

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어를 위한 가상센서 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2016. 10. 10.

주관연구기관명 : 영남대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 조 영 흠

연 구 원 : 김 효 준

연 구 원 : 정 영 주

연 구 원 : 신 경 주

연 구 원 : 최 보 은

연 구 원 : 신 지 현

연 구 원 : 이 진 현

보고서 요약서

과제고유번호	030301	해 당 단 계 연구 기 간	2014.08.14. - 2016.08.13	단 계 구 분	(해당단계)/ (총 단 계)
연구 사업 명	국토교통기술촉진연구사업				
연구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어를 위한 가상센서 개발			
연구 책임 자	조 영 흠	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 7 명 내부 : 7 명	총연구비	정부 : 100,000 천원 계 : 100,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	영남대학교 산학협력단				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	87
본 연구는 건물에 적용 가능한 가상센서를 개발하고 이를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어 기술 개발을 수행하였음. 기존 가상센서에 관한 국내외 실태조사 및 현황분석을 통하여 센서를 개발하였고, 수치해석 분석 등을 통한 이론적 및 신뢰성 검토를 마친 후 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적 제어 기술을 개발하였음. 이 연구 결과 설비시스템의 제어 알고리즘 및 운영방안 개발로 산업 전반은 물론, 이후 다양한 관련 제어 기술개발 연구에서 활용도가 높을 것으로 예상되며, BEMS와 연계된 HVAC 시스템 실증사업을 통해 쾌적한 건물 환경, 유지관리의 용이성 및 에너지절감 및 에너지비용 절감 효과가 예상됨. 또한 개발된 기술은 새로운 가상센서를 만들 수 있고, 센서 간의 융합을 통해 새로운 정보를 얻을 수 있어 신산업 및 서비스를 창출할 수 있을 것으로 기대됨.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	가상센서, 공기조화설비, 에너지 절감, 성능 모니터링, 최적 제어			
	영 어	Virtual Sensor, HVAC, Energy Saving, Monitoring, Optimal Control			

요 약 문

I. 제목

건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어를 위한 가상센서 개발

II. 연구개발과제 개요

최근 전 세계가 에너지 절약방안과 효율적인 사용에 대한 관심을 쏟고 있으며 다양한 분야에서 에너지 절약을 위한 노력이 이루어지고 있다. 에너지 사용에 큰 부분을 차지하는 건물분야에서도 에너지의 절약뿐만 아니라 에너지의 효율적인 사용에도 합리적인 방안이 필요하다. 이를 위해 건물 에너지 시스템의 효율적인 운영과 시스템의 유지관리의 최적화가 이루어져야 하나 건물 시스템에서 에너지 효율이나 관리에 대한 최적 제어 피드백 제공은 매우 복잡하고 어려운 실정이다.

건물시스템에는 각각의 특성을 갖는 수천 개의 모니터링 센서가 필요하다. 하지만 모든 부분에 센서를 설치하는 것은 비용측면에서도 큰 문제가 따를 뿐 아니라 경우에 따라 정확하게 원하는 양을 측정 할 수 있는 물리적 센서를 설치하는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 건물 시스템은 각각의 건물마다 개별적으로 설계하는 경향이 있어 고급기능에 대한 비용 임계값이 훨씬 높다. 따라서 건물보다 지능적인 기능을 실현하는 핵심은 비용 임계값을 줄이는 데에 있다. 그 해결방법중 하나가 가상센서 기술을 활용하는 것이다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

본 연구는 건물에 적용 가능한 가상센서 개발 및 이를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어 기술 개발을 수행하였다. 기존 가상센서 개발에 관한 국내외 실태조사 및 현황 분석 등을 통하여 가상센서 개발을 하였으며, 이어 수치해석 분석 등을 통한 이론적 검토 및 신뢰성 검토를 마친 후 이를 바탕으로 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적 제어 기술을 개발하였다. 또한, 개발된 성능 모니터링 및 최적 제어 기술의 에너지 성능을 분석하기 위해 동적 에너지 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구를 통해 BEMS에 적용 가능한 HVAC 시스템 가상센서를 개발하였으며, 개발된 가상센서는 실제 측정한 데이터와 유사하여 정확도가 높다. 또한 지열 히트펌프 시스템을 통하여 건물 에너지 성능 모니터링 시스템 및 최적제어 알고리즘을 개발하여 기존의 열원인 흡수식 냉온수기와 계통을 통합하여 복합운영방안을 제안하였다.

V. 연구목표 달성 및 효과

본 연구는 건물 에너지 진단 및 최적 제어를 목표로 하여 핵심기술로 가상센서 기술을 개발하였다. 이 연구를 통하여 설비시스템의 제어 알고리즘 및 운영방안 개발로 축적된 관련 제어 요소 기술에 대한 기초 데이터 및 실증 데이터는 관련 산업 전반은 물론, 이후 다양한 관련 제어 기술개발 연구에서 활용도가 높을 것으로 예상된다. BEMS와 연계된 HVAC 시스

템 실증사업을 통해 쾌적한 건물 환경, 유지관리의 용이성 및 에너지절감이 기대되고 건물 자동제어 기술의 적용 및 저비용 설비 시스템 구현을 통합적으로 실시할 경우 기존 건물 에너지 사용량 대비 약 20% 이상의 에너지비용 절감 효과가 예상된다. 개발 기술은 주변의 사물이나 센서들을 활용하여 건물 시스템 내에 새로운 가상센서를 만들 수 있고, 센서 간의 융합을 통해 새로운 정보를 얻을 수 있어 신산업 및 서비스를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 연구성과 활용계획

본 연구의 결과 개발 목표인 건물 에너지 시스템의 효율적인 운영과 시스템의 유지관리 최적화를 위한 가상센서를 개발하였고 성능 평가를 통해 성능을 검증하였다. 이는 건축설비 분야에서 건물 자동제어 시스템에 활용이 가능하며, 물리적 센서와의 통합 적용으로 건물의 제어 및 진단 시스템에 활용이 가능하다. 또한, BEMS 시스템과의 연계를 통해 저에너지 건물의 실현에 중요한 기술로 활용될 수 있다.

SUMMARY

Development of Virtual Sensor for Energy Monitoring and Optimal Control in Building.

In recent years, the world are pouring their interest in energy-saving measures and efficient use and there are efforts made to save energy in a variety of fields. In the building field occupying a large part of the energy used requires reasonable measures saving of energy as well as the efficient use of energy. However, providing optimal feedback control for energy efficiency and management in the building situation is very complicated and difficult. Building system may be needed to monitor thousands of sensors having the respective characteristics. However, to install the sensors in all parts is very difficult. In general, building system have a tendency for each individual building. Because of this, a cost threshold for advanced features are high. Therefore, the key to realizing more intelligent features to reduce the cost of the building is one of the threshold will have their solutions to take advantage of the virtual sensor technology.

This study was performed the virtual sensors development applicable in the building and building energy performance monitoring and optimal control technology by utilizing virtual sensors. virtual sensors developed by domestic and international status survey and analysis on the development of an existing virtual sensor. After a review of theoretical and reliable system through numerical analysis, this is based on develop building energy performance monitoring and optimal control techniques.

In addition, performing the dynamic energy simulation and considering the result in order to analyze the development of the performance monitoring and energy performance of the optimal control techniques.

Through this study, we developed a virtual sensor HVAC system applicable to the BEMS, The development of virtual sensors are similar to the actual measurement data so it has high accuracy. In addition, the complex management plan proposes to develop building energy performance monitoring systems and optimal control algorithm by integrating existing heat source the absorption lines of water purifier through a geothermal heat pump system.

This study develops a virtual sensor technology as the core technology for building diagnostics and energy optimal control goal. The effects of study is as follows. 1)It expected higher utilization in a variety of technology-related research and development being controlled. 2)Through the HVAC system demonstration project associated with

BEMS, pleasant building environment, easy maintenance building, and energy and energy savings are expected. 3) Developed technology that can take advantage of the surrounding objects and sensors to create a new virtual sensor system inside the building and expected to create a new industry and services.

As a result of this study, we developed a virtual sensor that can measure the flow rate and the air volume for the development of efficient operation and maintenance optimization systems aim of building energy system and verify performance over the performance evaluation of the study. It can be used in building automatic control system in the building equipment sector, and integrated application of physical and sensors can be used in building control and diagnostic system. Furthermore, it can be used as an important technology in the realization of a low-energy building through a linkage with BEMS system.

CONTENTS

Chapter 1. Overview R&D projects	1
1.1 Overview and necessity R&D projects	1
1.2 Status of Domestic and international technology developments in related fields	19
1.3 The final goal of R&D	28
Chapter 2. Contents and results of the research	30
2.1 Research Method	30
2.2 HVAC virtual sensor development process	31
2.3 Development of optimal control technology using a virtual sensor	33
Chapter 3. The final research results	67
3.1 Virtual Sensor development of the HVAC system	67
3.2 The development of building energy performance monitoring systems and optimal control Algorithm	68
Chapter 4. Achievement of the goals of research and its effects	73
4.1 Grade of implementation for the goals of research	73
4.2 Analysis Academic effect of R&D results	74
4.3 Analysis technical effect of R&D results	74
4.4 Analysis economic effect of R&D results	74
Chapter 5. Plan for Utilizing the results of research, and needs for additional research	76
5.1 Plan for utilizing results of the research	76
5.2 Needs for additional research	77
Reference	78
[Appendix]	84

목 차

제 1장. 연구개발과제 개요	1
1.1 연구개발의 개요 및 필요성	1
1.2 관련분야의 국내외 기술개발 현황	19
1.3 연구개발의 최종 목표	28
제 2장. 연구개발 수행 내용 및 결과	30
2.1 연구수행 방법	30
2.2 HVAC 가상센서 개발 프로세스	31
2.3 가상센서를 활용한 최적제어 기술 개발	33
제 3장. 최종 연구성과	67
3.1 HVAC 시스템의 가상센서 개발	67
3.2 건물에너지 성능 모니터링 시스템 및 최적제어 알고리즘 개발	68
제 4장. 연구목표 달성 및 효과	73
4.1 연구개발 최종목표 달성도	73
4.2 연구개발 성과의 학문적 효과분석	74
4.3 연구개발 성과의 기술적 효과분석	74
4.4 연구개발 성과의 경제성 효과분석	74
제 5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	76
5.1 연구성과 향후 활용방안	76
5.2 추가 연구 필요성	77
참고문헌	78
[부 록]	84

표 목차

[표1.1.1] 공랭식 히트펌프 시스템과 지열 히트펌프 시스템의 비교	14
[표1.1.2] 공랭식 히트펌프 시스템과 지열 히트펌프 시스템의 비교	15
[표1.2.1] 조사대상 및 검색DB	25
[표1.2.2] 특허 검색 결과	26
[표1.3.1] 본 연구의 최종 목표	28
[표1.3.2] 연구목표 및 연차별 연구 내용	29
[표 2.2.1] 대상 공간의 정보	30
[표 2.3.1] 대상건물 개요	34
[표 2.3.2] 실별 공조 현황	35
[표 2.3.3] 지열 히트펌프 시스템 제원	35
[표 2.3.4] 개별 지열 히트펌프 시스템 용량 및 유량	35
[표 2.3.5] 흡수식 냉온수기 제원	35
[표 2.3.6] 시뮬레이션 CASE	48
[표 2.3.7] Acceptable Calibration Tolerances	53
[표 2.3.8] 신뢰도 검증	53
[표 2.3.9] 각 CASE별 여름철 시뮬레이션 결과	58
[표 2.3.10] CASE별 겨울철 시뮬레이션 결과	60
[표 2.3.11] 단일 지열히트펌프 시스템-지열 히트펌프 총 에너지 소비량	61
[표 2.3.12] 단일 지열히트펌프 시스템-각 CASE별 지열히트펌프 에너지 소비량	62
[표 2.3.13] 복합 지열히트펌프 시스템- 각 CASE별 지열히트펌프 에너지 소비량	64
[표 2.3.14] 복합 지열히트펌프 시스템-지열 히트펌프 총 에너지 소비량	65
[표 4.1] 연구개발 최종목표 달성도	73

그림 목차

[그림 1.1.1] 자동차의 가상센서 적용 예시	2
[그림 1.1.2] 건물 에너지 관리 제어 시스템	3
[그림 1.1.3] 가상 유량 측정장치 예시	4
[그림 1.1.4] 가상센서 연구방법	5
[그림 1.1.5] 태양열의 열평형형	8
[그림 1.1.6] 지열히트펌프 시스템의 냉방 사이클	9
[그림 1.1.7] 지열히트펌프 시스템의 난방 사이클	9
[그림 1.1.8] 4방 밸브 모식도	11
[그림 1.1.9] 지열 설비의 유지관리	13
[그림 1.1.10] P-h선도에 나타난 지열히트펌프 시스템과 공랭식 히트펌프	14
[그림 1.1.11] 히트펌프 시스템의 원리	16
[그림 1.1.12] 신재생 설치 의무화 제도	18
[그림 1.2.1] 건물의 가상센서 예시	20
[그림 1.2.2] 가상 유량계 예시	21
[그림 1.2.3] 증기압축냉동기 가상센서 예시	23
[그림 2.1.1] 연구 개발 흐름도	30
[그림 2.3.1] 대상건물 전경	34
[그림 2.3.2] 대상건물 열원 시스템 계통도	37
[그림 2.3.3] 대상건물 BEMS 화면	37
[그림 2.3.4] 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 대수운영방안 알고리즘	39
[그림 2.3.5] 지열 히트펌프 시스템의 COP와 에너지 소비량 관계 그래프	40
[그림 2.3.6] 성능계수에 따른 순차적 제어방안 알고리즘	41
[그림 2.3.7] 대상건물 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 기존 운영방안 계통도	42
[그림 2.3.8] 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 계통통합 운영방안 알고리즘	44
[그림 2.3.9] 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 계통통합	45
[그림 2.3.10] 대상건물 TRNSYS 3D Modeling	46
[그림 2.3.11] Simulation tool - TRNSYS	47
[그림 2.3.12] 단일 지열 히트펌프 시스템의 모델링 화면	49
[그림 2.3.13] CASE1-1 시뮬레이션 흐름도	49
[그림 2.3.14] CASE1-2 시뮬레이션 흐름도	50
[그림 2.3.15] 복합 지열 히트펌프 시스템의 모델링 화면	51
[그림 2.3.16] CASE2-1 시뮬레이션 흐름도	51
[그림 2.3.17] CASE2-2 시뮬레이션 흐름도	52
[그림 2.3.18] (a) CASE1-1 여름철 실내온도	54
[그림 2.3.19] (b) CASE1-2 여름철 실내온도	55
[그림 2.3.20] (a) CASE1-1 겨울철 실내온도	55

[그림 2.3.21] (b) CASE1-2 겨울철 실내온도	56
[그림 2.3.22] (a) CASE1-1 지열히트펌프 시스템 냉수 입 출구 온도 및 COP (여름철)	57
[그림 2.3.22] (b) CASE1-2 지열히트펌프 시스템 냉수 입 출구 온도 및 COP (여름철)	57
[그림 2.3.23] (a) CASE1-1 HP 냉수 입출구 온도 및 COP (겨울철)	59
[그림 2.3.23] (b) CASE1-2 HP 냉수 입출구 온도 및 COP (겨울철)	59
[그림 2.3.24] 단일 지열히트펌프 시스템-지열 히트펌프 총 에너지 소비량	61
[그림 2.3.25] 단일 지열히트펌프-각 지열히트펌프 에너지 소비량	62
[그림 2.3.26] 복합 지열히트펌프 운영방안에서 각 지열히트펌프 에너지 소비량	64
[그림 2.3.27] 흡수식냉온수기와 지열 히트펌프 시스템의 에너지 소비량	65
[그림 2.3.28] 지열 히트펌프 시스템의 COP와 부하의 관계 그래프	66
[그림 3.2.1] 지열 히트펌프 시스템의 COP와 에너지 소비량 관계 그래프	68
[그림 3.2.2] 성능계수에 따른 순차적 제어방안 알고리즘	70
[그림 3.2.3] 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 계통통합 운영방안 알고리즘	72
[그림 4.1] 연구개발 성과의 경제적 효과분석	75

제1장 연구개발과제 개요

1.1 연구개발의 개요 및 필요성

가. 연구개발의 개요

▫ 지난 수십 년 동안 항공, 자동 로봇, 원격 의료, 교통, 자동차, 그리고 빌딩 모니터링 및 제어를 포함하여 많은 다양한 분야에서 지난 수십 년 동안 가상 센서 기술의 급속한 발전이 있었다. 특히, 가상 센서는 프로세스 제어와 자동차 분야에 응용 프로그램을 보급하였다.

