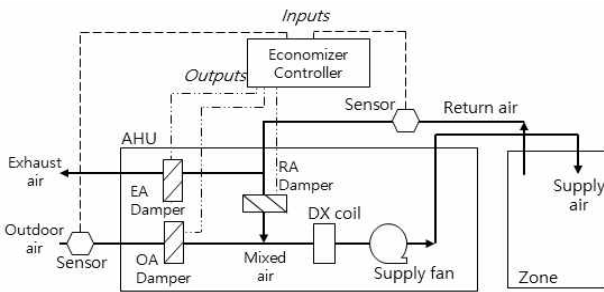


Fig.9 Economizer control schematic

건구온도 제어(Differential dry bulb) 방법은 다음과 같다. 센서가 외기와 환기의 온도를 측정하면 이코노마이저 컨트롤러에서 두 온도를 비교한다. 만약 외기온도가 환기온도보다 높으면 컨트롤러가 외기댐퍼(OA damper) 30%, 환기댐퍼(RA damper) 70%, 배기 댐퍼(EA damper) 30% 열리도록 제어한다. 이에 외기풍량은 급기풍량의 30%인 최소외기도입량을 유지하며 이 때 환기횟수는 0.9ACH이다. 만약 외기온도가 환기온도보다 낮으면 컨트롤러는 외기댐퍼 100%, 환기댐퍼 0%, 배기댐퍼 100% 열도록 제어한다. 이때 외기풍량이 급기풍량의 100%로 환기 횟수는 3ACH이다. DX coil은 혼합공기(Mixed air)를 실내 설정온도에 따라 냉방한다. 이코노마이저 제어시 최소외기도입비율은 현재 대상건물의 최소외기도입비율인 30%와 동일하게 적용하였다.

엔탈피 제어(Differential enthalpy) 방법은 다음과 같다. 센서가 외기와 환기의 엔탈피를 측정하면 이코노마이저 컨트롤러에서 두 엔탈피를 비교한다. 만약 외기엔탈피가 환기엔탈피보다 높으면 컨트롤러가 외기 댐퍼 30%, 환기댐퍼 70%, 배기 댐퍼 30% 열리도록 제어한다. 이에 외기풍량은 급기풍량의 30%인 최소외기도입량을 유지한다. 만약 외기엔탈피가 환기엔탈피보다 낮으면 컨트롤러는 외기댐퍼 100%, 환기댐퍼 0%, 배기댐퍼 100% 열려서 외기풍량이 급기풍량의 100%를 유지하도록 제어한다.

〈그림10〉은 이코노마이저 제어시 외기댐퍼와 환기댐퍼의 개구율을 나타낸다. 대상건물에 설치된 환기시스템은 정풍량 방식이므로 급기풍량은 일정하고 이코노마이저 설정에 따라 외기와 환기의 도입 비율이 달라진다. 외기댐퍼와 혼합댐퍼 개구율에

따라 혼합공기를 구성하는 외기와 환기의 비율이 결정된다. 이코노마이저를 작동하지 않으면 외기와 환기는 30:70의 비율로 혼합된다. 이코노마이저가 작동되면 환기는 모두 건물 밖으로 배출되고 외기가 100% 도입된다.

