

냉매유량가변형(VRF) 직팽식 AHU 냉방성능식 산출 기법

이 광 호

국립한밭대학교 건축공학과
(kwhtlee@hanbat.ac.kr)

연구 배경 및 목적

일반적으로 우리나라에서 소비되고 있는 부문별 총 에너지 소비량은 공공·기타와 가정·상업 부문인 건물에서의 에너지 소비량이 약 26% 이상으로 상당히 많은 부분을 차지하고 있으며, 이중 상업·공공 부문의 업무용 건물에서의 약 60%가 건물의 냉난방 및 온수에 이용되고 있는 실정이다. 이에 따라 업무용 건물에서의 에너지 절감에 대한 요구가 증가하게 되었고 이러한 사회적인 분위기에 편승해 최근에는 공조기의 대형화 및 고급화가 이루어짐에 따라 건물 내 공조시스템의 에너지를 최소화하면서 쾌적한 실내공간을 구현할 수 있는 시스템 에어컨 시장이 지속적으로 확대되고 있는 추세이다. 특히 한 대의 실외기에 다수의 실내기를 냉매배관으로 연결하여 부하에 따라 냉매의 유량을 개별·분산적으로 제어할 수 있고 부분부하 운전이 능동적으로 대처할 수 있는 Variable Refrigerant Flow(이하 VRF) 히트펌프 시스템은 히트펌프 관련 첨단 기술이 집약된 제품으로, 냉동기와 보일러로 대변되던 기존의 냉난방 시스템 시장을 빠르게 대체하면서 급속도로 성장하고 있다. 우리나라에서는 2005년부터 연평균 23% 이상으로 성장하여 2010년에는 1.6조 원의 시장을 형성하였고 2015년 이후부터는 약 2조 원의 시장으로 성장할 것으로 전망하고 있다. 이처럼 전 세계는 물론 국내

의 VRF 시장은 국가차원의 적극적인 정책적 지원 아래 매년 큰 폭의 성장을 이뤄 국가 전체 공조시스템 중 그 비중이 크게 늘어나고 있으며 이와 관련한 국내·외 연구 역시 활발히 진행되고 있다.

이러한 VRF 시스템의 중요성으로 인해 많은 연구들이 상당수 진행 중이지만 대부분의 연구들이 “특정 조건이나 환경”에 따른 VRF 시스템의 성능 및 쾌적 제어 알고리즘, 실내 온열환경 평가 그리고 시스템 자체의 효율성 향상 등에만 초점이 맞춰져 있었으며, 본 시스템을 적용한 실제 건물 및 시뮬레이션 상에서 “다양한 작동 조건하에서” 정량적인 에너지 성능을 예측하기 위한 연구는 사실상 미비한 실정이었다. 그 이유는 공랭식 VRF 시스템의 경우 실내에 영향을 주는 다양한 변수들인 실내·외 건구·습구온도, 시스템 본연의 냉난방성능인 냉난방능력 및 소비전력 그리고 부분부하 운전조건뿐만 아니라 배관의 길이 및 낙차높이 등의 여러 가지 변수에 따라 시스템 효율의 편차가 발생하게 되는데, 이러한 모든 복합적인 변수들과 관련된 성능정보를 실측이나 시뮬레이션 상에 정확하게 구현하는데 어려움이 따르기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같이 다양한 변수들을 고려한 국내 S사의 냉난방성능 카탈로그 데이터인 Technical Data Book(이하 TDB)의 데이터를 제공받아 이를 토대로 여러 가지 입력변수들을 분석하였다. 또한 이들 입력변수들과 관련된 다양한 성

능정보를 시뮬레이션 상에 정확하게 구현하여 정량적인 에너지 소비량을 예측하는 데 있어 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 EnergyPlus 기반의 정형화된 냉방 성능식 산출기법을 정리하였다. 이를 통해 기존 BEMS(Building Energy Management System)에서의 장비성능 분석 분야에 기초자료로 활용될 수 있도록 하는 데 본 연구의 목적이 있다.