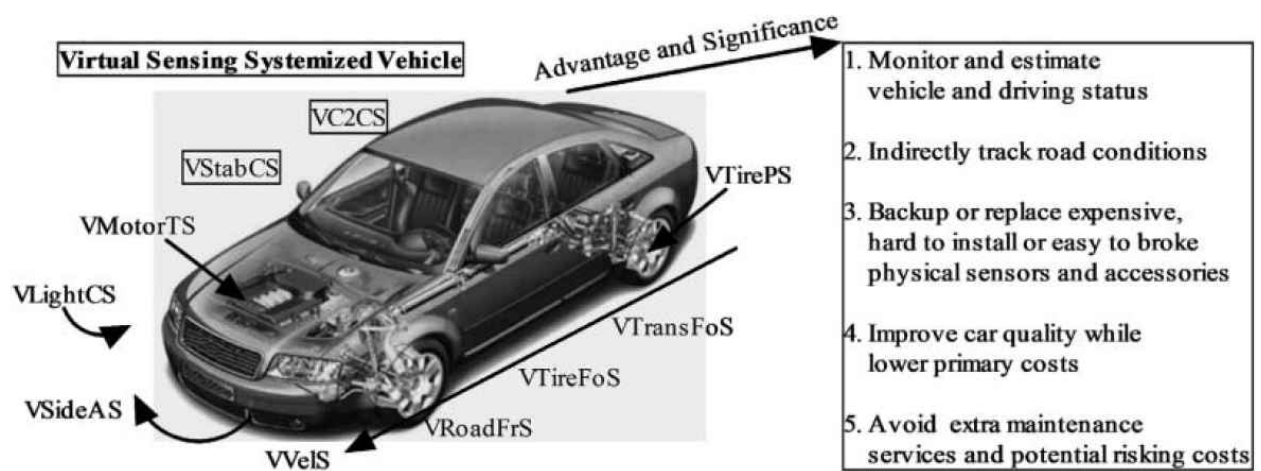
▫ “소프트 센서”라고도 불리는 “가상센서”는 1980년대 초부터 프로세스 제어 공학의 광범위한 응용 프로그램에서 개발되었다. 제어공학 연구자들은 몇 가지 기술과 역학의 상호측정을 포함한 소프트웨어 특징을 가진 센서를 이용하여 직접적인 측정 없이 새로운 수량을 계산하였다. 전동기 속도 추정량과 같은 칼만 필터, state observer, 추정량을 포함한 소프트 센서로 간주된다. 프로세스 제어 공학에서 가상 센서는 국가 전문가들의 구축을 통해 시스템 역학이나 상태 변수 추정에 초점을 맞추고 있다.

▫ 50 년 전 자동차 분야에서 대부분의 자동차는 평균적으로 네 개의 물리 센서를 사용하여 연료 양과 일부 경고등을 제공했다. 오늘날에는 주행 성능, 안전성, 기능성 및 차량의 신뢰성을 최적화하기 위해 약 40개의 상대적으로 낮은 비용의 임베디드 물리 센서가 가상 센서와 함께 사용되고 있다.

▫ 지난 수 십년 동안 자동차용 가상 센서 개발의 초점은 시스템 역학이나 과도상태가 주요관심사인 프로세스 제어 공학의 응용 프로그램과 달리, 주로 정상 상태 변수의 결정이었다. 가상 센서를 구성하기 위한 방법은 더 세분화되었고, 대수 방정식으로 표현된 정상 상태 모델은 종종 물리 센서를 직접 사용하여 측정하는 하나 또는 그 이상의 양을 가상으로 측정하였다. ([그림 1.1.1]은 기능성, 안전성 및 신뢰성이 증가되어 지난 수 십년간 개발된 가상센서가 채용된 차량이다.)

▫ Virtual sensing 기술은 무선통신, 센서 네트워크, 액티브 소음 제어, 데이터 융합 등

최근 몇 년 동안 새로운 분야들에 적용되었다. 자동차의 응용프로그램과 마찬가지로, 새로운 분야에서 Virtual sensing 개발에 대한 기본 초점은 정상 상태 변수를 추정하는 데 있다. 그러나 과도 상태 변수는 프로세스 제어 분야에서와 성질이 유사한 기계적 모델을 사용하는 액티브 소음 제어에 Virtual sensing 기법을 활용한다. 데이터 기반 모델링 방법은 데이터와 정보의 양이 매우 많기 때문에 무선통신, 센서 네트워크, 데이터 융합에 더 자주 사용된다. 또한 이 분야의 연구자들은 물리모델 개발보다 데이터 처리 기술에 더 익숙하다.



[그림 1.1.1] 자동차의 가상센서 적용 예시

▫ Virtual sensing 기술을 적용하는 또 다른 새로운 영역은 빌딩 산업이다. 건물 구성 요소에 대한 가상 센서의 개발은 아마도 초기 비용에 대한 중요성 때문에 다른 분야보다 지체되었다. 사실 Virtual sensing의 컨셉과 가능성은 최근 몇 가지 초기 개발을 선도하고, 건물 응용프로그램에 적용되고 있다. 가상 센서는 비용 효과적, 실용적인 방식으로 간접적으로 측정하기 위해 다른 분야에서 개발되었지만, 최근에는 빌딩 시스템 개발의 대상이 되었다.

▫ 건물소유자와 거주자에게 DDC 에너지 관리 제어시스템(EMCS)의 일반적인 정보를 제공한 것은 50년도 되지 않았다. 개별 건물 구성요소의 에너지 효율은 크게 향상되었지만 부적절한 설치와 유지관리, 수리로 인해 운영 효율은 20~30%가 낭비되는 실정이다.

▫ 건물에서 자동화 및 지능형 기능을 채택하는데 자동차보다 느린 이유 중 하나는 공장

에서 대량 생산할 수 없기 때문이다. 즉 건물은 하나로 획일화 되어있지 않기 때문이다. 자동차의 자동화 기능은 통합된 디자인의 일부이며, 개발비용은 수백만의 차량에 퍼져나갈 수 있다. 건물은 개별적으로 설계하는 경향이 있기 때문에 건물, 고급 기능에 대한 비용이 높다.

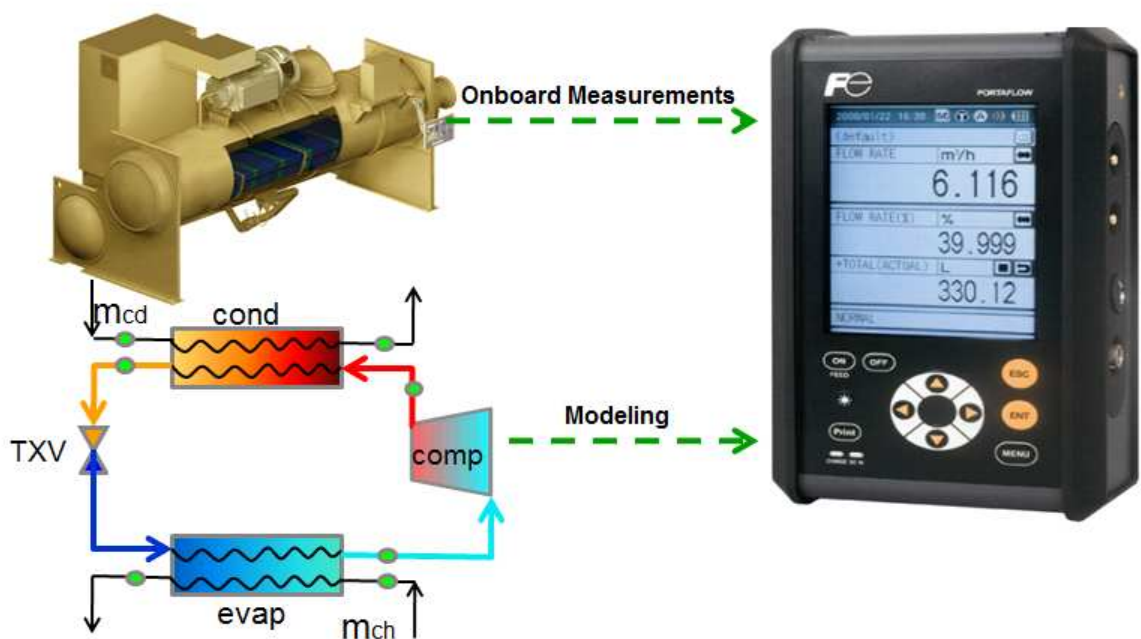
▫ 건물 시스템은 매우 크고 복잡하며, 개별 컨트롤러를 사용하여 수백개의 존을 관리하며 적절한 특성과 성능 모니터를 위한 수 천개의 센서를 필요로 한다. 따라서 건물을 대상으로 가상 센서를 이용하여 적은 비용으로 높은 수준의 성능 모니터링 정보를 제공할 수 있다.



[그림 1.1.2] 건물 에너지 관리 제어 시스템

▫ 건물에 적용된 가상센서의 예로써, 팬 / 모터 패키지는 정압 차와 입구 온도 측정만을 사용하여 풍량과 전력 소비량을 가상으로 측정한다. 압축기는 입구 온도와 함께, 입출구 압력의 물리적 측정을 사용하여 냉매유량과 성능데이터를 계산한다. 밸브나 댐퍼는 압력 차와 입구 온도의 측정에 따라 유량을 산출할 수 있다. 스마트 조명기구는 입력 제어 신호에 따라 전력량, 조명량, 열획득 결과값을 제공할 수 있다.

▫ 일부에서는 물리적 센서를 사용하는 것이 모니터링, 진단 및 최적 제어를 제공하는 데 더욱 안정적이고 정확할 수 있다고 주장한다. 그러나 가상 센서는 낮은 비용 이외에도 다음과 같은 장점이 있다. (1) 가상 센서는 냉매 유량 또는 압력 측정과 같은 중요한 요소들을 쉽게 추가할 수 있다. 냉매 유량에 대한 물리 센서는 시스템을 열어 냉매를 회수한 뒤, 센서를 설치하고, 시스템에 냉매 재충전이 필요한 단점이 있다. (2) 경우에 따라서 정확하게 원하는 값을 측정할 수 있는 물리 센서를 설치하는 것은 매우 어려운 일이다. 혼합챔버의 소형화가 매우 비균일한 흐름과 온도특성을 만들기 때문에 냉방 코일 또는 증발기의 입구에서 정확한 혼합 공기 온도 측정을 하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 정확한 유효 혼합 공기 온도는 모델을 사용하여 쉽게 얻을 수 있고 다른 균일한 위치에서 측정할 수 있다. 공조기 또는 히트펌프에서 직접 냉매의 양을 측정할 수 없다.

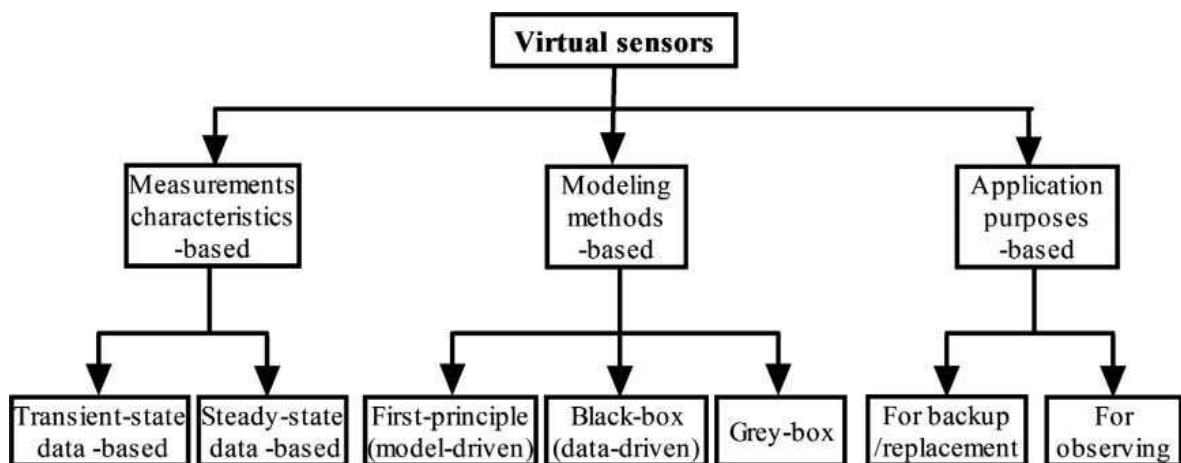


[그림 1.1.3] 가상 유량 측정장치 예시

▫ 측정 특성법; 가상 센서 결과 값이 일시적인지 정상 상태 변수인지 여부를 나타낸다. 성능을 모니터링 하거나 고장을 식별하기 위해 모델링 과정은 준정적(quasi-static)이라고 가정하는 것이 더 적절하다. 발효공정과 같은 식품과 생화학 업계의 많은 공정들은 transient-state 가상 센서를 사용한다. transient-state 가상 센서는 특수 화학 분야에서는 매우 일반적이다. 그러나 정상 상태 가상 센서는 대부분 다양한 분야의 응용 프로그램에

서 나타난다.

▫ 모델링 방법; 가상센서는 first-principle(모델기반) 가상센서, black-box(데이터 기반) 가상센서, gray-box 가상센서 세 가지 유형으로 나눌 수 있다. First-principle 가상 센서는 일반적으로 기본적인 물리법칙에서 파생되었고, 몇 가지 물리적인 의미의 매개변수가 있다. 예를 들어, DeWolf(1996)는 칼만필터를 기반으로 가상 슬러리 중합 반응기 센서를 개발했다. Prasad(2002)는 중합 공정의 제어에 multi-rate 칼만필터를 적용했다. 동일한 응용으로 Doyle은 비선형 관측 방법을 활용하였다. first-principle 가상 센서와는 대조적으로, black-box 가상센서는 물리적 과정의 지식 없이 실험에 근거를 둔 상관관계를 사용한다. 예를 들면 다변량 주성분 분석(PCA), 부분 최소 자승법, 인공 신경망(ANNs)등이 포함된다. gray-box 가상 센서는 측정되지 않은 프로세스의 출력값을 추정하는 물리적, 경험적 모델의 조합에 사용된다.



[그림 1.1.4] 가상센서 연구방법

▫ 응용; 가상 센서를 백업/교체 및 관찰 가상 센서로 나눌 수 있다. 백업/교체 가상 센서는 기존의 물리 센서를 백업하거나 교체하는데 사용된다. 백업 가상 센서는 설치된 센서의 정확성에 대한 검사를 할 수 있고, 가상 보정을 활성화 할 수 있다. 예를 들어, 온도 센서의 신뢰성은 잘못된 설치, 부적절한 환경 조건 또는 natural drift에 영향을 받는다. 대체 응용 프로그램은 자동차에서 본 가상 타이어 공기압 센서와 같이 비용과 안정성을 고려하여 결정된다. 타이어 내부에 위치한 물리 압력 센서는 비싸고 높은 회전 속도와 진동에 노출될 수 있고 시간이 지남에 따라 신뢰할 수 없는 측정과 고장으로 이어 질수 있다. 대조적으로, 관찰 가상 센서는 기존의 물리 센서를 사용하여 직접 관찰(또는 측정)되

지 않는 수량을 추정한다. 예를 들어, 일반적으로 직접 엔진 성능을 결정하는 물리 센서는 없다. Mihelc 와 Citron(1984)은 이용할 수 있는 정보를 사용하여 실린더 내부 연소 엔진에서 각 실린더의 상대 연소 효율을 결정하는 가상 엔진 성능 모니터를 제안했다. 이 성능 지수는 연료 분배 시험의 평가와 점화 시스템 제어 전략을 할 수 있게 한다.

- 백업/교체 또는 관찰 센서는 성능 모니터링, 제어 및 고장검진 및 진단(FDD)을 포함하여 다양한 최종 사용 응용 프로그램을 사용할 수 있다. 예를 들어, 가상 풍량 센서는 물리센서를 교체하여 비용의 효율을 볼 수 있고, 팬이나 열교환기의 오염물에 대한 고장을 직접 식별하는데 사용할 수 있다. 또는 진단 오류 표시기는 물리 센서로 측정할 수 없는 에너지량 또는 다른 변수를 확인 할 수 있다. 1990년대 초반 이후, 많은 고장진단 가상 센서는 터보 발전기와 에틸렌 분해 공정을 위한 것들과 같이 연구되어왔다.

- Transient 가상센서 모델로는 물리적 모델, 그레이박스 모델, 블랙박스 모델이 있다. Transient 물리 모델 또는 그레이박스 모델은 선형 또는 비선형 미분 방정식이나 시계열 방정식의 집합이 될 수 있다. 신경 네트워크는 상당한 양의 다듬어진 시계열 데이터를 활용한 블랙박스 모델링 방법으로 사용된다. 그레이 박스 모델의 예는 결정적 입력 조건이 포함된 auto-regressive moving-average time-series model 이다. (ARMAX). Meleiro 와 Finho(2000)는 발효과정의 자체 조정 적응 컨트롤러의 부분이며 현상학적인 모델을 기반으로 한 시뮬레이션 데이터를 사용하여 숙련된 multi-layer perceptron(MLP)방식을 활용한 그레이 박스 모델의 가상 센서를 제안한다.

- 정상 상태의 가상센서는 물리 모델, 그레이박스 모델, 블랙박스 모델을 사용할 수 있다. 정상 상태 first-principle 모델은 기계적, 열적, 화학적 과정을 설명할 수 있는 질량 균형, 힘 균형, 에너지 균형 및 속도 방정식을 통합할 수 있다. 블랙박스 모델들은 다변수 다항식 또는 신경 네트워크이며 그레이박스 가상센서의 예는 ANN 모델과 프로세스의 물리적 모델을 결합한 생화학 일괄 처리용으로 개발 된 바이오매스 농도 센서 등이다.