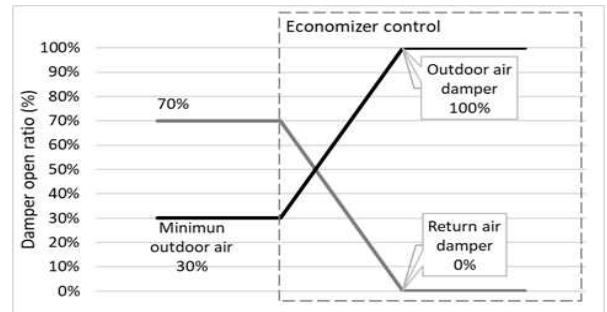


Fig.10 Economizer control and damper open ratio

이코노마이저를 작동하지 않아 외기도입비율이 30%일 때 대상 건물의 재실자당 환기량은 30CMH/인, 이코노마이저를 작동할 때 재실자당 환기량은 100CMH/인이다. ‘건축물의 설비기준등에 관한 규칙’ [17]에 따르면 업무시설의 필요환기량은 29CMH/인으로 이코노마이저 운영여부와 무관하게 필요환기량 기준을 충족한다. 이에 대상건물의 환기시스템의 외기도입량 결정시 실내이산화탄소 농도를 추가로 고려하지 않았다. 4.6장에서 이코노마이저 제어에 따라 환기시스템을 작동했을 때 실내 이산화탄소 농도가 ‘실내공기질 관리법 시행규칙’ [18]의 실내공기질 기준인 1000ppm 이하로 유지되는지 시뮬레이션으로 확인하였다.

냉방에너지 사용기간인 5월부터 10월까지 대상 건물이 위치한 서울 기후에서 시뮬레이션 하였다. 4.3.장에서 이코노마이저 제어 방법에 따른 외기 상태와 환기를 담당하는 공조기 외기도입비율의 관계를 살펴보고, 4.4장~4.5장에서 이코노마이저 제어 방법에 따른 환기시스템의 냉방에너지를 분석하였다.

4.3. 이코노마이저 제어방식에 따른 외기도입비율

1) 건구온도제어와 엔탈피제어의 이코노마이저 제어방식

건구온도제어와 엔탈피제어의 차이점을 분석하기 위하여 7월 1일 하루 동안 각 제어방식에 따른 외기도입비율을 살펴보았다. 외기도입비율은 급기 풍량에 대한 외기 풍량으로 계산된다.

〈그림11〉는 7월 1일 외기와 실내공기의 건구온도와 엔탈피를 나타낸다. 9시~11시에는 외기 온도가 실내온도보다 낮지만 외기 엔탈피는 실내 엔탈피보다 높다.

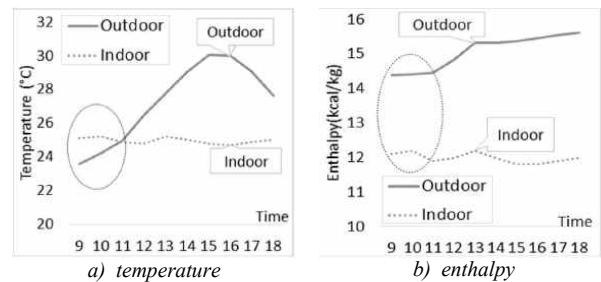


Fig. 11. Outdoor and indoor air condition on 1th July

〈그림12〉은 7월 1일 이코노마이저 제어방법에 따른 외기도입

비율을 나타낸다. 9시~11시 실외 온도가 실내 온도보다 낮으므로 건구온도제어시 이코노마이저가 작동하여 외기 도입량이 증가한다. 반면 9시~11시 실외 엔탈피는 실내 엔탈피보다 높으므로 엔탈피제어시 이코노마이저가 작동하지 않는다.

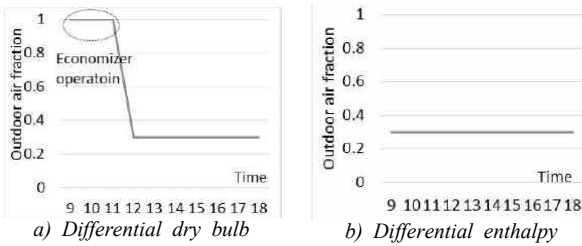


Fig 12. Economizer control and outdoor air fraction on 1st July

2) 외기 온도와 이코노마이저 제어방식의 외기도입비율

이코노마이저 제어방식에 따른 외기 온도와 외기도입비율의 관계를 분석하였다. <그림13>은 5월부터 10월까지 건구온도제어시 외기온도와 외기도입비율을 나타내고 <그림14>는 5월부터 10월까지 엔탈피제어시 외기온도와 외기도입비율을 나타낸다. <그림 13,14>에서 건구온도제어와 엔탈피제어 모두 실외건구온도가 실내 냉방 기준온도인 25° C 이상일 때 이코노마이저가 작동하지 않는 것을 알 수 있다.