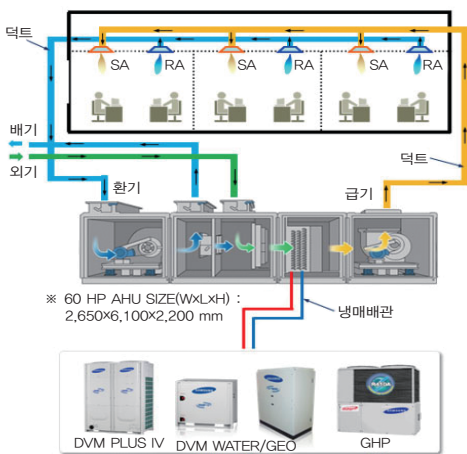
기술의 개요

본 연구에서는 여러 종류의 VRF 시스템 가운데 쾌적성 향상, 운전비 절약 및 에너지 절감 효과 등의 장점으로 인해 최근 저에너지 상업용 건물에서의 설치 증가하고 있는 직팽식 AHU 시스템을 대상으로 선정하였다. 또한 실측을 기반으로 작성된 냉난방 성능 카탈로그 데이터인 TDB 데이터의 여러 공랭식 VRF 시스템 중 대표적인 실외기 모델을 선정하여 EnergyPlus 기반의 성능 곡선을 추출하였다. 직팽식 AHU는 공조기가 기계실의 냉동기나 보일러와 같은 냉·온열장치와 멀리 떨어져 있거나 공조시간이 다른 경우에 주로 적용이 되며, 냉매를 이용하는 직팽 코일과 별도의 실외기를 연결하여 냉난방을 공급하는 방식을 말한다. 그림 1과 같이 직팽식 AHU 시스템은 직팽식 AHU(실내기)와 실외기(DVM PLUS IV, DVM S, DVM Water/GEO, GHP)로 구성된다. 즉, 직팽식 공조기는 일반 공기조화기와 공조기 자체는 동

일하나 냉·온수 코일 대신에 냉매가 순환되는 직팽 코일이 설치되며, 히트펌프의 실외기를 적용하여 하나의 직팽코일을 이용해 증발기에서 냉매가 직접 팽창하여 실내·외공기와의 열 교환을 통해 냉난방 모두가 가능한 시스템이다.

VRF 직팽 AHU의 냉방능력은 직팽코일로 공급되는 공기 습구온도와 응축기로 유입되는 외기 건구온도에 따라 가변적으로 변하며, 압축기에서 소비되는 에너지는 직팽코일 Inlet 습구온도, 외기 건구온도뿐만 아니라 부분부하율 또한 포함하여 이 3가지 변수의 변화에 따라 수시로 변화하게 된다. 그러므로 건물에너지 시뮬레이션을 통한 시스템 모델링 시 이와 같은 부분들이 고려되어야 한다. 따라서 EnergyPlus에서는 직팽코일 Inlet 습구온도, 외기 건구온도, 부분부하율 등의 3가지 변수의 변화에 따른 냉방능력 및 에너지 소비량의 변화를 고려하기 위하여 CapFT(직팽코일 Inlet 습구온도 및 외기 건구온도에 따른 용량 변화 곡선), EIRFT(직팽코일 Inlet 습구온도 및 외기 건구온도에 따른 전력소비량 변화 곡선), EIRFPLR(부분부하에 따른 전력소비량 변화 곡선)의 3가지 주요 성능곡선을 포함하여 다음의 여러 가지 성능곡선 및 변수들에 대한 입력값을 요구한다. 본 원고에서는 국내 S사로부터 제공받은 실측 기반으로 작성된 냉난방 카탈로그 데이터인 Technical Data Book(TDB) 데이터를 토대로 VRF 직팽식 AHU 성능곡선 산출기법을 정리하였는데, 지면 관계상 밑의 여러 곡선들 중에서 온도와 부분부하율 변화에 따른 냉방능력 및 소비전력 변화를 예측하는 성능식을 위주로 살펴보기로 한다.