- 블랙박스 모델은 측정 동작을 나타내는 자유로운 몇몇 범위가 있기 때문에 물리모델 또는 그레이박스 모델보다 더 정확한 표현을 제공 할 수 있다. 그러나 블랙박스 모델은 훨씬 더 많은 다듬어진 데이터가 필요하다. PCA, Hotelling's T², Q-statistics등을 포함한 모든 응용프로그램에 대해 블랙박스 모델이 발전하는 동안 개발된 통계 도구이다. 블

랙박스 가상 센서의 구체적인 예는 single- or multi-regression models, partial least squares, ANNs, neurofuzzy systems, 그리고 support vector machines등이 있다.

- 가상 센서를 개발하기 위한 절차는 (1) 데이터 수집 및 사전 처리 (2) 모델 선택과 훈련 (3) 센서 구현 및 검증이다.

- 적절한 데이터 수집 및 전처리(사전 필터링 또는 데이터 이상치)는 정확하고 신뢰할 수 있는 가상 센서 모델의 개발에 필수적이다. 실험 데이터의 종류와 범위는 모델링 방식에 따라 달라진다. Transient 데이터는 정상 상태 모델링 방법에 대해 필터링 해야 하는 반면 transient 센서는 일시적인 테스트 데이터가 필요하다. 정상 상태 검출기는 임시 데이터를 제거하는 프리 프로세서로 사용할 수 있다. 블랙박스 모델의 PCA는 모델 선택에 도움을 주기 위해서 사전 처리 데이터에 접근하는 방법이다.

- 모델 선택과 조정은 가상 센서를 개발하는 과정에서 가장 어렵고 중요한 단계이다. 선택하는 많은 모델의 종류가 있고, 각각은 적절한 모형 순서를 결정, 매개변수 추정, 그리고 모델 선택/순서 재정의 과정이 필요하다.

- 가상센서는 독립적인 하드웨어 형태로 적용될 수 있고 자동제어 시스템의 한 요소로 활용될 수 있다. 두 경우 모두, 가상 센서 성능을 평가하기 위해 실험실연구와 현장연구를 통해 테스트해야 한다. 통계적 접근은 정확성을 검증하는 데 사용할 수 있다.

- 지열에너지는 토양, 지하수, 지표수 등이 지구 내부의 마그마 열에 의해 보유하고 있는 에너지를 말한다. [그림 1.1.5]와 같이 태양열의 약 51%가 지표면을 통해 지하에 저장되어 있다가 대기로 방산되거나 다시 우주로 반사되는 형태의 열평형을 유지하고 있다.

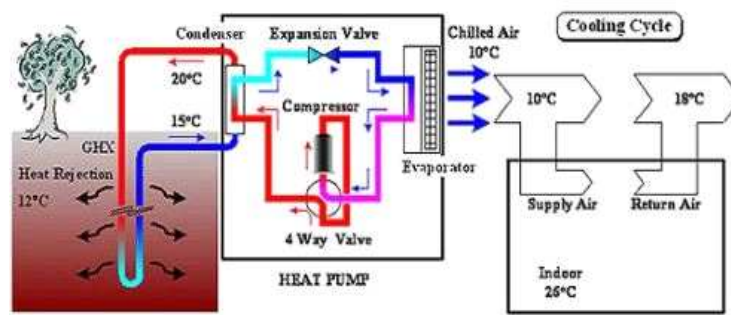


[그림 1.1.5] 태양열의 열평형

▫ 태양열을 흡수한 땅속의 온도는 지형에 따라 다르지만, 지표면 가까운 땅속의 온도는 개략 10~20℃ 정도 유지해 열펌프를 이용하는 냉난방시스템에 이용된다. 우리나라의 기후 조건에서 지하심도 6-8m 이하에서는 연중 약 15℃로 일정한 지하의 온도를 유지할 수 있어 이를 히트펌프의 열원으로 활용한다면 안정적인 성능을 확보하면서 냉난방 열원으로 이용이 가능하다.

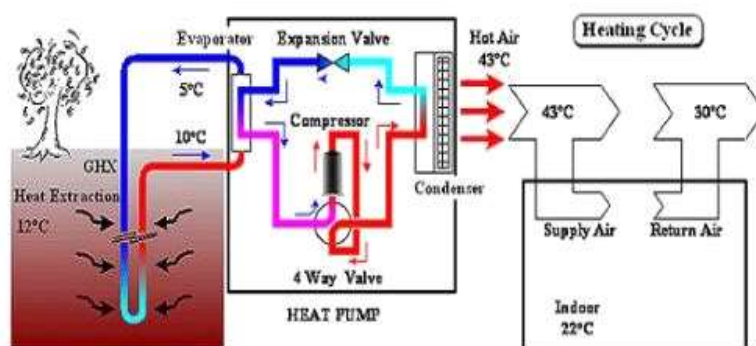
▫ 지열 히트펌프 시스템은 연중 온도가 일정한 지하수, 지표수 및 지중을 냉방 시에는 Heat Sink로, 난방 시에는 Heat Source로 이용하여 건축물의 냉/난방을 동시에 가능하도록 하는 복합형 시스템이다. 크게 지중 열교환기와 히트펌프 유닛으로 구성되어 있으며 미국의 환경청에서는 지열 히트펌프 시스템을 에너지 효율이 높은 에너지 절약 시스템으로 평가하고 있다.

▫ [그림 1.1.6]은 지열히트펌프 시스템의 냉동 사이클로, 압축, 응축, 팽창, 증발과정의 4 사이클이 반복되어 운영된다. 압축기에서는 증발기에서 증발한 냉매를 흡입, 압축하여 고온고압의 상태를 만들어 상온에서 액화가 쉽게 되도록 도와준다. 응축기에서는 압축기에서 나온 냉매가스를 증발이 쉽도록 액체 상태로 상태변화 과정을 통하여 고온고압의 냉매액이 된다. 팽창밸브는 증발기에서 증발을 쉽게 할 수 있도록 압력을 낮춰주는 역할을 한다. 그리고 증발기에서는 팽창밸브를 통해 나온 저온저압의 냉매가 실내공기로부터 열을 빼앗아 기화가 되며 그 결과 실온이 내려가게 되어 냉방효과를 얻게 된다.



[그림 1.1.6] 지열히트펌프 시스템의 냉방 사이클

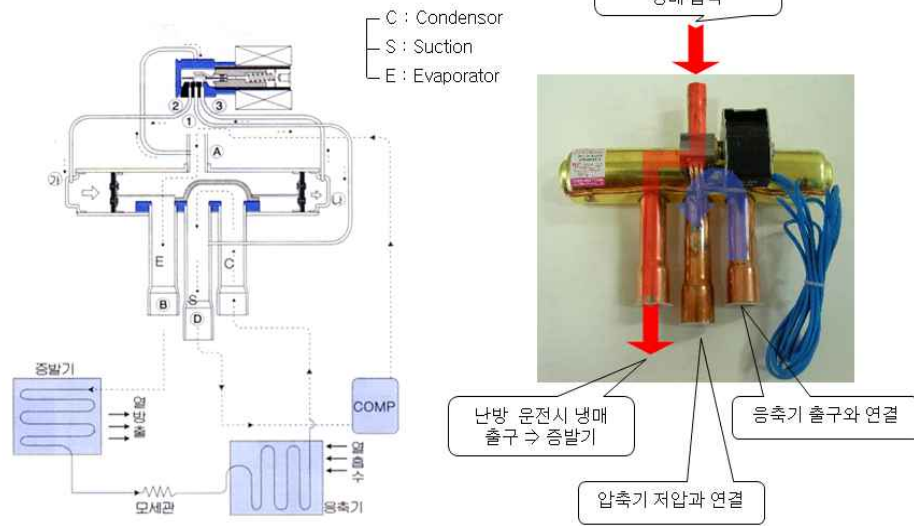
◦ [그림 1.1.7]과 같이 지열은 냉방 사이클과는 반대로 난방에너지원으로도 이용된다. 압축기로부터 토출된 고온고압의 냉매증기는 4방 밸브를 거쳐 응축기로 유입된다. 응축기로부터 배출된 고온의 냉매는 실내의 순환공기 또는 물과 열 교환이 이루어지면서 액상으로 상태변화를 한다. 이 때 실내를 순환하는 공기 또는 물은 냉매가 갖고 있던 열에 의하여 승온되며, 승온된 공기 또는 물을 분배장치를 통하여 강제 순환시켜 난방을 하거나 온수를 공급하게 된다. 응축기를 통과하면서 액상으로 상변화한 냉매는 팽창밸브를 지나면서 온도와 압력이 감소하여 증발기로 유입된다. 증발기로 유입된 냉매액은 지중 열교환기를 순환하는 고온의 부동액에 의해 증발하고, 4방 밸브를 거쳐 압축기로 흡입된다. 지중 열교환기를 순환하는 부동액은 증발기에서 냉매를 증발시키고 보통 5~6°C 정도로 온도가 감소하는데 이때 부동액의 증발기 입구 온도는 대략 10°C이다. 이렇게 온도가 낮아진 부동액은 지중열교환기 내를 순환하면서 토양과 열교환 되어 설정 EWT(Entering Water Temperature)로 된다.



[그림 1.1.7] 지열히트펌프 시스템의 난방 사이클

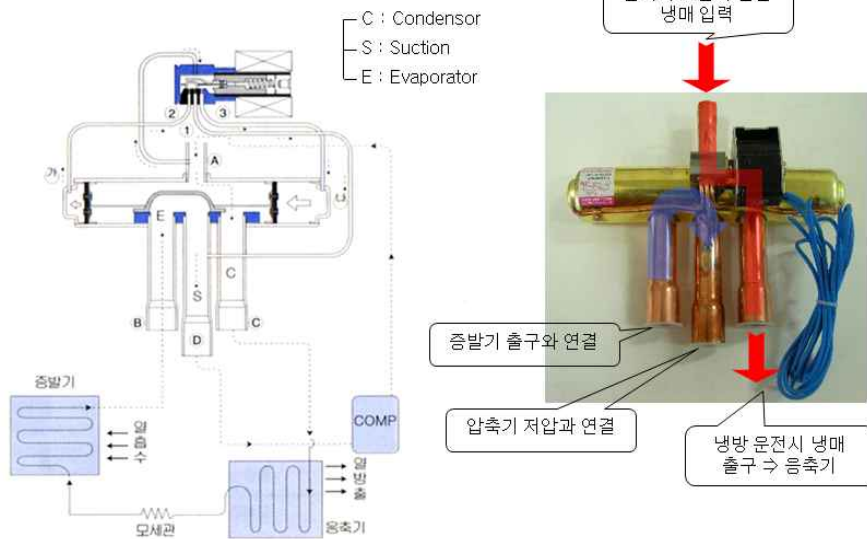
◦ 지열히트펌프 시스템은 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기, 지중 열교환기, 그리고 4방 밸브로 구성되어 있다. 압축기는 고, 저압밸브가 있어 흡입 토출작용을 반복하며 증발기에서 증발한 저온, 저압의 기체냉매를 흡입, 압축하여 고온, 고압의 냉매가스로 만들어 응축기로 보내 냉매를 순환시키는 펌프 역할을 한다. 응축기는 난방 시 압축기에서 토출된 고온, 고압의 기체냉매를 상온하의 공기에 접촉시켜 열을 제거함으로서 냉매를 응축 액화시키는 장치이다, 즉 초기에 증기냉매는 실내공기에 의해 열을 빼앗기므로 액냉매로 상변화를 하며 잠열에 해당 하는 열이 실내로 방열되어 실내를 따뜻하게 한다. 팽창밸브는 응축기에서 넘어온 저온, 고압의 액 냉매를 증발기에서 증발하기 쉽도록 교축하여 저온, 저압의 냉매가스로 변화 시켜 주는 장치이며 냉매의 유량을 제어하는 역할을 한다. 증발기는 팽창밸브에서 넘어온 저온, 저압의 액 냉매가 저온, 저압의 기체냉매로 변화 하면서 피 냉각 물질로부터 열을 흡수하여 증발함으로써 냉동목적을 직접 달성하며, 간접냉각방식과 직접냉각방식으로 분류 된다. 지중 열교환기는 여름철, 저온저압의 액 냉매는 지중 루프시스템과 연결된 증발기를 지나면서 비교적 수온이 높은 루프시스템내의 순환수로부터 열을 추출하여 증기냉매로 상변화 한다. 마지막으로 4방 밸브는 지열펌프는 [그림 1.1.8]과 같이 4방 밸브를 이용하여 냉방운전을 난방운전으로 전환시킨다. 일반적으로 압축기를 통과한 증기냉매는 고온고압이기 때문에 열을 방열시킬 수 있는 열에너지가 낮은 응축기는 고온고압이기 때문에 열을 방열시킬 수 있는 열에너지가 낮은 응축기 방향으로 이동한다. 4방 밸브를 통과한 고온고압의 증기냉매가 실내에 설치된 컨덴서로 이동하면 지열펌프는 난방 모드가 되고 그 반대로 지열교환기로 이동하면 냉방형식이 된다.

난방운전: 4방면 코일에 전원 인가됨



(a) 4방밸브 난방운전

냉방운전: 4방면 코일에 전원공급안됨



(b) 4방밸브 냉방운전

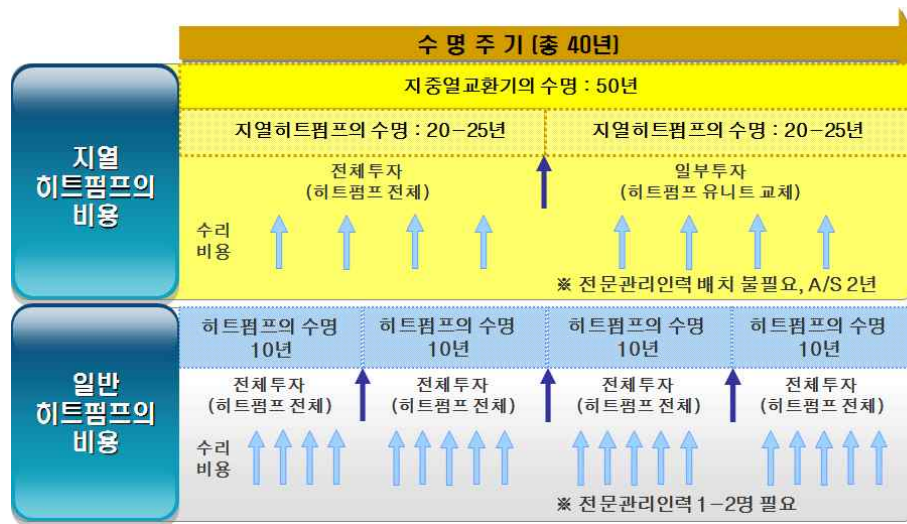
[그림 1.1.8] 4방 밸브 모식도

◦ 미 자원국(DOE)의 연구결과에 의하면 공랭식 시스템에 비해 지열 시스템의 에너지 소비량 절감율이 지역에 따라 차이가 있지만, 17-42%에 달한다고 보고하고 있다. 또한, 미국 환경보호청(EPA)은 지열 이용 히트펌프 시스템이 현존하는 냉난방시스템 중에서 가장 에너지 효율적이고 친 환경적이 시스템이라고 공인하고 있다. 미국의 환경청(US

EPA)에서는 지열이용 히트펌프시스템이 현재까지 개발된 냉난방 기술 중에서 가장 에너지 효율이 높은 에너지 절약 시스템으로 평가하고 있다. 영구적인 지구에너지인 지열을 회수하여 실효성 있는 냉난방설비용 에너지로 활용하여 미 이용에너지의 활용을 현실적으로 가능하게 하여 에너지 절약뿐만 아니라 환경 친화적인 설비시스템이기 때문이다. 이를 적극적으로 보급하기 위하여 에너지스타 프로그램 등의 활용을 추천하고 있다. 지열이용시스템이 한번 시공하고 나면 매우 안정적인 냉난방시스템으로 평가되고 있다. 이 시스템은 기후조건이나 재실자의 요구에 따라 수시로 냉방이나 난방모드로의 전환이 용이할 뿐 아니라 대형 냉동기나 보일러가 불필요하여 유지관리에 특별한 기술이 요구되지 않는 등 많은 장점을 지니기 때문에 판단되어진다. 그러나 다소 초기 투자비용이 높고 천공면적이 필요하다는 단점이 있다.