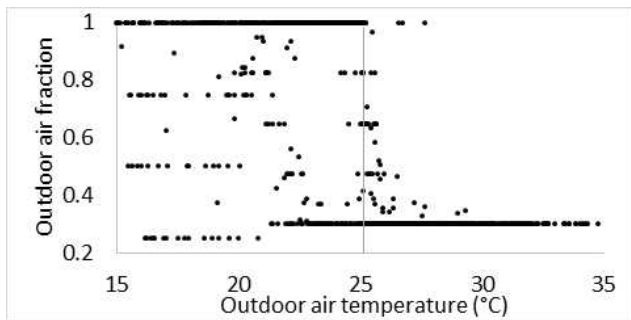


Fig 13. Outdoor air temperature and air system outdoor air fraction of Differential dry bulb from May to October

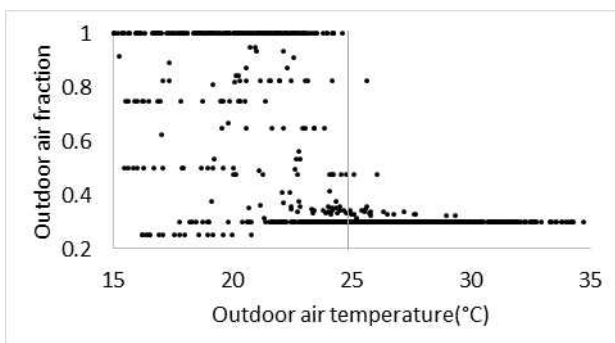


Fig 14. Outdoor air temperature and air system outdoor air fraction of Differential enthalpy from May to October

3) 외기 엔탈피와 이코노마이저 제어방식의 외기도입비율

이코노마이저 제어방식에 따른 외기 엔탈피와 외기도입비율의 관계를 분석하였다. <그림15>은 5월부터 10월까지 건구온도제어의 외기엔탈피와 외기도입비율을 나타내고 <그림16>는 엔탈피제어의 외기엔탈피와 외기도입비율을 나타낸다.

실내 설정 온도는 25° C이고 실내 설정 상대습도는 50%이므로 실내 엔탈피는 13kcal/kg으로 유지된다. 건구온도제어는 외기 온도가 25° C 이하이면 외기 상대습도가 50% 이상인 경우에도 외기를 도입한다. 따라서 <그림15>에서건구온도제어는 엔탈피가 실내 엔탈피인 13kcal/kg 이상일 때에도 이코노마이저가 작동하는 경우가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면 엔탈피제어는 외기 엔탈피가 25° C 이하인 경우에도 상대습도가 50% 이상이면 외기를 도입하지 않는다. 따라서 <그림16>에서 엔탈피제어는 외기가 13kcal/kg 이상일 때 이코노마이저가 작동하지 않는 것을 확인할 수 있다.

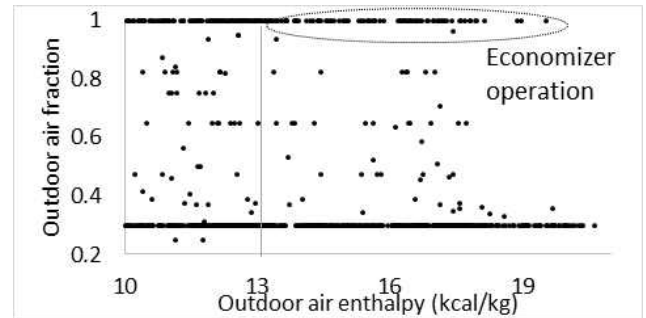


Fig 15. Outdoor air enthalpy and air system outdoor air fraction of Differential dry bulb from May to October