- 정격 냉방능력 및 COP
- 외기 건구온도 및 직팽코일 Inlet 습구온도 변화에 따른 냉방능력비 변화 성능곡선
- 외기 건구온도 및 직팽코일 Inlet 습구온도 변화에 따른 냉방소비 전력비 변화 성능곡선
- 부분부하율 변화에 따른 냉방소비 전력비 변화 성능곡선
- 상당 냉매배관 길이 변화에 따른 냉방소비 전력비 변화 성능곡선
- 냉매배관 낙차높이 변화에 따른 냉방소비 전력비 변화 성능곡선



[그림 1] 냉매유량가변형(VRF) 직팽식 AHU 개요

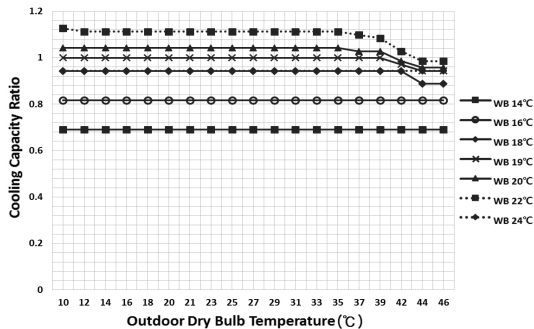
냉방능력 예측식 산출

VRF 히트펌프 시스템의 냉방 모드에서 온도 및 부분부하 조건에서의 냉방능력에 대한 성능곡선은 실외 응축기로 유입되는 실외공기의 건구온도와 직 팽코일로 유입되는 공기의 습구온도에 의해 결정이 되는데, **그림 2**는 카탈로그 TDB 데이터를 통해 도출한 VRF 시스템의 냉방 시 외기 건구온도 및 직 팽코일 습구온도에 따른 실외기 냉방능력 비율을 나타 낸 것이다. 온도 구간이 외기 건구온도에 따라 저온 측 성능곡선(Low Temperature Curve) 구간과 고온 측 성능곡선(High Temperature Curve) 구간으로 나 누게 되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 냉방능력이 외기 건구온도에 의해 온도가 낮은 영역에서의 냉방능력 에 관한 곡선 및 높은 영역에서의 냉방능력 곡선을 따로 입력하도록 요구하고 있어 상기 2가지 곡선에 대한 성능식을 따로 추출해야 하는데 본 원고에서는 지면 관계상 고온 측 성능곡선만 다루기로 한다.

우선 실제 측정된 카탈로그 데이터에서 온도에 따라 달라지는 냉방능력(Total Cooling Capacity)을 확인할 수 있으며, 이러한 냉방능력에 대한 성능곡 선(Performance Curve)은 응축기로 들어가는 외기 건구온도와 직팽코일로 들어가는 습구온도 등 2개 의 독립변수들에 의해 다음과 같이 4차 방정식으로 정의된다.

$$Tot\ Cap\ Temp\ Mod\ Fac = a + b(T_{WB,i}) + c(T_{WB,i})^2 + d(T_{C,i}) + e(T_{C,i})^2 + f(T_{WB,i})(T_{C,i}) \quad (1)$$

즉, 4차 방정식으로 정의되는 함수식에 포함된



[그림 2] 온도 변화에 따른 냉방능력비(CapFT) 변화

독립변수인 직 팽식 AHU의 직 팽코일로 들어가는 습구온도($T_{WB,i}$)와 응축기로 들어가는 외기 건구온도($T_{C,i}$)의 거동에 따른 냉방능력(T_C)으로 결정된다. 직 팽식 AHU의 기준이 되는 정격 냉방능력은 카탈 로그 TDB 데이터 기준으로 T_C 는 35°C DB, $T_{WB,avg}$ 는 19°C WB일 때를 말하며, 이를 기준으로 하여 외기 건구온도 및 습구온도 변화에 따른 냉방능력비를 산출한 TotCapTempModFac는 **그림 2**와 같이 나타 난다.