▫ 지열 히트펌프의 효과는 다음과 같다. 먼저 지열 히트펌프는 지열에너지의 유효이용을 통한 에너지절약 기술로 연중 비교적 일정한 온도를 유지하고 있는 토양의 지열을 활용한 미 이용 에너지원의 효과적인 활용을 통한 에너지절약 효과기대할 수 있으며, 냉난방을 위한 화석에너지의 연소로 발생하는 환경오염의 최소화 기대지열을 이용한 청정에너지의 유효사용에 대한 기반 마련하고 에너지 수요증가에 능동적인 대체에너지인 지열을 활용한 히트펌프시스템의 개발을 통하여 에너지의 절약기술을 확보함으로써 건물에너지의 수요증가에 대체할 수 있는 토대 마련하는 신뢰성과 안정성을 확보한 대체에너지이다. 또한, 부분 냉.난방 부하의 변동에 세밀하게 순응하고 시간외 운전도 개별적으로 대응할 수 있으며 유니트 당 냉.난방 동시 운전이 가능하기 때문에 동절기에도 냉방운전을 할 수 있는 장점이 있다 뿐만아니라 냉. 난방 절환에 의해 실내온도 제어도 완벽하게 처리할 수 있고 한랭지와 여름철 혹서기에서도 기후조건에 좌우되지 않고 안정된 냉.난방 능력을 얻을 수 있으며 겨울철, 여름철의 예열, 예냉이 신속하게 행해지고 대형 열원기기(대형 보일러, 냉동기와 펌프 등의 주변기기)가 불필요하므로 기계실의 면적을 큰 폭으로 경감시킬 수 있으며 큰 덕트 시공이 불필요하기 때문에 천장속 공간을 경감시켜 천장고를 높이거나 동일조건에서 층고를 낮출 수 있는 유지관리가 편리한 에너지절약적인 시스템이다. 마지막으로 지열 히트펌프는 효율적이고 안정성이 큰 시스템이다. 왜냐하면 지열회수의 무공해, 환경친화적인 시스템으로 안전 측면에서도 안심할 수 있으며, 만일 히트펌프 유니트가 고장났을 경우에도 시스템 전체를 정지하지 않고도 수리가 가능기 때문이다. 또한 [그림 1.1.9]와 같이 열교환기의 수명이 40~50년 으로 반영구적 수명을 가지고 있으며 화재폭발 위험이 없고 별도 관리가 불필요 하며, 실외기나 냉각탑이 필요 없고 설비가 외부

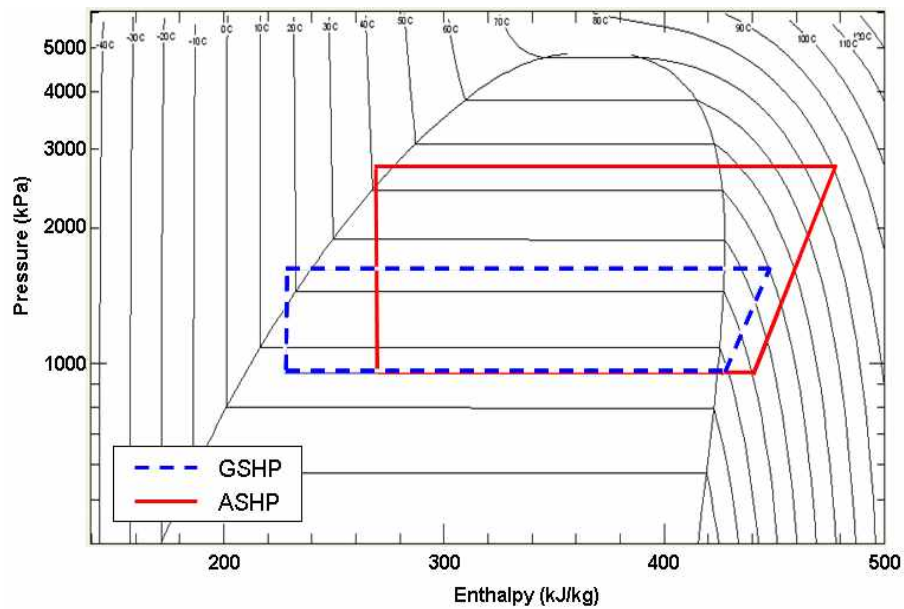
에 노출되어 나타나는 부식이나 손상이 없기 때문이다.



[그림 1.1.9] 지열 설비의 유지관리

◦ 지열 히트펌프는 히트싱크 및 열원의 역할을 하는 지열의 연중 온도변화는 외기보다 안정적이기 때문에 공랭식 열원시스템보다 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 부산대학교 첨단 냉동 공조 에너지 센터에서는 공랭식 히트펌프(ASHP)시스템과 지열 히트펌프의 성능을 비교하기 위해 동일 용량의 공랭식 히트펌프를 설정하여 분석하였다. 냉방성능 비교를 위해 지열 히트펌프는 해당 연구에서 측정된 실사용 조건을 사용 하였고, 공랭식 히트펌프 표준 조건(실내 27℃ DB/19.5℃, 실외 35℃ DB/24℃ WB)에서 측정된 데이터를 활용하였다. [그림 1.1.10]는 냉방 운전 시 지열 히트펌프와 공랭식 히트펌프의 P-h 선도를 나타낸 것이다. 운전 조건은 외기온도를 35℃, 지열 히트펌프의 경우 열교환기(응축기)의 순환수 입구 온도를 20.4℃로 가정하였다. P-h 선도 상에서 지열 히트펌프의 응축기 압력이 공랭식 히트펌프보다 낮은 이유는 응축기를 판형열교환기를 사용하기 때문에 외기온도에 영향을 받지 않고, 지중의 안정한 열을 제공 받으며, 공기 대신 물에 의한 열교환을 하기 때문에 열전달 특성이 우수하다. 따라서, 응축기의 압력이 낮아지고 압축비가 작아지므로 전력 소비량이 적어 냉방성능이 우수하다. [표 1.1.1]과 같이 지열 히트펌프는 공랭식 히트펌프에 대비 2배 이상 냉방 COP가 향상되고, 실내 팬 및 순환수 펌프의 소비전력을 감안한 전체 시스템의 냉방 성능은 약 80% 우수한 것으로 나타났다. 난방 시에도 응축기의 고 압축 압력이 낮아지고 저 압축 압력이 높아져 압축비가 작아지므로 전력 소비량이 적어 냉방성능이 우수하다. [표 1.1.2]와 같이 지열 히트펌프는 공랭식 히트펌프에 대비 2배 이상 냉방 COP가 향상되고, 실내 팬 및 순환수 펌프의 소비전력을 감안한 전체

시스템의 냉방 성능은 약 30%이상 우수한 것으로 나타났다.



[그림 1.1.10] P-h선도에 나타난 지열히트펌프 시스템과 공랭식 히트펌프

[표1.1.1] 공랭식 히트펌프 시스템과 지열 히트펌프 시스템의 비교 1

구분		지열HP	공랭식HP	부하율
증발기 열원온도(℃)		17 (순환수온도)	7 (외기온도)	
압축기	High pressure (kPa)	2850	2992	
	Low pressure (kPa)	1149	734	
성능	COP _{hpP} (average)	5.57	3.16	40%
		4.9(추정)	3.66	100%
	COP _{overall} (average)	4.2	2.69	40%
		4.4(추정)	3.39	100%

[표1.1.2] 공랭식 히트펌프 시스템과
지열 히트펌프 시스템의 비교 2

구분		지열HP	공랭식HP	부하율
콘덴서 열원온도(℃)		20 (순환수온도)	35 (실외온도)	
압축기	High pressure (kPa)	1620	2731	
	Low pressure (kPa)	956	956	
성능	COP _{hpP} (average)	9.6	4.26	40%
		7.2(추정)	3.18	100%
	COP _{overall} (average)	5.95	3.38	40%
		6.07(추정)	2.96	100%

◦ 지열 히트펌프의 성적계수(Coefficient Of Performance, COP)는 지열히트펌프의 냉각 성능을 나타내는 값으로서 열효율이 좋고 나쁨을 판정하는 기준으로 사용되며, 압축기가 1kg의 냉매를 압축하여 얻을 수 있는 냉각효과를 계수로 표시한 것이다. 즉, 어떤 조건 하에서 공급하는 일(W)에 대하여 냉동하여 얻을 수 있는 냉동효과 Q₁의 비율로 나타낸다. COP가 낮을수록 냉동기는 효율이 저하된 것을 의미하며 냉각능력에 비해 소비전력의 증대를 초래한다. 냉동기와 비교하면 고온 물체의 절대온도 T₁은 응축기에서 응축된 냉매의 온도에 상당하게 되고, 저온물체의 절대온도 T₂는 증발기에서 증발하는 냉매의 온도이다. 따라서 응축온도는 가능한 낮을수록, 증발온도는 가능하면 높게 할수록 성적계수는 좋게 된다. [그림 1.1.11]은 냉방과 난방 시 지열 히트펌프 시스템의 COP를 구할 때 이해를 돕기 위한 시스템 원리의 그림이다.

지열 히트펌프 시스템의 성적계수 = 증발기 열량 / 압축기 일의 열량

COP_h = 방출한 열량 / 압축기의 소비전력

COP_c = 생성한 열량 / 압축기의 소비전력



[그림 1.1.11] 히트펌프 시스템의 원리

나. 연구개발의 필요성

▫ 세계에너지협의회(WEC; World Energy Council)는 전 세계 93개 에너지 생산국과 소비국이 3년마다 국제회의를 열어 에너지 전략을 논의하였다. 에너지 전환이 가져온 변화에 대응하기 위해 세계에너지 협의회가 정의한 에너지삼중고 - 에너지안보, 에너지 평형, 환경지속 가능성 해결목적 달성을 위한 노력의 중요성을 인지하였다. 이렇게 전 세계가 에너지 절약방안과 효율적인 사용에 대한 관심을 쏟고 있다.

▫ 국내 전체 에너지 소비량에서 건물부분이 차지하는 비중은 30% 이상이며 계속 증가추세에 있다. 에너지 사용에 큰 부분을 차지하는 건물분야에서도 에너지의 절약뿐만 아니라 에너지의 효율적인 사용에도 합리적인 방안이 필요하다. 그러기 위해서는 건물 에너지 시스템의 효율적인 운영과 시스템의 유지관리의 최적화가 이루어져야 한다. 그러나 건물 시스템에서 에너지 효율이나 관리에 대한 최적 제어피드백 제공은 매우 복잡하고 어려운 실정이다.

▫ 건물시스템에는 각각의 특성을 갖는 수천 개의 모니터링 센서가 필요하다. 이러한 센서들의 정보 이용은 높은 가치를 가지며 이전에는 불가능했던 건물의 최적화를 가능하게 한다. 하지만 모든 부분에 센서를 설치하는 것은 비용측면에서도 큰 문제가 따를 뿐 아니라 경우에 따라 정확하게 원하는 양을 측정 할 수 있는 물리적 센서를 설치하는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 건물 시스템은 각각의 건물마다 개별적으로 설계하는 경향이 있어 고급기능에 대한 비용 임계값이 훨씬 높다. 따라서 건물보다 지능적인 기능을 실현하는 핵심은 비용 임계값을 줄이는 데에 있다. 그 해결방법중 하나가 가상센서 기술을 활용하는 것이다.

▫ 가상센서는 측정하기 어려운 부분을 저비용으로 여러 가지 수학적 모델을 사용하여 새로운 추정을 이끌어 내는 것을 말한다. 즉, 실제 센서를 설치하지 않고, 기 측정되는 데이터 포인트를 이용하여 물리량을 산출하는 방법이다. 이러한 방법은 안전성, 에너지효율성, 비용 측면에서 건물의 시스템을 향상시키는 역할을 하며 높은 가치의 정보를 제공하기 위한 잠재력을 지니고 있다.

▫ 또한 가상센서는 보조시스템 뿐만 아니라 전체 시스템 등 건물 내에서 거의 모든 장치에 결합하여 시스템의 성능향상과 가치 있는 정보를 제공할 수 있다. 그러나 국내 연구진행 결과를 살펴보면 건물에서의 가상센서의 개발은 매우 미비한 상황이다.

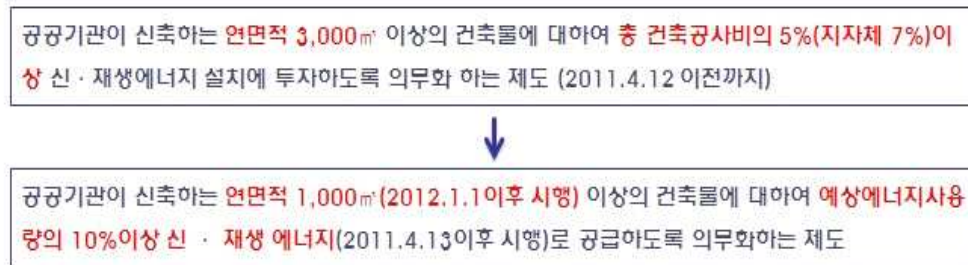
▫ 최근 건물의 고층화, 지능화는 설비시스템을 다양하고 복잡하게 만들었다. 건물의 HVAC(Heating Ventilation and Air Conditioning) 시스템을 비롯하여 에너지 설비들의 규모가 커지고 자동화되면서 각각의 센서들의 연계성은 매우 높아졌다.

▫ 적절한 제어나 성능이 낮아진 건물 공조시스템이 사용될 경우 연간 에너지 사용량이 30~50%까지 증가 될 수 있다. 이에 따라 HVAC 시스템에서 저비용으로 높은 수준의 정보를 얻어 건물 에너지 모니터링 시스템을 구축하고 최적의 제어에 활용하는 방안을 모색하고자 한다.

▫ 국내에서 기존 화석연료 발전업체가 일정 비율을 의무적으로 신재생에너지로 발전토록 하는 신재생 공급 의무화(Renewable energy Portfolio Standard, RPS)제도가 2012년에 도입되었다. RPS는 Renewable energy Portfolio Standard의 약어로 500MW 이상의 시설을 보유한 발전 사업자에게 총 발전량에서 일정 비율을 신재생에너지로 공급하도록 의무화하는 제도를 말한다. 늘어나는 이산화탄소 배출량을 줄이고 신재생에너지 시장을 키우기 위해 2000년대 초반부터 영국, 스웨덴, 캐나다, 일본, 호주, 미국 등 전세계적으로 RPS 제도를 도입하여 운영 중이며, RPS제도에 따르면 2014년 3%인 신재생에너지 의무공급비율은 2022년에 10%까지 단계적으로 높아진다.

▫ 신재생에너지 설치 의무화 사업은 [그림 1.1.12]과 같이 공공기관이 신축하는 연면적 3,000㎡이상의 건축물에 대하여 총 건축공사비의 5%(지자체 7%)이상 신·재생에너지 설치

에 투자(2011.4.12이전까지)하거나 예상에너지사용량의 10%이상을 신재생에너지(2011.4.13 이후까지)로 공급토록 의무화하는 제도이다.



[그림 1.1.12] 신재생 설치 의무화 제도

1.2 관련분야의 국내외 기술개발 현황

가. 국내외 시장분석 및 산업동향

▫ 에너지 자체에 대한 관심이 높기 때문에 세계가 모두 에너지의 효율적인 사용뿐만 아니라 에너지를 사용함에 있어서 시스템이나 그 시스템의 최적화 제어, 관리, 고장감지, 진단 등 모든 부분에 대한 관심이 높다.

▫ 저비용으로 높은수준의 시스템 정보를 제공하는 건물의 가상센서는 모든 설비시스템을 최적의 상태로 유지시킴과 동시에 신뢰성을 향상시킬 수 있는 기술로서, 에너지 손실을 막을 수 있는 향후 꼭 필요한 기술이라 할 수 있다. 그러나 건물에 적용 가능한 가상센서 개발 기술은 국내 연구가 부족한 상황이다.

▫ 가상센서 연구 및 개발과 관련하여 대표적인 연구는 Lawrence Berkeley National Laboratory, Ezenucs(formerly Sensus M.I), Univ.of Nebraska at Lincoln, Univ.of Oklahoma, Univ.of Florida 등의 기관에서 진행중이다.

1) 가상센서 개발 예

[냉동기 가상 센서]

▫ 다수의 연구들(Wang and Cui 2006; McIntosh et al. 2000; Reddy 2007a, 2007b; among others)에서 저비용 측정을 이용하여 냉동기에 발생하는 일반적인 오류를 식별하는데 초점을 두고 있다. 센서 출력값은 모니터링 및 고장 진단 기법의 일환으로 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 증발기 및 응축기의 열전달 전도 계수는 열 교환기의 전반적인 성능을 모니터링하는 것에 사용할 수 있다. 압축기의 성능은 입구와 출구 상태 측정에서 결정된 가상 폴리트로픽 효율을 사용하여 모니터링 할 수 있다.

[히트펌프 가상 센서]

▫ Air conditioner에 개발 된 가상 센서(Li and Braun 2007a, 2007b, 2009a, 2009b)는 일반적으로 히트펌프에 적용이 되고, 고장 진단에 사용할 수 있다. 그러나 reversing valve 누출, 체크 밸브 누출과 같은 히트펌프에서만 발생하는 몇몇 추가적인 고장은 특별한 가상센서가 필요하다. Li and Braun (2009c)은 이러한 두 가지 고장을 식별해내는 가상 센

서를 제안하고 테스트하였다. 일부 실험실 평가는 난방 모드에서 누수 지표를 사용하여 진단 성능을 평가하기 위해 수행되었다.

[냉매 유량 가상 센서]

◦ 냉매 유량은 성능 모니터링 및 진단을 위한 매우 가치 있는 측정이다. 그러나 직접 측정하기에 너무 비싸고 응축기 출구에서 두 상태가 혼합 할 때 측정값을 신뢰할 수 없다. Li and Braun(2007)은 가상 센서의 일부인 다른 측정치로부터의 냉매 유량을 추정하는 두 가지 방법을 제안했다.

[펌프 유량 가상 센서]

◦ Liu et al. (2007a)은 펌프 성능을 결정하는 펌프 헤드, 펌프 속도, 경험적계수를 사용한 펌프 유량 가상 측정기를 제안했다. 이 가상 센서는 펌프 효율, 난방 에너지 소비량 및 냉동기 효율을 추정시 사용할 수 있고 건물 에너지 관리 및 제어 시스템 내에서 사용할 수 있다. 사례연구는 chilled-water system을 가진 건물에서 수행되었고, 이 연구에서 저렴한 비용의 가상 센서가 유량을 정확하게 측정하고 에너지 소비량을 모니터링 하기 위해 다른 측정과 함께 사용되는 것이 증명되었다. 가상유량계는 성능 모니터링뿐만 아니라 최적의 펌프 속도 제어에 적용 할 수 있다(Liu et al. 2007b).