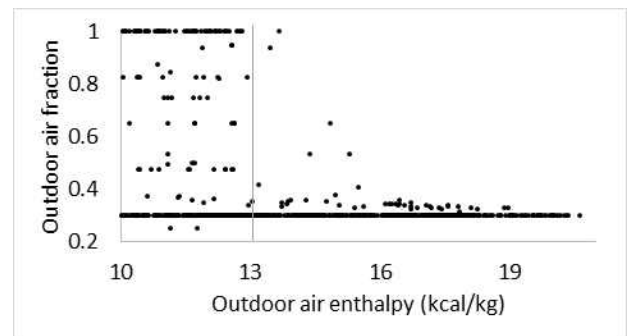


Fig 16. Outdoor air enthalpy and air system outdoor air fraction of Differential enthalpy from May to October

4.4. 이코노마이저 제어방식에 따른 환기시스템 현열 및 잠열 냉방에너지 소모량

이코노마이저 제어 방식이 환기시스템인 공조기의 냉방에너지에 미치는 영향을 분석하였다. 환기시스템의 냉방에너지는 3.2.장에서 분석한 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능이 반영된 공조기의 DX코일의 운전특성을 반영한 결과이다. 대상건물의 환기시스템에 이코노마이저 제어를 적용할 경우 DX coil의 냉방 에너지를 사용하지 않고 외기만을 이용해서 냉방할 수 있는 기간은 5월~10월 중 5월 1일~10일, 10월 20일~31일이다. 5월~10월 중 이를 제외한 기간에는 이코노마이저 제어를 하는 경우에도 DX coil로 외기를 추가로 냉방한다.

<그림17>는 5월~10월 이코노마이저 제어방식에 따른 환기시스템의 월별 현열 냉방에너지를 나타낸다. Base case는 대상건물의 실제 외기도입 스케줄을 적용한 경우로 5,6,9,10월은 외기도입율 100%, 7,8월은 외기도입율 30%이다. 건구온도제어를 적용하면 Base case 대비 월별 현열 냉방에너지가 2~15% 절감되어 평균 8% 현열 냉방에너지가 절감된다. 엔탈피제어는

Base case 대비 월별 현열 냉방에너지가 0~14% 절감되어 평균 7% 현열 냉방에너지가 절감된다. 두 가지 제어방식 모두 현열

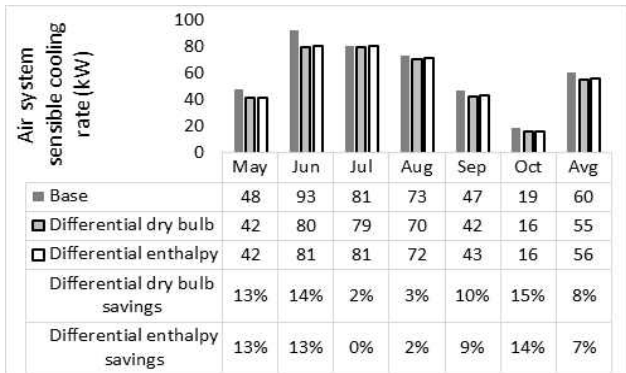


Fig 17. Economizer control and air system sensible cooling rate

냉방에너지를 절감하며, 건구온도제어가 건구온도를 기준으로 외기도입량을 결정하기 때문에 현열 냉방에너지 절감에 더 효율적인 것으로 분석된다.

〈그림18〉은 5월~10월 이코노마이저 제어에 따른 환기시스템의 월별 잠열 냉방에너지를 나타낸다. 건구온도제어를 적용하면 Base case 대비 5,6,9,10월에는 잠열 냉방에너지가 20~27% 절감되지만 7,8월에는 잠열 냉방에너지가 10%, 7% 증가한다. 이는 4.3장에서 분석했듯이 건구온도제어는 외기 온도가 실내 온도인 25° C보다 낮으면 외기 엔탈피가 실내엔탈피인 13kcal/kg보다 높을 때에도 이코노마이저가 작동하므로 외기에 의한 잠열부하가 증가하기 때문이다. 엔탈피제어는 Base case 대비 월별 잠열 냉방에너지가 0~33% 절감된다. 건구온도제어는 평균 2%, 엔탈피제어는 평균 11% 잠열 냉방에너지를 절감한다.