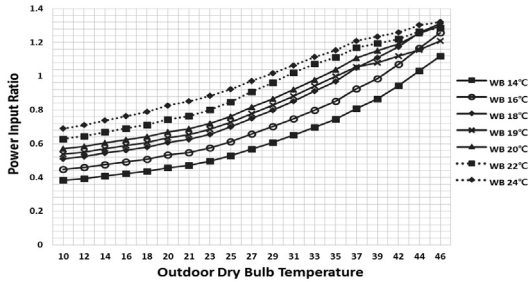
최종적으로 냉방능력비인 Ratio of TotCap-TempModFac의 성능곡선을 추출하기 위해 필요한 변수들은 직 팽코일로 들어가는 습구온도인 T_{WB} 와 실외 응축기로 들어가는 외기 건구온도($T_{C,i}$), 그리고 각 계수들인 a, b, c, d, e, f이며 앞의 4차 방정식을 통해 다양한 조건하에서의 냉방능력이 계산되며, 그 과정은 아래와 같다.

- ① 카탈로그 데이터를 참고하여 외기 건구 및 실내 습구온도에 따라 달라지는 직 팽식 공조기(DVM AHU) 냉방능력(TC) 확인
- ② 외기 건구온도 35°C, 직 팽코일 Inlet 습구온도 19°C에서의 정격 냉방능력을 기준으로 외기 건 구 및 실내 습구온도에 따라 달라지는 냉방능력 들의 비율을 산출
- ③ 직 팽코일 Inlet 습구온도 및 실외 건구온도 그리 고 냉방능력비를 식 (1)에 대입
- ④ 계수 a, b, c, d, e, f 도출
- ⑤ 도출된 계수는 EnergyPlus 해당 VRF 모델의 Total Cooling Capacity Function of Temperature Curve Name(Object)에 해당하는 커브에 입력

냉방에너지 소비량 예측식 산출

온도 변화에 따른 냉방 소비전력비 변화 성능곡선

VRF 히트펌프 시스템에서 냉방 소비전력에 대 한 성능곡선 역시도 실외 응축기로 유입되는 실외 공기의 건구온도와 직 팽코일로 유입되는 공기의 습구온도에 의해 결정이 되는데, **그림 3**에서 확인 되는 바와 같이 냉방능력과는 달리 외기 건구온도 에 따른 특별한 경계조건이 없어 하나의 성능식을



[그림 3] 온도 변화에 따른 소비전력비(EIRFT) 변화

이용하여 VRF 시스템의 소비전력에 관한 성능 곡선을 도출하여도 무방한 것으로 확인되었다.

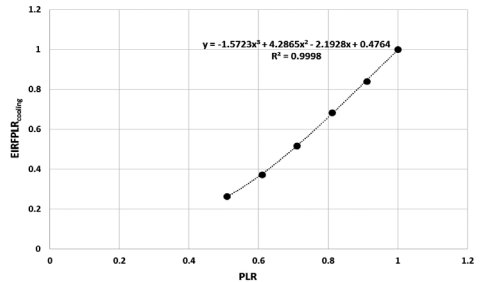
우선 실제 측정된 TDB 데이터에서 직팽식 공조기(DVM AHU)의 온도에 따라 달라지는 냉방 소비전력을 확인할 수 있으며, 온도 변화에 따른 냉방 소비전력 변화 성능곡선(Temperature Performance Curve)은 응축기로 들어가는 외기 건구온도와 직팽코일로 들어가는 습구온도 등 2개의 독립변수들에 의해 다음과 같이 4차 방정식으로 정의된다.