▶ 냉매 배관 통과량 센서

▶ 냉매 배관 압력 센서

▶ 냉매 배관 온도 센서
▶ 냉매 배관 압력 센서
▶ 냉매 배관 하역 센서
▶ 냉매 인출량 측정 센서
▶ 냉매 하역시 과열 감지 센서

▶ 냉매 배관 온도 센서
▶ 냉매 배관 압력 센서
▶ 냉매 배관 하역 센서
▶ 냉매 배관 온도 센서
▶ 냉매 배관 압력 센서

▶ 냉매 배관 온도 센서
▶ 냉매 배관 압력 센서
▶ 냉매 배관 하역 센서
▶ 냉매 배관 온도 센서
▶ 냉매 배관 압력 센서
▶ 냉매 배관 하역시 과열 감지 센서



▶ 냉매 배관 온도 센서
▶ 냉매 배관 압력 센서
▶ 냉매 배관 하역 센서

[그림 1.2.1] 건물의 가상센서 예시

[팬 풍량 가상 센서]

▫ G.Liu and M.Liu (2012)는 기존의 팬 커브와 풍량 또는 팬 헤드를 이용하여 가상풍량계 제안하였다. 가상 풍량계는 팬 차압, 팬 속도 및 팬 커브를 사용하여 공급 및 리턴 풍량을 추정한다. 가상 풍량계는 건물 압력 제어를 개선하고 팬 에너지 소비를 줄이기 위해 제안된다.

[재실자 불만족 가상 센서]

▫ 건물 외피와 거주공간을 위한 가상 센서로 Federspiel (2000)은 실의 온도가 설정온도에서 벗어나는 것으로 인해 재실자의 불만의 빈도를 추정하는 모델을 개발하였다. 이 모델은 실의 온도 측정을 이용하여 덥거나 추운 불만의 빈도와 불만이 발생하는 온도의 임계값을 예측한다. occupant costs를 위한 가상 센서의 이러한 유형은 불만을 최소화하는 설정 온도의 최적화를 위해 에너지 관리와 제어 시스템 내에서 통합할 수 있다.

[혼합 공기 온도 가상 센서]

▫ Wichman and Braun (2009)은 현장 측정과 자가 교정을 바탕으로한 MAT 가상센서 방식을 제안하였다. 방법은 댐퍼 제어 신호와 외기온과 리턴에어 온도차에 있어서 bias 오류의 상관관계를 기반으로 한다. Wichman and Braun (2009)에 의해 제안된 가상 MAT 센서는 비싼 측정 그리드 또는 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하는 전형적인 기술 장벽을 극복했다.

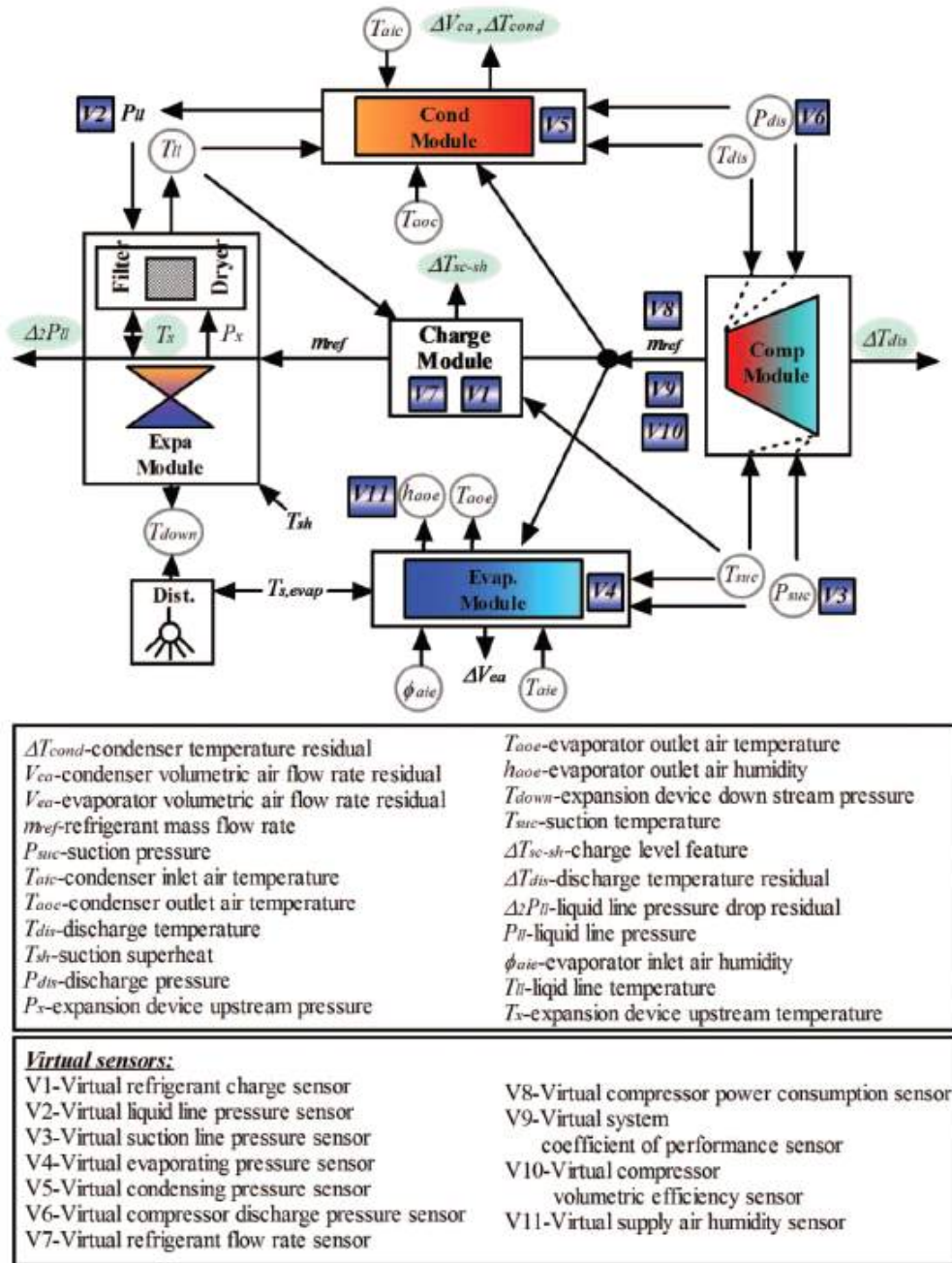
[그림 1.2.2] 가상 유량계 예시

[혼합 공기 습도 가상 센서]

▫ 증발기 입구 습도 센서는 비용, 정확성 및 신뢰성 때문에 빌딩 기계 시스템에서 영구적으로 설치하지 않는 경향이 있다. 직접 측정은 리턴에어와 환기에어 상태가 비 균일하기 때문에 매우 부정확할 수 있다. 또한, 습도 센서는 먼지에 민감하고 보정이 힘들 수 있다. Wichman and Braun (2009)은 가상 혼합 공기 습도 센서의 개발의 기초가 될 수 있는 가상 MAT 센서를 제안했다.

[증기 압축 냉동 공조 가상 센서]

▫ Li and Braun (2007a, 2007b, 2009a, 2009b) 건물 응용 프로그램에 대한 virtual sensing 개념을 도입했다. 열한개의 가상 센서는 고장 검출 진단(FDD) 방식에 대한 비용 절감을 주요 목적으로 증기 압축 공조기에 개발하였고 검증하였다. 이 가상센서는 시스템이 정상상태에서 작동하는 동안에 얻을 수 있는 네 가지 표면의 온도(응축온도, liquid-line온도, 증발온도, 흡입라인온도)를 이용하였다.



[그림 1.2.3] 증기압축냉동기 가상센서 예시

2) 지열 히트펌프 기존 연구 동향

신재생에너지에 대한 관심이 높아짐에 따라 태양광, 태양열, 지열 등 신재생에너지 시스템에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다. 지열 냉난방 시스템의 경제성 및 편리성에 대한 인식이 확산되고 이에 따라 지열 히트펌프 시스템에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 주로 지중 열교환기의 효율을 높이기 위한 연구와 성능평가에 관한 연구가 많이 진행

되고 있다.

지열 히트펌프 시스템의 성능평가에 관한 연구를 정리하면 다음과 같다. 남유진의 연구에서는 태양열 및 지열을 이용한 히트펌프 시스템의 동적 에너지 시뮬레이션을 통한 시스템 성능해석을 실시하였다. 기후 조건이 다른 두 지역에서 다양한 도입조건에 따른 시스템 성능 변화를 비교 검토하였다.

또한 황인주와 Ozgener의 연구에서는 실제 시스템의 실험적 성능평가를 통하여 복합사용 가능성과 성능을 확인하였다.

손병후의 연구에서는 실제 업무용 건물에 기존의 냉난방 설비 대신 지열 히트펌프 시스템을 설치한다고 가정한 후 시뮬레이션을 통해 냉난방 성능을 예측하였다.

장재철은 지열히트펌프 시스템 자체의 성능 확인을 위해 실제 실험과 EES 및 TRNSYS를 이용하여 분석하였다. 또한 지중 열교환기의 효율 및 지중 순환수 및 온도에 관한 연구가 많이 진행 되었는데, 박정환의 연구에서는 지열 히트펌프 시스템의 적정 설계에 대한 고찰과 운전현황 파악 및 이용 실태를 조사하고, 지하수 우물이 시스템에 적합하게 사용될 수 있는지를 알아보기 위해서 매설 깊이에 따른 지중온도 변화를 측정했으며, 또 그에 따른 열교환기의 성능과 히트펌프 성능을 분석하였다.

정영주 외 3명은 지열 히트펌프 시스템에서 지중 순환수 유량 변화에 따른 지열히트펌프 유닛의 COP와 펌프 소비동력을 분석하였다. 그 외에도 이신영의 연구에서는 조사대상 건물의 전력 소비량 및 냉난방 에너지 소비량에 대하여 중점을 두고 주열원인 지열 시스템에서의 설계 부하량과 실제사용량 데이터 분석을 통해 최적설계방안을 도출하였다. 다양한 관점에서 지열 히트펌프 시스템의 연구가 진행되었지만 실제 건물에서의 지열 히트펌프 시스템의 기존열원과의 복합 운영방안에 대한 연구는 부족했다.

유시완의 연구에서는 AHU의 개폐 정도를 제어 포인트에 추가하고 시간지연에 의한 순차적 제어를 제안하며 기존 열원과 지열 히트펌프 시스템의 복합운영에 관한 연구를 진행하였다. 그러나 기기의 효율이나 성능, 환경변수를 반영하는 구체적인 연구가 이루어지지 않았다.

선행연구에서는 지열 히트펌프 시스템에 대한 다양한 시각의 연구가 진행되고 있었다. 지열 히트펌프 시스템의 설계부터 개별 시스템의 성능평가에 관한 연구, 지중 열교환기의 효율을 높이기 위한 연구가 주로 진행되고 있었다. 우리나라의 대부분의 건물에서는 지열 히트펌프 시스템과 기존 열원시스템을 동시에 사용하고 있지만 복합열원을 운영하는 방안에 대한 연구는 현재 미비한 실정이다.

나. 국내외 관련 기술 특허 동향

▫ 건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어를 위한 가상센서 개발과 관련된 기술은 크게 (1) HVAC 시스템의 가상센서 기술과 (2) 가상센서를 활용한 성능 모니터링 시스템 및 최적제어 기술로 구분하여 분석한다.

- HVAC 시스템의 가상센서와 관련하여 국내 특허 동향은 전무하다.
- HVAC 시스템 최적제어 기술 및 건물에너지 성능 모니터링과 관련하여 국내의 경우 수많은 건물 최적제어 기술 및 특허들이 존재하나 본 연구와 같이 가상센서를 활용한 건물에너지 성능 모니터링 기술 및 HVAC 시스템 최적제어 알고리즘 관련 특허는 전무하다.

[표1.2.1] 조사대상 및 검색DB

조사대상 국가	한국		미국	일본
대상기간	1980~2014			
키워드	국문	가상센서, 건물에너지, 성능 모니터링, HVAC 최적제어		
	영문	Virtual sensor, Building energy, Monitoring, HVAC optimal control		
검색방법	Google Patents (http://www.google.com/patents)			

[표1.2.2] 특허 검색 결과

번호	특허명	보유기관명	출원일
JP2001349598A	Performance evaluation system for electric installation in building, outputs building performance evaluation information based on computed energy consumption in building	SHIMIZU CORP	2001 12-21
JP2003091311A	Energy saving diagnostic method in building using internet, involves comparing stored standard energy consumption information with calculated energy consumption information, for displaying energy saving evaluation result	HITACHI PLANT ENG & CONSTR CO LTD	2003 03-28
JP2004227054A	Energy management system for buildings of factory, generates information required for obtaining environment management certification of buildings based on acquired data related to energy used by equipments in buildings	DAIKIN IND LTD	2004 08-12
US20070244604A1	Energy and cost saving calculation system's energy load e.g. steam, forecasting method for e.g. building, involves forecasting energy load for building using multi variant non-linear forecasting technique	Siemens Corporation, Iselin, NJ, US	2007 10-18
US20110029341A1	Web-based auditing system managing and utilizing building energy information, has device that receives login request from user and transmits message containing user specified and calculates information	ECOINSIGHT INC., Atlanta, GA, US	2011 02-03
US7451017B2	Energy and cost saving calculation system's energy load e.g. steam, forecasting method for e.g. building, involves forecasting energy load for building using multi variant non-linear forecasting technique	Siemens Building Technologies Inc., Buffalo Grove, IL, US	2008 11-11
WO2007118128A2	Energy consumption auditing, monitoring and controlling method for e.g. private office, involves obtaining energy consumption and physical conditions data from series of modules that monitor and control physical conditions	I-CONSERVE LLC, US BOGOLEA Bradley D., US BOYLE Patrick J., US SHINDYAPIN Andrei V., US	2007 10-18
WO2011038193A1	Virtual business model for specific building energy and audits, has federal/state/local incentive database defining incentives database that lists information related to federal, state and local incentives to purchase equipment	ESPINO Mario A. Jr, US	2011 03-31

다. 국내외 시장분석 및 산업동향

▫ 텍사스의 A&M 대학의 LoanSTAR program 의 연구에서, 이미 설비개보수가 이루어진 3개의 건물에서 제어 최적화가 수행되었다. 제어 최적화는 에너지 절약을 가능케 했고, 설비개보수가 수행된 2개의 건물은 예상 에너지 절약을 초과하였다. 이 연구에서는 단순한 설비개보수로 최대의 에너지 절약을 이루기는 불가능하며 제어 최적화와 설비개보수가 연계된다면 최대의 비용 효과를 이룰 수 있다.

▫ 허니웰, 존슨컨트롤즈, 앤도버 등 미국기업, 델타컨트롤즈 등 캐나다기업, 지멘스 등

독일 기업, 사우타 등 스위스기업, 야마다계 등 일본기업 등으로부터 70% 이상을 수입에 의존하고 있고 국내기술만으로 영업하는 업체는 극소수에 불과하다.

- IEA의 건물분야 Annex, 일본의 Cool Earth, 미국 DOE산하 LBNL/NIST 등 정부주도의 건물에너지 R&D가 지속적으로 수행되고 있으며 실증화 위주로 R&D 및 보급이 추진 중이다.

- ASHRAE 및 NEBB 기존건물 에너지 절약을 위한 기술 지침이 마련되어있다.

- 국내에서도 건물 성능 모니터링 및 HVAC 시스템의 최적제어의 중요성을 실감하고 있으나 대응이 미진한 실정이다.

라. 연구개발의 차별성

- 가상센서와 관련된 유사 과제의 분석 결과, 건물에 적용 가능한 가상센서 개발에 관련된 연구는 부재하다.

» 저비용으로 높은수준의 시스템 정보를 제공하는 건물의 가상센서를 개발하여 건물 에너지 성능 모니터링 시스템 및 HVAC 시스템의 최적제어 알고리즘 개발에 활용할 것이다.

- 건물 최적 제어와 관련된 유사 과제의 분석 결과, MPC 기반 최적 제어 시스템 기술을 개발 하여 건물 에너지 최적 설계 및 운영을 위한 요소 기술 개발, 지능형 건물을 위한 설비시스템의 최적화 설계 및 제어기술 개발이 주된 내용이다.

» 가상센서를 바탕으로 HVAC 시스템의 최적 제어 알고리즘 개발할 것이다.

- 건물에너지성능과 관련된 유사 과제의 분석 결과, 건물의 용도별 프로파일, 국제규격을 근거로 건물의 에너지성능을 평가하기 위한 설계 변수를 분석과 BIM설계 기반의 건물 에너지 성능 분석 프로그램 개발이 주된 내용이다.

» BEMS와 연계하여 가상센서를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 시스템 개발할 것이다.