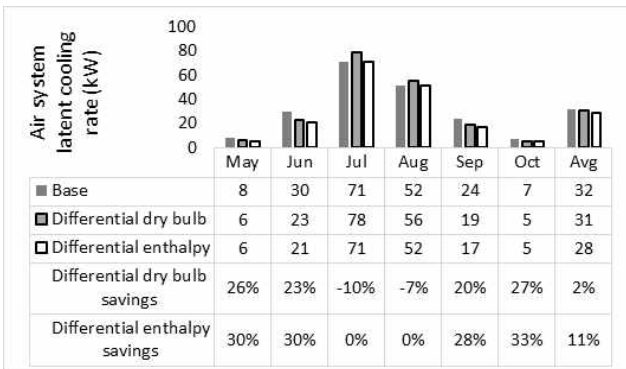


Fig 18. Economizer control and air system latent cooling rate

이처럼 건구온도제어는 현열에너지 절감에 효과적이지만 외기 습도가 높은 7,8월에 잠열에너지를 증가시킨다. 반면 엔탈피제어는 현열에너지와 잠열에너지 절감에 모두 효과적이다.

4.5. 이코노마이저 제어방식에 따른 환기시스템 총 냉방 에너지 소모량

이코노마이저 제어방식에 따른 총 냉방에너지 소비량을 비교하여 국내 기후에 적합한 이코노마이저 시스템을 분석하였다. 〈그림19〉은 5월~10월 이코노마이저 제어에 따른 환기시스템의 월별 총 냉방에너지 소모량이다.

건구온도제어를 적용하면 5,6,9,10월에는 환기시스템의 총

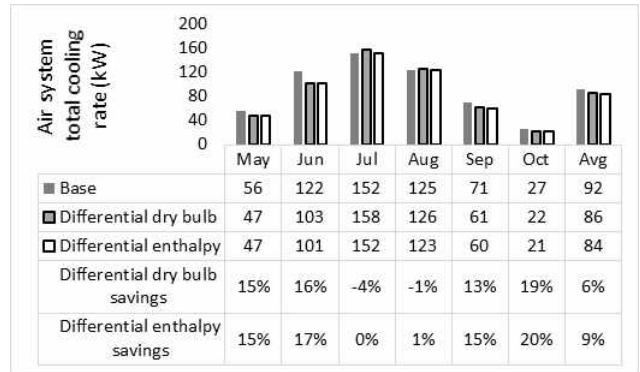


Fig 19. Economizer control and air system total cooling rate

냉방에너지가 절감하지만 외기습도가 높은 7,8월에는 냉방에너지가 4%, 1% 증가한다. 이는 7,8월에는 외기 습도가 높아 외기 도입으로 인한 잠열부하가 냉방에너지에 미치는 영향이 크기 때문이다. 엔탈피제어는 5~10월 월별 냉방에너지가 0~20% 절감된다.

건구온도제어는 평균 6%, 엔탈피제어는 평균 9% 총 냉방에너지를 절감한다. 즉 국내 기후에서는 건구온도제어를 적용하면 7,8월 잠열에너지 소모량이 증가하므로 외기 엔탈피를 기준으로 이코노마이저를 제어하는 엔탈피제어가 적합한 것으로 판단된다.

4.6. 이코노마이저 제어방식에 따른 실내 이산화탄소 농도

대상 환기시스템은 실내 이산화탄소 농도에 따라 외기도입량을 제어하지 않는다. 이에 에너지 절감에 가장 유리한 엔탈피제어를 적용하여 환기할 경우 실내 이산화탄소 농도에 대한 평가가 필요하다. 〈표7〉은 5월~10월 기간 동안 7시~18시의 실내 이산화탄소 농도를 시뮬레이션으로 평가한 결과이다. Case1은 설계 재실밀도(표4), Case2는 설계 재실밀도의 2배인 경우이다. 시뮬레이션에서 적용한 외기의 이산화탄소 농도는 400ppm이다.