$$EIRTempModFac = a + b(T_{WB,i}) + c(T_{WB,i})^2 + d(T_{C,i}) + e(T_{C,i})^2 + f(T_{WB,i})(T_{C,i}) \quad (2)$$

다시 말해, 4차 방정식으로 정의되는 함수식에 포함된 독립변수인 직팽식 AHU의 직팽코일로 들어가는 습구온도($T_{WB,i}$)와 응축기로 들어가는 외기 건구온도($T_{C,i}$)의 거동에 따른 소비전력(PI)으로 결정된다. 직팽식 공조기의 기준이 되는 정격 소비전력은 카탈로그 TDB 데이터 기준으로 T_c 는 35°C DB, $T_{WB, avg}$ 는 19°C WB일 때를 말하며, 이를 기준으로 하여 외기 건구온도 및 습구온도 변화에 따른 소비전력비를 산출한 EIRTempModFac는 그림 3과 같이 나타난다.

최종적으로, 소비전력비인 EIRTempModFac의 성능곡선을 추출하기 위해 필요한 변수들은 직팽코일로 들어가는 습구온도인 T_{WB} 와 실외 응축기로 들어가는 외기 건구온도($T_{c,i}$), 그리고 각 계수들인 a, b, c, d, e, f이며 위의 4차 방정식을 통해 다양한 조건하에서의 냉방능력이 계산되며, 그 과정은 다음과 같다.

- ① 카탈로그 데이터를 참고하여 외기 건구 및 실내 습구온도에 따라 달라지는 직팽식 공조기(DVM



[그림 4] 부분부하율 변화에 따른 냉방 소비전력비(EIRFPLR) 변화

AHU) 소비전력(PI) 확인

- ② 외기 건구온도 35°C, 실내 습구온도 19°C에서의 정격 소비전력을 기준으로 외기 건구 및 실내 습구온도에 따라 달라지는 소비전력들의 비율을 산출하고 그 후 구해진 각각의 냉방 소비전력비(Power Ratio)를 냉방능력으로 나누어 EIRTempModFac 산출
- ③ 직팽코일 Inlet 습구온도 및 실외 건구온도 그리고 EIRTempModFac를 식 (2)에 대입
- ④ 계수 a, b, c, d, e, f 도출
- ⑤ 도출된 계수는 EnergyPlus 해당 VRF 모델의 Energy Input Ratio Function of Temperature Curve Name(Object)에 해당하는 커브에 입력

부분부하율 변화에 따른 냉방 소비전력비 변화 성능곡선

VRF 히트펌프 시스템에서 냉방 소비전력에 대한 성능곡선은 실외 응축기로 유입되는 실외공기의 건구온도와 직팽코일로 유입되는 공기의 습구온도뿐만 아니라 그림 4와 같이 부분부하율에 의해서도 큰 영향을 받는다.

실제 측정된 TDB 데이터에서 직팽식 공조기(DVM AHU)의 부분부하율에 따라 변화하는 냉방 소비전력을 확인할 수 있으며, 이러한 냉방 소비전력에 대한 부분부하율에 따른 냉방 소비전력비 변화 성능곡선(Part Load Ratio Performance Curve)은 부분부하율에 의해 다음과 같이 3차 방정식으로 정의된다.

$$EIRFPLR_{cooling} = a + b(PLR) + c(PLR)^2 + d(PLR)^3 \quad (3)$$

여기서 PLR은 실외공기의 건구온도와 직팽코일로 유입되는 공기의 습구온도에 따라 변화하는 냉

〈표 1〉 Cooling Energy Input Ratio Function of Part-Load Data Set

Cooling EIRFPLR					
Cooling Power(Kw)	Normalized EIRFPLR	Outdoor Unit Capacity(Kw)	PLR	PLR ²	PLR ³
2.31	0.264908257	11.71	0.509130435	0.2592138	0.131973635
3.25	0.372706422	14.02	0.609565217	0.371569754	0.226495998
4.52	0.518348624	16.33	0.71	0.5041	0.357911
5.96	0.683486239	18.64	0.810434783	0.656804537	0.532297242
7.33	0.84059633	20.95	0.910869565	0.829683365	0.755733326
8.72	1	23.00	1	1	1