1.3 연구개발의 최종 목표

가. 연구개발의 최종 목표

◦ 본 연구의 목표는 BEMS를 활용하여 HVAC 가상센서를 개발하고, 건물의 안정성과 에너지 절감을 확보하기 위한 성능모니터링 및 최적제어 기술을 개발하는 것이다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 가상센서의 이론적 성능검토, 현장적용 실험 및 성능검토, 가상센서 프로세스 설계인자의 최적화 연구 등 세부 항목의 목표 하에 체계적인 연구를 실시하였다.

[표1.3.1] 본 연구의 최종 목표

	항목	세부 연구목표
1	가상센서 개발에 대한 해석적 연구	기존 가상센서 문제점 및 개선요소 도출 성능목표 및 개발 방향 제시
2	BEMS 적용 가능한 가상센서 개발	BEMS에 적용 가능한 가상센서 프로세스 개발 및 현장실험을 통한 신뢰성 검토
3	가상센서를 활용한 성능모니터링 및 최적제어	건물 성능모니터링 및 최적제어에 활용, 검증 및 상용화

◦ 가상센서 및 건물에너지 성능 진단 및 최적제어 기술 개발은 국외에 비해 늦게 시작되었고 기술적인 성숙도가 떨어지는 등 아직 초보적인 단계에 머물러 있어, 현재 국내에는 국외에서 개발된 기술에 버금가는 연구는 아직 진행되지 않았다.

◦ 국내에서는 건물에너지 성능 진단 및 최적제어 기술은 ESCO에서 주로 담당하고 있지만, 개별 장비 위주의 개선으로 조명 및 냉난방 설비의 하드웨어 개발에만 국한되고 있어 BEMS와 연계된 가상센서 기술이 접목된 통합적인 건물에너지 성능 진단이 요구되는 실정이다.

나. 연구목표 및 연차별 연구 내용

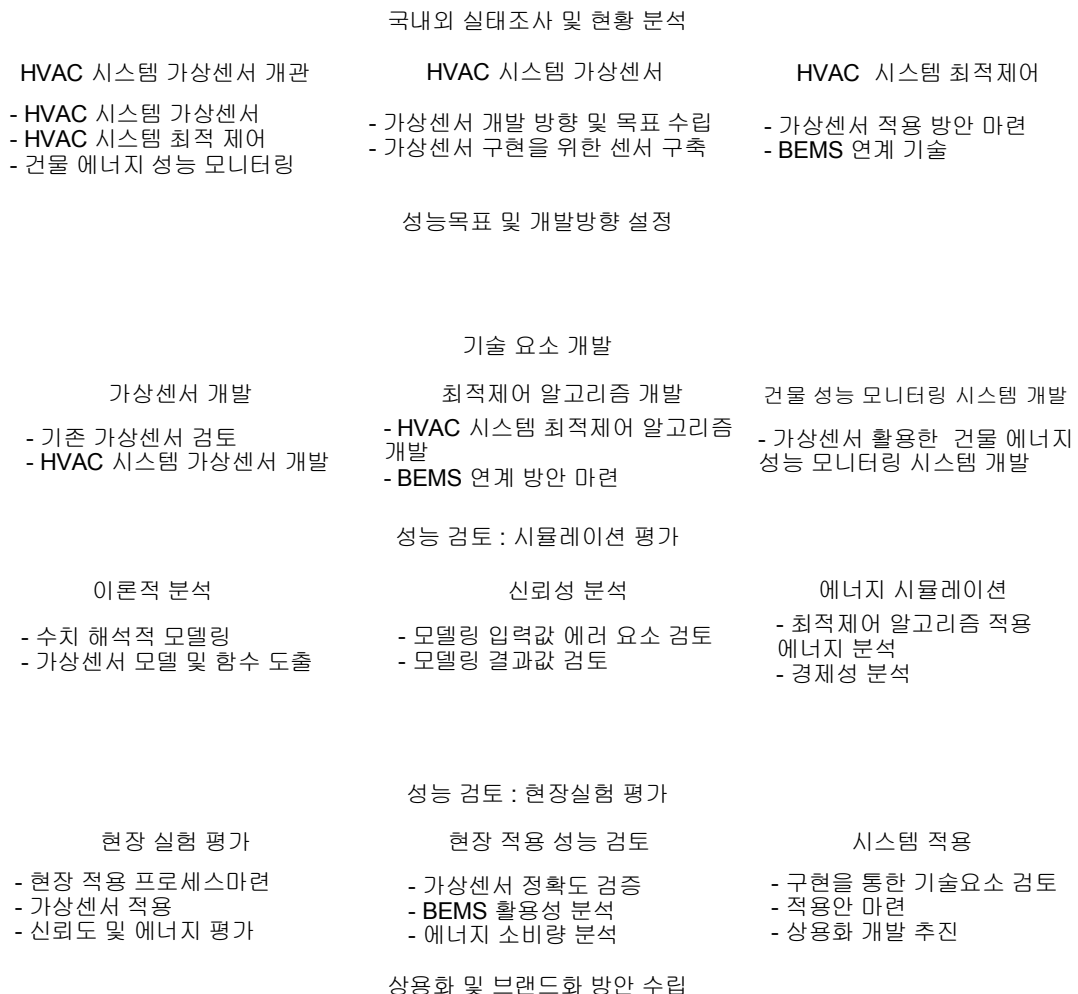
[표1.3.2] 연구목표 및 연차별 연구 내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	기존 가상센서 개발에 관한 국내외 실태조사 및 현황분석	- 국내외 학술 자료 및 논문 조사를 통한 가상센서 특징 및 현황파악 - 국내외 산업조사 및 기술조사를 통한 가상센서 기술요소 분석 - 국외 가상 센서 제품 적용 및 활용사례 조사
	가상센서 성능목표 및 개발방향 설정	- 기 개발된 국외 선진 가상 센서 기술 조사를 통한 가상 센서 개발 방향 및 진행 조사 - 가상 센서 기술개발의 성능 목표 및 개발 방향 제시
	기존 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어에 관한 국내외 실태조사 및 현황분석	- 국내외 학술 자료 및 논문 조사를 통한 특징 및 현황파악 - 국외 선진 BEMS 분석
	건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어 개발 방향 설정	- 가상 센서를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 방안 검토 - HVAC 시스템 최적제어를 위한 가상센서 적용 방안 검토 - BEMS 연계 기술 개발 방향 설정
2차년도	가상센서 개발	- 가상 센서 개발을 위한 입출력 제어 인자 도출 - HVAC 시스템 가상센서 개발
	이론적 성능 검토 및 현장 실험 평가	- 수치 해석적 모델링 - 가상 센서 모델 및 함수 도출 - 가상 센서 현장 적용 프로세스 마련 - 가상 센서 신뢰성 검증
	가상센서 검토 및 보완	최종 검토 후 최종 설계 요소 제공
	건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어 적용	- 건물에너지 성능 모니터링을 위한 가상센서 적용 - HVAC 시스템 최적제어 알고리즘 개발 및 BEMS 연계
	시뮬레이션 및 현장실험 평가	- 최적 제어 알고리즘 적용 에너지 시뮬레이션 분석 - 경제성 분석 - 가상 센서 정확도 검증 - BEMS 활용성 분석
	가상 센서를 활용한 건물에너지 성능 모니터링 및 HVAC 최적제어 시스템 상용화 및 브랜드화	- 최종 시스템 적용안 작성 - 가상 센서 시스템 시장 분석 - 브랜드화 및 상용화 - 신뢰성 검증

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

2.1 연구수행 방법

본 연구에서는 건물에 적용 가능한 가상센서 개발 및 이를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어 기술 개발을 수행하였다. 본 연구개발의 수행 방법을 [그림 2.1.1]에서 나타내고 있다. 본 연구개발의 수행을 위해 다양한 문헌 검토와 예비 조사등을 통하여 가상센서를 개발하고, 수치해석 분석 등을 통한 이론적 검토 및 신뢰성 검토를 마친 후 이를 바탕으로 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적 제어 기술을 개발하였다. 또한 개발된 성능 모니터링 및 최적 제어 기술의 에너지 성능을 분석하기 위하여 동적 에너지 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 검토하는 방법으로 연구를 진행하였다.



[그림 2.1.1] 연구 개발 흐름도

2.2 HVAC 가상센서 개발

1. COP 가상센서

냉동기의 성적계수(Coefficient Of Performance, COP)는 냉동기의 열효율이 좋고 나쁨을 판정하는 기준으로 사용되며, 압축기가 1kg의 냉매를 압축하여 얻을 수 있는 냉각효과를 성능계수(COP)로 표시한 것이다. 즉, 어떤 조건 아래에서 공급하는 일(W)에 대하여 냉동 효과의 비율로서 기기의 성능을 나타내는 계수이다. 한 대의 지열 히트펌프시스템이 낼 수 있는 최대 효율인 상황을 활용한다면 높은 효율을 가지는 동시에 가장 적은 에너지를 사용하여 기기의 제어가 가능할 것이다. 즉, 최적의 COP를 기준하여 COP모니터링에 따른 지열 히트펌프의 순차적 제어를 실시한다면 가장 적은 에너지로 높은 효율을 낼 수 있을 것이다.

효과적인 지열히트펌프 시스템 제어를 위해 저비용으로 높은 수준의 성능 모니터링을 위해 향후 COP 모니터링 적용과 함께 건물 자동제어 시스템에서 활용하여 건물의 제어 및 진단 시스템에 효과적으로 활용하는 방안을 모색해보고자 한다. COP 계산 시 필요한 요소들을 얻어내기 위한 수식 (1),(2),(3)을 통해 COP 가상센서 산정 프로세스를 도출하였다.

Step 1. Power consumption 모델을 결정한다.

$$\eta_v = \frac{\dot{V}_{suc}}{\dot{V}_D} = \frac{\dot{N}V_{suc}}{\dot{N}V_D} = \frac{V_{suc}}{V_D} = 1 - \frac{c}{1-c} \left[\left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^{1/m} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}_{suc}}{v_{suc}} = \frac{\eta_v \dot{V}_D}{v_{suc}} = \frac{\eta_v \dot{N}V_D}{v_{suc}} \quad (2)$$

$$\dot{W} = \dot{m}w = \dot{m} \left\{ p_{suc} v_{suc} \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^{(m-1)/m} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

여기서,

η_v = Volumetric efficiency

$\dot{V}_D$ = Compressor Displacement rate

$\dot{N}$ = the number of suction strokes per unit time (rpm)

V_D = the volume of the suction chamber(s) (m³)

$\dot{V}_{suc}$ = actual volumetric flow rate evaluated at the suction condition

m = empirical parameter

Step 2. 지열히트펌프의 성능과 지열히트펌프 시스템의 성능은 일반적으로 성능계수 (COP, Coefficient of Performance)로 나타내며 다음의 식 (4)과 같이 계산할 수 있다.

$$COP = \frac{Q}{\dot{W}} \quad (4)$$

여기서,

Q = Capacity(kW)

$\dot{W}$ = Power consumption (kW)

2.3 가상센서를 활용한 최적제어 기술 개발

우리나라에서의 지열 히트펌프 시스템은 지속적인 외기 및 부하의 변화로 다양한 운전 조건에서 운전되고, 실제 기준조건에서 운전되는 경우는 극히 일부분이다. 또한 우리나라 지열 히트펌프 시스템의 대부분은 높은 초기 설치비용으로 인하여 활용이 부족한 실정이다. 하지만 신재생 에너지 설치 의무화 제도에 의해 법적 기준을 충족시키고자 의무적으로 설치하고 있고 2011년도 이전의 고시가 적용된 대부분의 건물들은 단수공사비의 5% 기준을 맞추기 위해 신재생에너지를 의무적으로 설치하였다. 이렇게 지열 히트펌프 시스템의 효율적인 활용보다 법적 기준인 의무 용량에만 초점이 맞춰지는 경우가 많다. 효율이 높고 친환경적인 지열 히트펌프 시스템을 설치하여도 건물의 부분부하를 담당하는 경우가 많으며 기존의 냉난방 열원시스템과 독립적인 사용으로 효율이 저감되고 있다. 또한 지열 히트펌프 시스템의 독립적인 사용은 건물의 부하를 부담하기 위한 활용 계획보다는 단순히 의무적인 용량을 맞추는데 초점이 맞춰져 설계된 경우가 많아 분담하는 부하에 비해 과 설게 되는 경향이 있다. 이러한 문제점을 파악하고 실제 대상건물을 선정하여 기기의 효율을 고려하는 성능계수를 제어 포인트에 추가하여 지열히트펌프 시스템의 효율을 높여 에너지를 절약하고, 사용하지 않고 남은 지열 히트펌프 시스템의 에너지를 우선적으로 사용하고 기존 열원의 사용을 줄이는 운영방안을 제안하고자 한다.

1. 대상건물 선정 및 시스템 운영현황

가. 대상건물의 선정

대상건물은 다음 그림 [그림 2.3.1]과 같으며, [표 2.3.1]은 대상공간의 개요를 나타낸다. 대상건물은 경북에 위치한 대학병원 건물이며, 건물의 연면적은 약 81,928이며 지하 3층, 지상 9층으로 이루어져 있다. 신재생설비로는 신재생에너지 설치 의무화 제도에 의해 지열 히트펌프 530RT가 설치되어 운영되고 있다.



[그림 2.3.1] 대상건물 전경

[표 2.3.1] 대상건물 개요

구분	내용
건물명	K 대학병원
건물의 용도	의료시설 및 장례식장
층수	지하3층, 지상9층
건축면적	9,737m ²
연면적	81,929m ²
병원 용도	본관동 - 지하3층, 지상9층 노인동 - 지하1층, 지상7층 암센터 - 지하2층, 지상5층
지열히트펌프 사용면적	2,263m ²
지열히트펌프 설치용량	530RT

나. 대상건물의 운영현황

지열 히트펌프 시스템의 알고리즘 개발을 평가하기 위해 실제 지열 히트펌프 시스템이 설치된 실제 건물을 선정하였으며 현장조사를 통하여 운영현황을 파악하였다.

실별 공조현황은 [표 2.3.2]와 같으며 건물의 열원시스템으로는 지열 히트펌프의 경우 총 530RT용량으로 12대가 설치되어 운영되며, 흡수식냉온수기의 경우 800RT 용량 3대인 2400RT와 보조용도인 500RT가 설치되어 있다. [표 2.3.3]과 [표 2.3.4]는 지열 히트펌프의 기본적인 정보를 나타내며 [표 2.3.5]는 흡수식 냉온수기의 장비 정보를 나타낸 것이다.

[표 2.3.2] 실별 공조 현황

구 분	온도(℃)		습도(%)	
	하계	동계	하계	동계
병동부	26	23	55	45
약제부	26	22	55	45
외래 진찰부	26	22	55	45
수술실	24	24	50	50
회복실	24	25	55	50
사무실	26	20	55	45
강 당	26	20	55	45

[표 2.3.3] 지열 히트펌프 시스템 제원

구 분	GH-1		GH-2	
수량	11		1	
능력(RT)	냉방	난방	냉방	난방
	46.24	48.86	9.86	9.99
EST(℃)	31	5	31	5
공급온도(℃)	7	45	7	45
환수온도(℃)	12	40	12	40

[표 2.3.4] 개별 지열 히트펌프 시스템 용량 및 유량

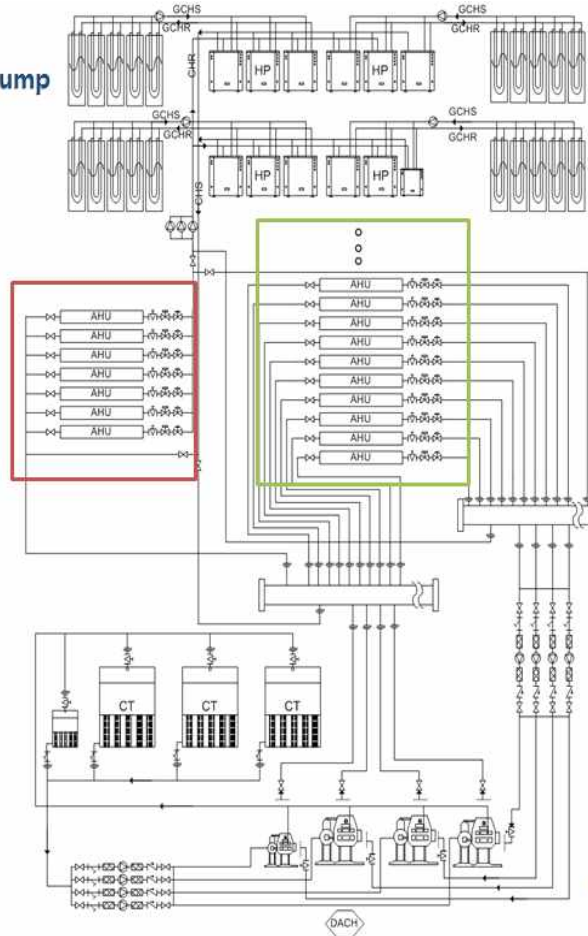
		지열원 히트펌프		
		1호기	2호기	3호기
1그룹	용량(RT)	48.86	48.86	9.99
	유량(LPM)	564	564	114
2그룹	용량(RT)	48.86	48.86	48.86
	유량(LPM)	564	564	564
3그룹	용량(RT)	48.86	48.86	48.86
	유량(LPM)	564	564	564
4그룹	용량(RT)	48.86	48.86	48.86
	유량(LPM)	564	564	564