Table 7. Carbon dioxide concentration according to people (Differential enthalpy)

	400 ~5000 ppm	500 ~600 ppm	600 ~700 ppm	700 ~800 ppm	800 ~900 ppm	900 ~1000 ppm	1000 ~1100 ppm
Case1 (hours)	257	267	889	123	-	-	-
Case2 (hours)	128	129	128	343	681	76	51

Case1은 실내 이산화탄소 농도가 400~750ppm으로 유지되었다. '실내공기질 관리법 시행규칙'[18] 다중이용시설의 이산화탄소 유지기준은 1000ppm이다. 이에 대상건물의 환기시스템에 건구온도와 엔탈피제어를 적용할 때 실내 공기질이 적정 수준으로 유지되는 것으로 판단된다. 반면 대상건물의 재실밀도를 2배로 늘리면 실내 이산화탄소 농도가 400~1100ppm 범위이다. 기준 이산화탄소인 1000ppm 범위를 충족하지 못하는 시간이 3%이다.

대상건물의 재실밀도에서는 엔탈피제어를 적용할 경우 실내 공기질이 적정하게 유지되지만 재실밀도가 증가하면 공기질이 적정 수준으로 유지되지 못 할 가능성이 있다. 대상건물의 재실밀도가 국내 사무소 건물의 평균적인 재실밀도에 비해 낮다. 따라서 재실밀도가 높아지면 최소외기도입량에 대한 재설정과 실

내 공기질에 대한 재평가가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 교육연구시설에 설치된 가스엔진 VRF 히트펌프의 성능을 분석한 뒤 실제 거동을 EnergyPlus 프로그램에 구현하여 에너지 시뮬레이션을 시행하였다. 그리고 국내 기후를 분석하여 이코노마이저의 효율적인 제어 방법을 분석하였다.

(1) 냉방기에는 외기건구온도가 낮을수록 가스엔진 VRF 히트펌프 효율이 상승하며 난방기에는 외기습구온도가 높을수록 가스엔진 VRF 히트펌프 효율이 상승하는 것으로 분석되었다. 가스엔진 VRF 히트펌프의 실제 거동을 시뮬레이션에서 구현하여 대상건물의 에너지 시뮬레이션을 실시한 결과 MBE는 1.54%, Cv(RMSE) 13.50%로 오차범위에 부합하였다. 따라서 실제 가스엔진 VRF 히트펌프의 거동이 시뮬레이션에서 유사하게 재현되었다고 판단된다.

(2) Cooling degree-day와 Heating degree-day를 기준으로 서울과 대전은 Mixed Humid 기후, 부산과 제주는 Warm Humid 기후에 속하는 것으로 분석되었다. ASHREA 기준은 해당 기후에서 건구온도 이코노마이저 제어보다 엔탈피 이코노마이저 제어가 적합하다고 제안한다.

(3) 건구온도제어는 외기 온도가 실내온도인 25°C보다 낮으면 외기를 도입하므로 환기시스템의 현열부하 절감에 효과적이다. 그러나 건구온도제어는 외기 온도가 25°C보다 낮지만 습도가 높아서 외기 엔탈피가 실내 엔탈피인 13kcal/kg보다 높은 경우에도 외기를 도입하는 경우가 발생한다. 특히 7,8월에 외기 습도가 높기 때문에 건구온도제어를 적용하면 잠열부하가 증가하는 것으로 분석되었다. 반면 엔탈피제어는 외기 온도가 25°C, 외기 엔탈피가 13kcal/kg 이상일 때 모두 이코노마이저가 작동하지 않아서 환기시스템의 현열 및 잠열 부하 절감에 모두 효과적인 것으로 분석되었다.

(4) 건구온도제어는 5월~10월 환기시스템 현열 냉방에너지 절감율 8%, 잠열 냉방에너지 절감율 2%이고 엔탈피제어는 5월~10월 환기시스템 현열 냉방에너지 절감율 7%, 잠열 냉방에너지 절감율 11%이다. 건구온도제어시 잠열 냉방에너지 절감율이 낮은 이유는 외기 습도가 높은 7,8월에 이코노마이저 작동으로 인한 잠열 냉방에너지가 각각 4%, 1%씩 증가했기 때문이다. 이처럼 건구온도제어는 현열에너지 절감에 효과적이지만 잠열 에너지 절감 효과는 크지 않은 반면 엔탈피제어는 현열 및 잠열 에너지 절감에 모두 효과적인 것으로 분석된다.