방능력에 대한 직팽코일에 걸리는 냉방부하비를 말하며, EIRFPLR은 부분부하율 100%인 전부하 조건하에서의 EIR 대비 부분부하율 변화에 따라 변화하는 EIR의 비율을 의미한다. 참고로, **그림 4**의 그래프를 작성하기 위한 대표 실외기 모델의 PLR 및 EIRFPLR_{cooling}의 중간 계산 과정은 **표 1**과 같다.

최종적으로 부분부하율 변화에 따른 소비전력비인 EIRFPLR_{Cooling}의 성능곡선을 추출하기 위해 필요한 변수는 실외기 용량에 따른 부분부하율(PLR)의 각 계수들인 a, b, c, d의 3차 방정식을 통해 계산되며, 그 과정은 아래와 같다.

- ① 카탈로그 데이터를 참고하여 부분부하율에 따라 달라지는 직팽식공조기(DVMAHU) 소비전력(P) 확인
- ② 부분부하율 100%인 전부하 조건하에서의 소비전력을 기준으로 부분부하율에 따라 달라지는 소비전력들의 비율을 산출
- ③ 부분부하율(PLR) 및 EIRFPLR_{Cooling}를 식(3)에 대입
- ④ 계수 a, b, c, d 도출
- ⑤ 도출된 계수는 EnergyPlus 해당 VRF 모델의 Energy Input Ratio Modifier Function of Part-Load Ratio Curve Name(Object)에 해당하는 커브에 입력

결론

본 원고는 국내 S사의 실측 카탈로그 데이터를 토대로 VRF 직팽 AHU의 정량적인 에너지 소비량을 보다 더 정밀하게 산정하기 위한 선행연구로, 온도에 따른 냉방능력 및 소비전력 변화 그리고 부분부하율에 따른 소비전력 변화에 관한 성능식을 추출하는 과정을 소개하였다. 본 원고의 연구결과를 통해 VRF 직팽 AHU 시스템에서의 온도의 거동

및 부분부하 조건 등에 따른 냉난방 성능곡선을 추출할 수 있었으며, 개발한 성능곡선을 이용하여 다양한 온도조건이나 부분부하에 따라 변화하는 에너지 소비량을 정량적으로 예측할 수 있는 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 시뮬레이션과 실측 데이터의 비교를 통한 검증작업을 통해 신뢰성을 확보하여 향후 에너지 절약 측면에서 VRF 시스템의 적극적인 활용에 이바지하고자 한다.

후기

본 연구는 미래창조과학부가 주관하는 2014년도 IT·SW 융합혁신센터 연구비 지원에 의한 결과 일부이다.

참고문헌

1. 서병모, 현인탁, 이광호, 2015, EnergyPlus 이용 HVAC 시스템 모델링의 입력력 간소화 및 정밀 분석을 위한 Excel 기반 Interface 개발, 대한건축학회, Vol. 35, No. 1, pp. 293-294.
2. 현인탁, 이제현, 천세환, 이광호, 2015, EnergyPlus 기반 VRF 시스템의 실외기 냉방 소비전력 성능식 산출 프로세스, 대한설비공학회, pp. 400-403.
3. 2012, Creating Performance Curves for Variable Refrigerant Flow Heat Pumps in EnergyPlus, Florida Solar Energy Center.
4. 현인탁, EnergyPlus 기반 냉매유량가 변형(VRF) 히트펌프 시스템의 성능곡선 산출 프로세스 및 검증방법 연구, 국립한밭대학교 석사학위논문.
5. (주)에코시안, 수주형 공조 에너지 시뮬레이터 개발, 미래창조과학부 2014년도 IT·SW 융합혁신센터 과제 최종보고서. 