[표 2.3.5] 흡수식 냉온수기 제원

장비번호	DAC H-1		DAC H-2	
수량	3		1	
용량 (RT)	냉방 (USRT)	난방 (Kcal/hr)	냉방 (USRT)	난방 (Kcal/hr)
	800	2,419,500	500	1,512,000
냉수	입구	출구	입구	출구
	12	7	12	7
온수	55	60	55	60
냉각수	32	37.5	32	37.5

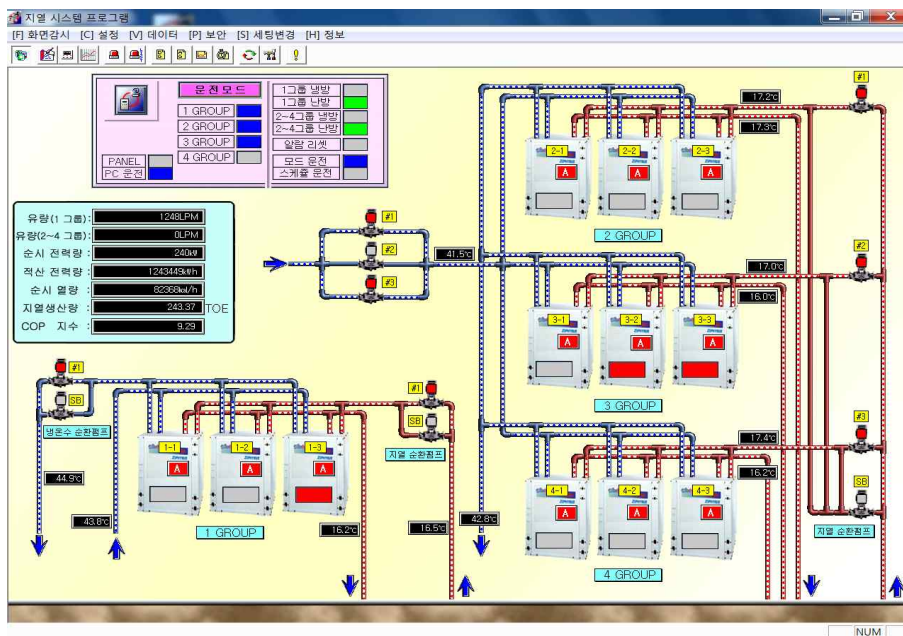
[그림 2.3.2]와 같이 지열 히트펌프는 건물의 일부 구간을 공조하기 위해 사용되고 흡수식냉온수기와 혼합하여 사용하지 않으며, 열원시스템에서 생산된 열원수는 FCU와 AHU로 공급되어 각 담당구역을 공조한다. 노인동 전체와 본관동의 고층부는 흡수식 냉온수기가 담당하고 있으며, 본관동 저층부와 암센터는 지열원 히트펌프 시스템이 공조를 담당하고 있었다. 공조기는 지열히트펌프가 담당하는 공조기 7대와 흡수식냉온수기가 담당하는 공조기 25대로 총 32대의 공조기가 있다. 1그룹이 담당하는 FCU는 병원건물의 노인동과 연구동에 공급되며 사무공간으로 하루 중 07:00부터 21:00까지 14시간 가동하고 2그룹, 3그룹, 4그룹이 담당하는 AHU는 병실공간에 공급되며 하루 중 00:00부터 24:00까지 24시간 가동된다. 현재 열원 시스템은 자동제어로 이루어져 있으며, 지열 히트펌프와 흡수식 냉온수기 모두 냉 온수 공급온도를 기준으로 대수제어가 이루어지고 있다. 설정온도는 운영자의 경험적 판단으로 정해지고 계절에 따라 수정된다. 즉, 열원시스템에서 공급되는 냉온수가 공조기의 코일에서의 냉온수와 열 교환을 한 후 다시 열원시스템으로 되돌아가는 환수온도의 차이를 통해 열원시스템의 대수를 제어하는 방법이다. 하지만 이 경우 부하가 적을 경우에도 모든 열원 시스템은 설정온도를 맞추기 위하여 지속적으로 운전하게 되고 이에 따라 에너지가 낭비되는 문제점이 발견되었다.

Geothermal heat pump



Absorption chiller

[그림 2.3.2] 대상건물 열원 시스템 계통도



[그림 2.3.3] 대상건물 BEMS 화면

건물의 전체 부하를 살펴봤을 때 지열히트펌프 시스템과 주열원인 흡수식 냉온수기의 동시 운영이 아닌 대부분의 공간 주열원만으로 에너지 공급하는 방식으로 운영되고 있다. 또한 흡수식 냉온수기의 안전율(연중 운영 시간 45%~65%, 피크 시 가동율 40%~85%)이 높게 설계되어 있었다. 대상건물은 [그림 2.3.3]과 같이 BEMS를 통한 데이터의 축적이 이루어지고 있다. 각 그룹별 지열 히트펌프 시스템의 입 출구 온도가 저장되며 사용된 누적전력량과 순시전력이 저장된다. 대부분이 자동제어 및 DB구축의 기능을 갖춘 BEMS로 관리되지만, 실제로는 모니터링과 고장진단에만 BEMS를 이용하고 있었으며, 지열시스템의 가동 결정은 2차측 수요, 외기 온도, 민원 등을 고려해 관리자가 수동으로 실시하고 있었다.

1. 가상센서를 활용한 지열 히트펌프 시스템 제어방안 개발

가. 단일 지열 히트펌프 시스템 제어방안

(1) 기존 지열 히트펌프 시스템 제어방안

멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 대수운영은 지열히트펌프, 온도센서, AHU의 시스템 구성으로 제어된다. 지열 히트펌프 시스템의 냉온수 공급관에 온도센서를 부착하여 설정온도(T_{set})를 중심으로 설정실온 상한치($T_{set}+d$)가 되면 시스템을 작동하고 설정온도를 맞추는지 여부에 따라 대수 제어가 된다. 현재 설정온도가 하한치($T_{set}-d$)가 되면 작동을 중단하는 on/off 제어를 하며 제어 알고리즘은 [그림 2.3.4]와 같다. 설정온도에 따른 대수제어는 제어하기 쉽고 간접적으로 실내 부하를 반영하지만 공조공간에 부하가 없을 경우에도 냉수 온도의 설정 값에 맞추기 위하여 운전되어 불필요한 에너지가 소비되고 있으며 지열 히트펌프가 각각 개별 운전으로 에너지 낭비가 되며 성능계수 또한 낮아지는 결과를 가져온다. 이를 해결하기 위해 냉수 온도의 설정 값을 제한하지 않고 에너지 낭비를 줄이는 제어방안이 필요할 것으로 판단된다.

① 현재 히트펌프 시스템이 작동중이지 않은 경우

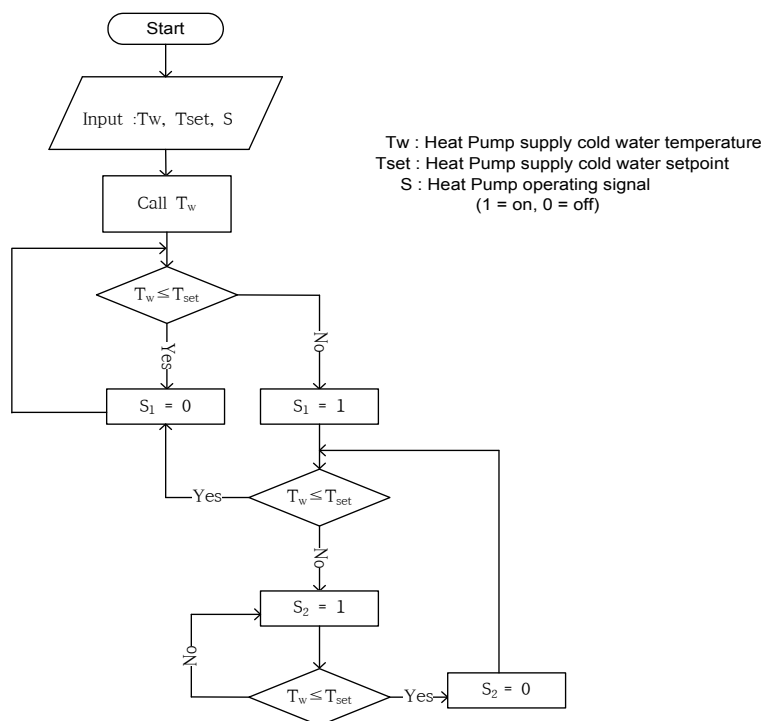
히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높으면($T_w > T_{set}+d$) 히트펌프를 작동시킨다. 그 후 설정온도를 맞추는지 여부에 따라 다음 히트펌프의 작동을 결정한다. 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높지 않으면 현 상태를 지속한다.

② 현재 히트펌프 시스템이 작동중인 경우

히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 낮으면($T_w < T_{set}+d$) 히트펌프 작동을 중지한다.

히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높으면($T_w > T_{set} + d$) 설정온도를 맞추기 위해 다음 히트펌프를 추가로 작동시킨다. 히트펌프의 냉수 출구온도가 설정온도 보다 낮아지면($T_{ws} < T_{set} + d$) 순차적으로 히트펌프 시스템의 작동을 중지한다.

대상건물의 지열 히트펌프는 부하 측 환수온도를 설정 값에 맞추기 위하여 운영되며 그에 따라 on/off 제어를 하고 있었다. 그러나 공조공간에 부하가 없을 경우에도 냉수 온도의 설정 값에 맞추기 위하여 운전되어 불필요한 에너지가 소비되고 있으며 이를 해결하기 위해 냉수 온도의 설정 값을 제한하지 않고 에너지 낭비를 줄이는 제어방안이 필요할 것으로 판단된다.

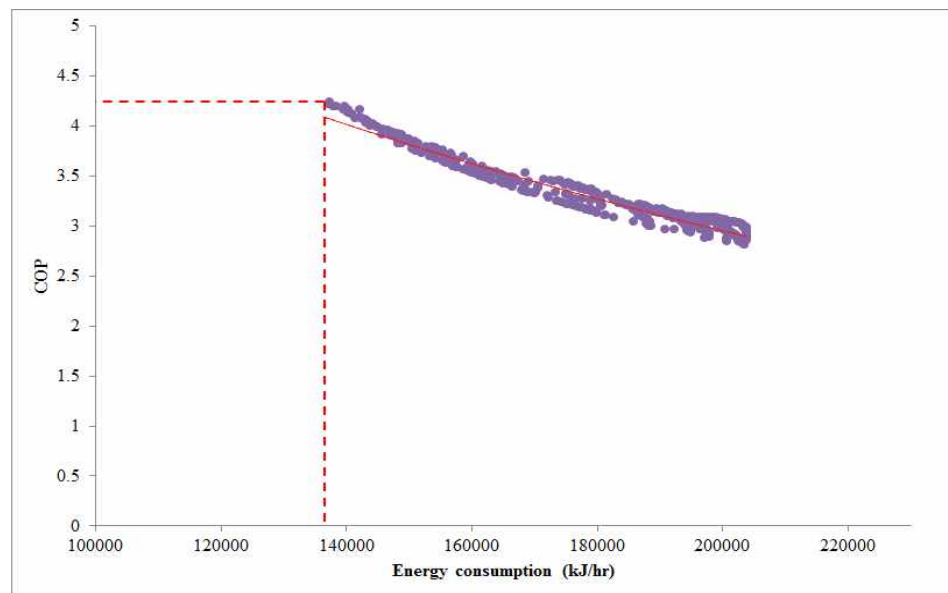


[그림 2.3.4] 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 대수운영방안 알고리즘

(2) COP가상센서를 활용한 지열히트펌프 제어 방안

냉동기의 성적계수(Coefficient Of Performance, COP)는 냉동기의 열효율이 좋고 나쁨을 판정하는 기준으로 사용되며, 압축기가 1kg의 냉매를 압축하여 얻을 수 있는 냉각효과를 성능계수(COP)로 표시한 것이다. 즉, 어떤 조건 아래에서 공급하는 일(W)에 대하여 냉동 효과의 비율로서 기기의 성능을 나타내는 계수이다. 이를 [그림 2.3.6]과 같이 알고리즘에 적용하여 지열 히트펌프 시스템의 기기의 성능을 고려하여 제어 포인트에 반영하는 멀티 지열 히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안을 제안하였다. 한 대의 지열 히트펌프시

시스템이 낼 수 있는 최대 효율인 상황을 활용한다면 높은 효율을 가지는 동시에 가장 적은 에너지를 사용하여 기기의 제어가 가능할 것이다. 즉, 최적의 COP를 기준하여 COP모니터링에 따른 지열 히트펌프의 순차적 제어를 실시한다면 가장 적은 에너지로 높은 효율을 낼 수 있을 것이다. [그림 2.3.5]과 같이 지열 히트펌프의 에너지 소비량과 COP의 관계를 분석해본 결과 COP가 4.2일 때 가장 적은 에너지를 사용하고 높은 효율을 나타냈다. 따라서 최대 COP가 4.2를 넘을 경우 히트펌프가 순차적으로 작동하는 운영방안을 제시하였다.



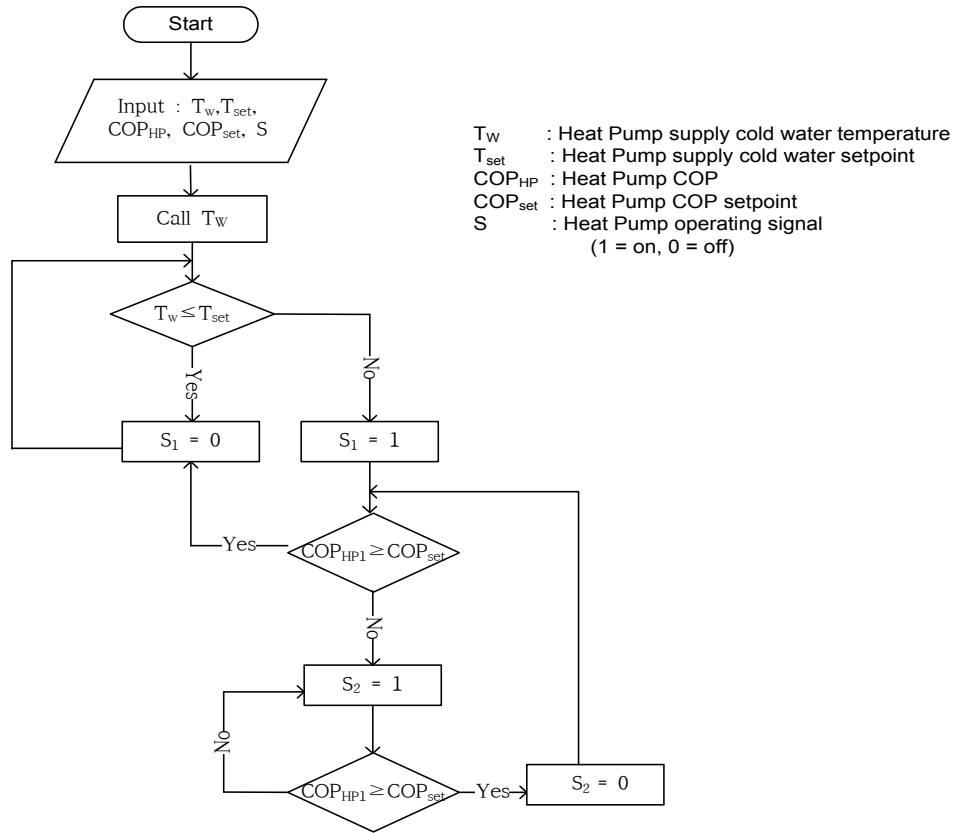
[그림 2.3.5] 지열 히트펌프 시스템의 COP와 에너지 소비량 관계 그래프

① 현재 히트펌프 시스템이 작동중이지 않은 경우

히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높으면 ($T_w > T_{set} + d$) 히트펌프를 작동시킨다. 그 후 한 대의 히트펌프의 COP가 COP_{SET} 이 되어도 실의 부하를 부담하지 못하는 경우 다음 히트펌프를 작동시킨다. 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높지 않으면 현 상태를 유지한다.

② 현재 히트펌프 시스템이 작동중인 경우

최초 한 대의 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 낮으면 ($T_w < T_{set} + d$) 히트펌프 시스템을 작동을 중지한다. 한 대의 히트펌프 COP가 $COP_{설정}$ 값보다 높아지면 ($COP_{HP} > COP_{set} + d$) 실의 부하를 부담하지 못하고 있으므로 다음 히트펌프를 작동시킨다.