(5) 건구온도제어의 5월~10월 환기시스템 총 냉방에너지 절감율은 6%, 엔탈피제어의 총 냉방에너지 절감율은 9%이다. 국내 여름철 외기는 기온이 높고 습도가 높기 때문에 냉방에너지를 절약하기 위해서는 외기 도입으로 인한 현열부하와 잠열부하를 모두 줄이는 선택적 이코노마이저 제어전략이 필요하다. 따라서 국내 기후에 적합한 이코노마이저 제어방식은 엔탈피제어로 판단된다.

(6) 건구온도제어와 엔탈피제어를 적용하여 환기시스템을 가동할 경우 5~10월동안 실내 이산화탄소 농도가 400~750ppm으로 유지되었다. 이는 실내공기질 유지기준인 1000ppm을 만족하는 수치이다. 따라서 각 이코노마이저 제어를 적용하여 환

기시스템을 가동할 경우 실내 공기질이 적정 수준으로 유지되는 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1D1A1B03028205)

Reference

- [1] 국토교통부, 녹색건축물 조성 지원법, 2017
- [2] 국토교통부, 건축물 에너지 효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준, 2017
- [3] Doo Yong Park, Gyeong Yun, Kang Soo Kim, Experimental evaluation and simulation of a variable refrigerant-flow(VRF) air-conditioning system with outdoor air processing unit, Energy and Buildings, 146(2017), 2017, pp.122-140
- [4] Lorenzo Pezzola, Piero Danti, Sandro Magnani, Performance comparison among Gas Heat Pump, Electric Heat Pump and conventional thermal devices in tertiary sector applications, Energy Procedia, 101(2016), 2016, pp.416-423
- [5] 임상훈, 김용식, 사무소건물의 에너지 효율적인 외기 도입 제어방법에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol.22 No.2, 2002, pp.717~720 // (Sang-hoon Lim, Yong-sik Kim, The Impact of Demand-Controlled and Economizer Cycle Control Ventilation Strategies on Energy Use in Office Buildings, Proceeding of annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Vol.22 No.2, 2002, pp.717~720)
- [6] 김효준, 조영흠, 이코노마이저 제어방안에 따른 에너지소비량 비교분석에 관한 연구, 한국생활환경학회지, 23(2), 2016, pp.251~256 // (Hyo-Jun Kim, Young Hum Cho, A Study on the Analysis of Energy Consumption According to Economizer Control Method, Journal of Korean Living Environment System, 23(2), 2016, pp.251~256)
- [7] Kuei-Peng Lee, Hsiang-Lun Chen, Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones, Energy and Buildings, 62(2013), 2013, pp.103~112.
- [8] Jeong Eun Son, Kwang Ho Lee, Cooling energy performance analysis depending on the economizer cycle control methods in an office building, Energy and Buildings, 120(2016), 2016, pp.45~57.
- [9] Shuze Li, Wugao Zhang, Rongrong Zhang, Dexu Lv, Zhen Huang, Cascade fuzzy control for gas engine driven heat pump, Energy Conversion and Management, 46(2005), 2005, pp.1757~1766.
- [10] U.S. Department of Energy, EnergyPlus™ Version 8.2 Documentation Engineering Reference, 2014
- [11] U.S. Department of Energy, EnergyPlus™ Version 8.2 Documentation Input Output Reference, 2014
- [12] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2007 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2007.
- [13] 국토교통부, 건축물의 에너지절약 설계기준, 2013
- [14] ASHREA, 90.1 User's Manual for ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2004, 2004
- [15] 기상자료포털, data.kma.go.kr
- [16] U.S. Department of Energy, M&V Guidelines : Measurement and Verification for Federal Energy Projects Version 3.0, 2008
- [17] 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, 2017
- [18] 환경부, 실내공기질 관리법 시행규칙, 2018