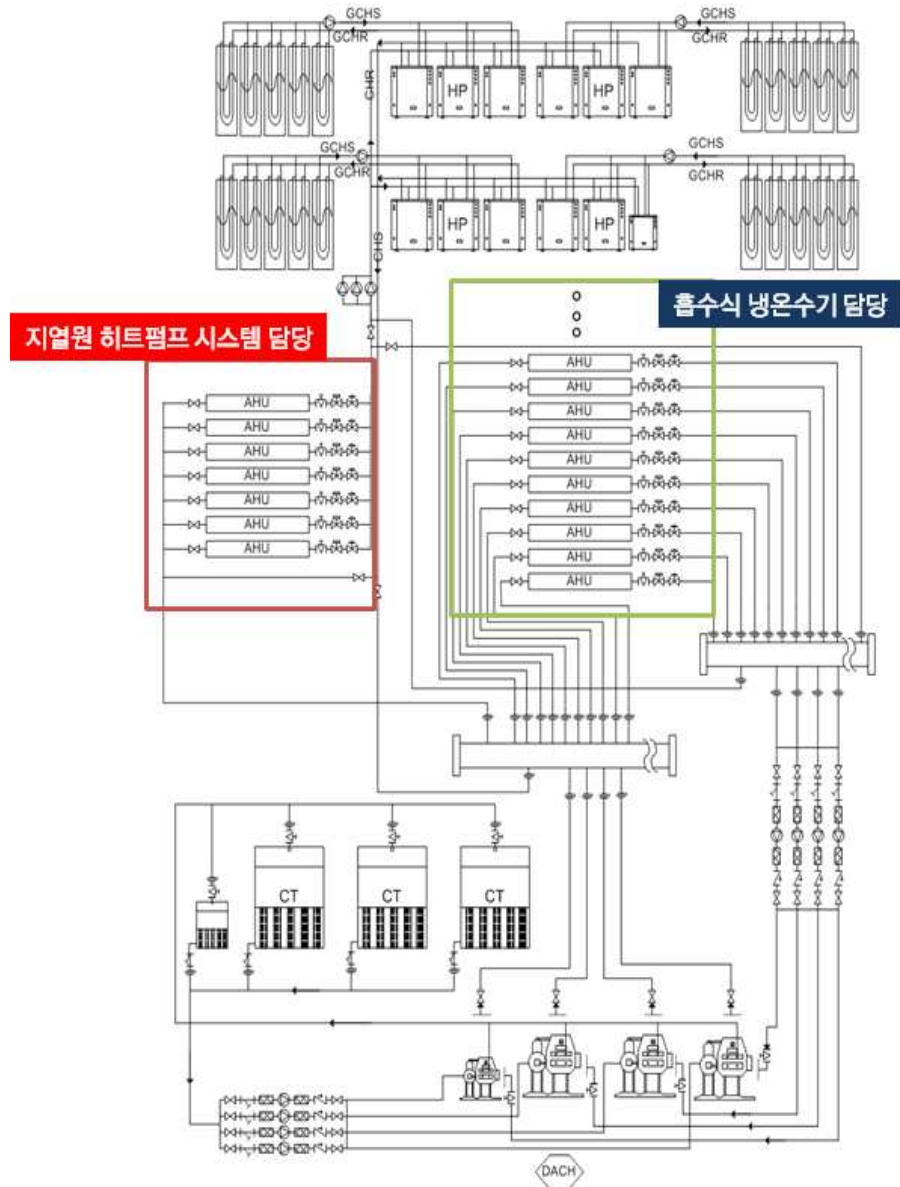


[그림 2.3.6] 성능계수에 따른 순차적 제어방안 알고리즘

나. 복합 지열 히트펌프 시스템 제어방안

(1) 기존 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 운영방안

[그림 2.3.6]와 같이 대상건물의 기존 운영방안은 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기가 담당하는 AHU의 대수가 고정되어 계통이 독립적으로 분리되어 있었다. 이 경우 효율이 높은 지열 히트펌프 만으로 건물의 부하를 만족시킬 수 있는 경우에도 각각 담당하는 AHU에 따라 두 열원 시스템이 모두 작동하게 되며 그로 인해 에너지 낭비가 발생하게 된다. 따라서 기기의 효율을 고려하는 성능계수를 제어 포인트에 추가하여 지열히트펌프 시스템의 효율을 높여 에너지를 절약하고, 사용하지 않고 남는 지열 히트펌프 시스템의 에너지를 우선적으로 사용하고 기존 열원의 사용을 줄이는 운영방안을 제안하고자 한다.



[그림 2.3.7] 대상건물 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기
기존 운영방안 계통도

(2) 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안

멀티 지열 히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 대수운영 방안(CASE1-1) 에서 기기의 효율을 고려하는 성능계수를 제어 포인트에 추가하여 지열히트펌프 시스템의 효율을 높여 에너지를 절약하고, 기존운영방식의 문제점을 해결하기 위해 [그림 2.3.7] 흡수식 냉온수기와 계통을 통합하여 복합운영방안을 제안하고자 한다. 이 방식은 각 열원 시스템의 열원수를 하나의 헤더로 공급하여 각 AHU로 분산시키는 방식이다. 열원 시스템 계통의 연결로 인하여 부하가 적을 경우 효율이 좋은 지열 히트펌프 시스템만으로 공조가 가능할 것이라 판단된다. 따라서 두 열원 시스템의 설정온도를 동일하게 설정해 주어야 할 것이다. 사용하지 않고 남

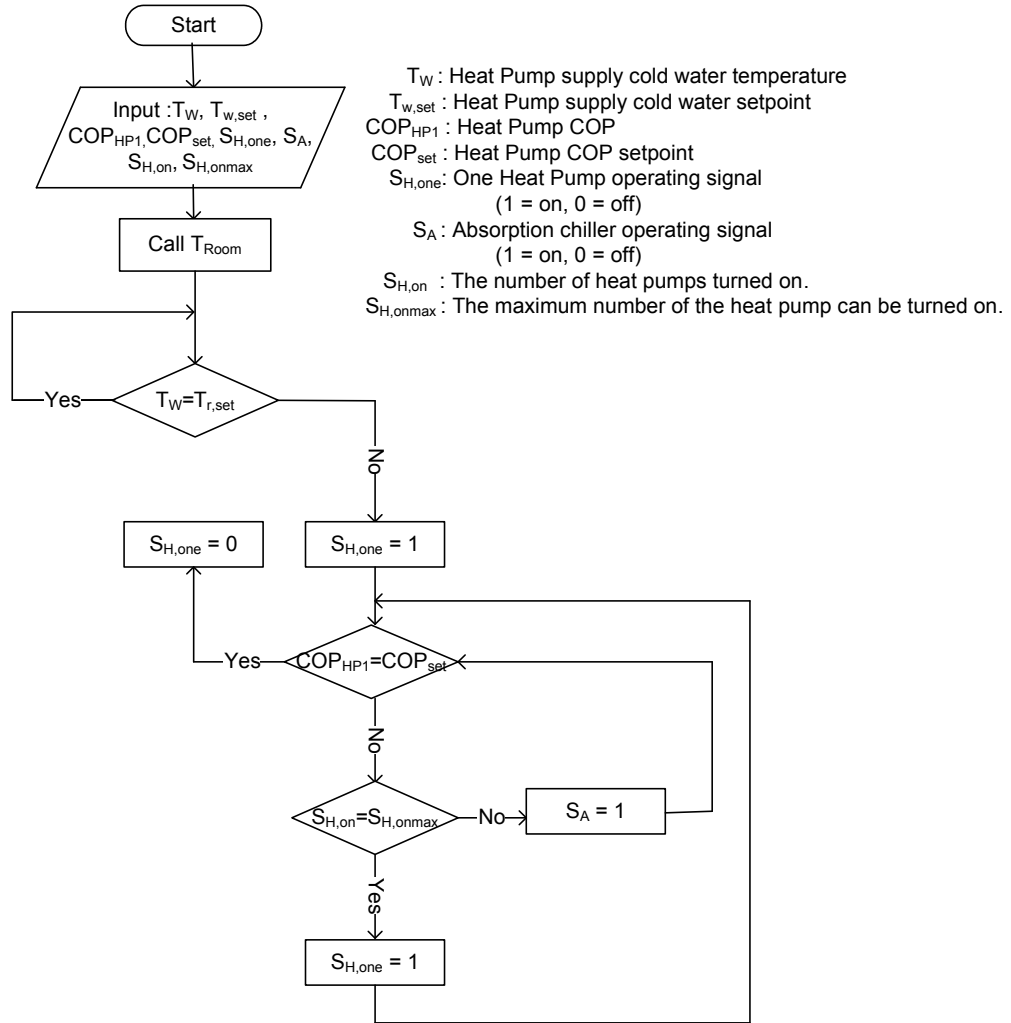
는 지열 히트펌프 시스템의 에너지를 우선적으로 사용하고 기존 열원의 사용을 줄여 지열 히트펌프의 운영을 최대화하고, 기존 열원인 흡수식 냉온수기의 사용을 최소화 한다면 에너지 효율을 향상시키는 운영방안이 될 것이다. [그림 2.3.8]은 CASE2-2의 운영방안을 알고리즘으로 나타낸 그림이다.

① 현재 히트펌프 시스템이 작동중이지 않은 경우

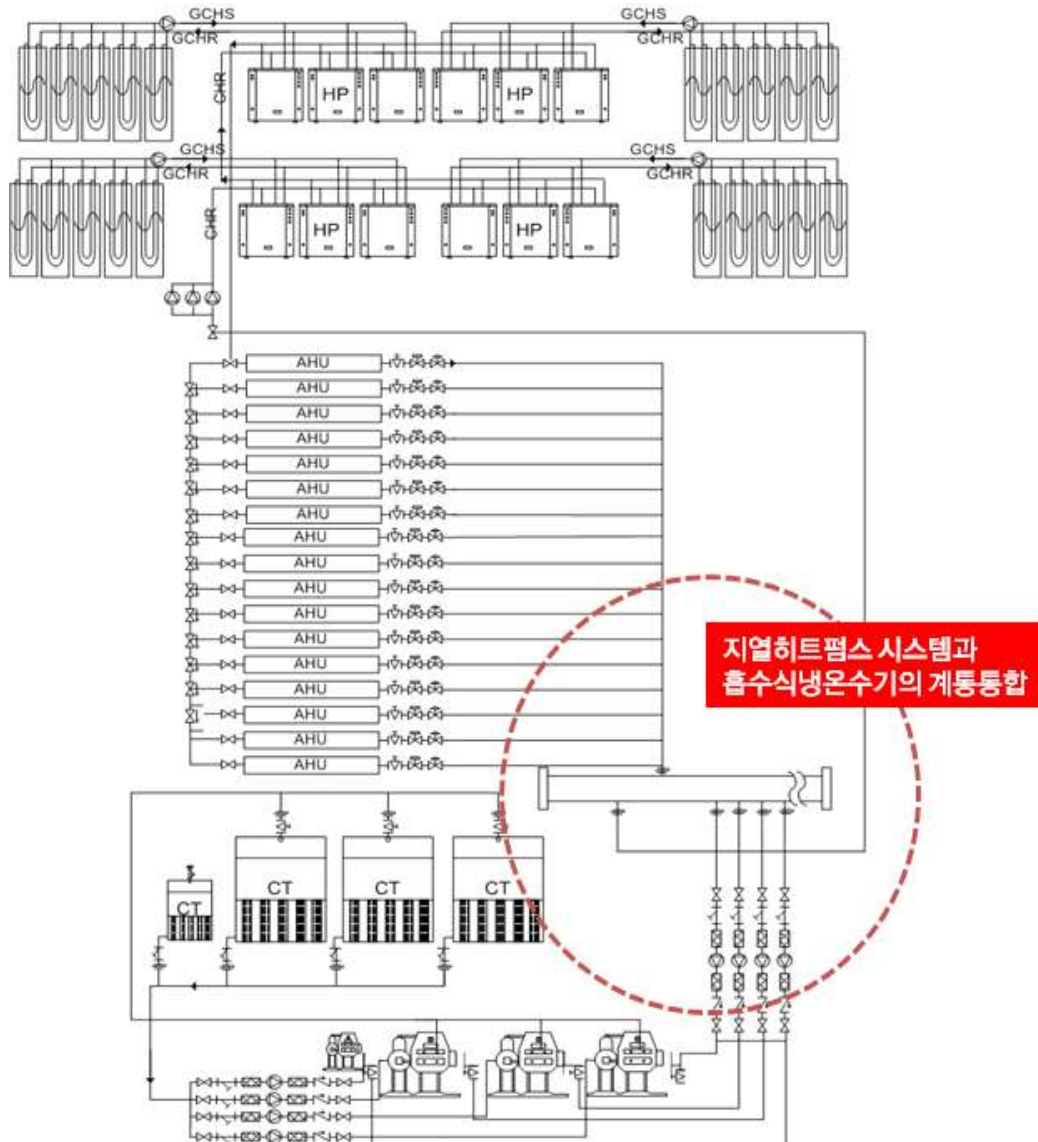
히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높으면 ($T_w > T_{set} + d$) 히트펌프를 작동시킨다. 그 후 한 대의 히트펌프의 COP가 COP_{SET} 이 되어도 실의 부하를 부담하지 못하는 경우 다음 히트펌프를 작동시킨다. 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높지 않으면 현 상태를 유지한다.

② 현재 히트펌프 시스템이 작동중인 경우

최초 한 대의 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 낮으면 ($T_w < T_{set} + d$) 히트펌프 시스템을 작동을 중지한다. 한 대의 히트펌프 COP가 COP설정 값보다 높아지면 ($COP_{HP} > COP_{set} + d$) 실의 부하를 부담하지 못하고 있으므로 다음 히트펌프를 작동시킨다. 지열 히트펌프 시스템의 운영을 최대한으로 진행하여도 부하를 부담하지 못한다면 흡수식 냉온수기의 작동을 시작한다.



[그림 2.3.8] 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 계통통합 운영방안 알고리즘



[그림 2.3.9] 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 계통통합

2. 시뮬레이션을 통한 제어방안 적용 및 평가

가. 시뮬레이션 툴 선정

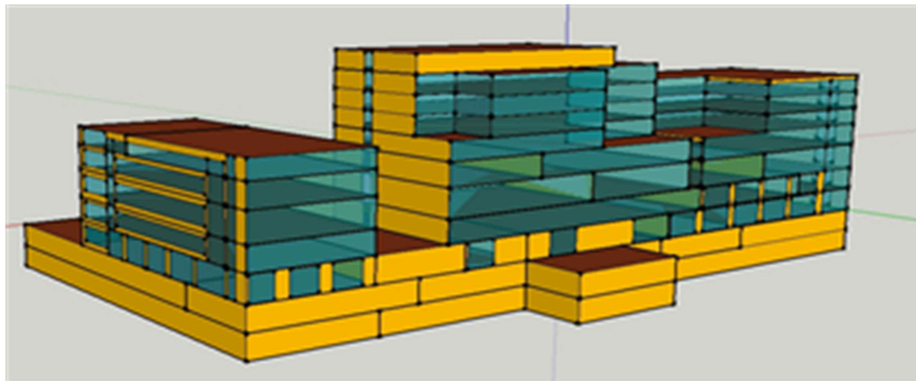
건물 상세 해석 프로그램인 TRNSYS(Transient Systems Simulations)는 Wisconsin 대학의 SEL (Solar Energy Lab)에서 태양열 시스템의 규모산정 및 시스템 해석을 위한 프로그램으로 출발하여 현재는 신재생에너지시스템을 포함한 동적열부하계산과 HVAC설비 및 제어시스템을 포함하는 에너지 시스템 시뮬레이션 및 건물에너지해석 프로그램이다. 연간 냉난방부하 산출, 건물과 HVAC의 동적 성능해석, 태양열시스템 분석 등 광범위하게 응용되고 있다.

TRNSYS는 오픈 소스와 모듈 형태의 조합을 통한 모델링 구조를 가지고 있어 시뮬레이션 자유도가 높고 특히 시스템 해석에 상당한 강점을 가지고 있는 툴이다.

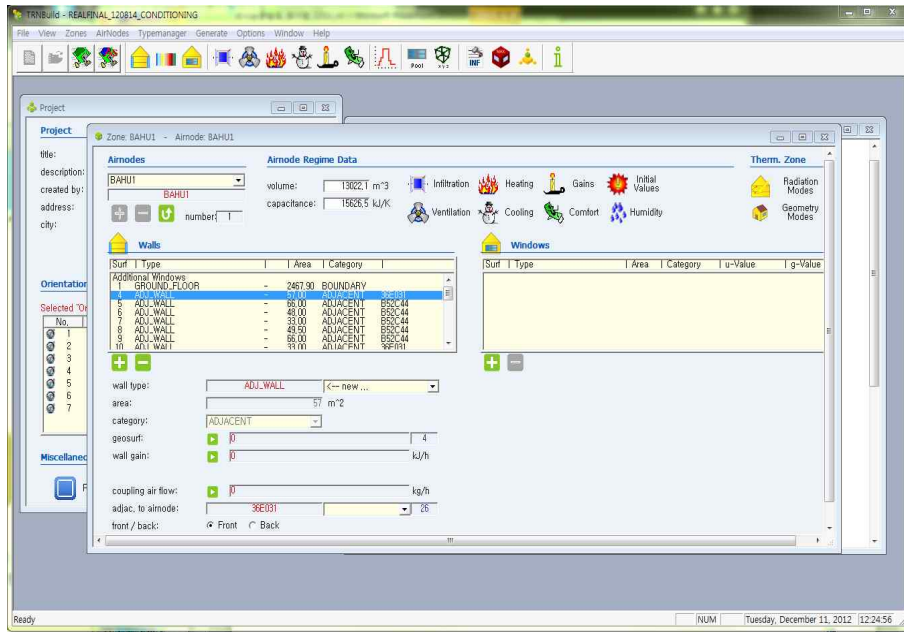
대상건물의 지열 히트펌프 운영방안에 대한 평가는 기존 운영방식과 제안된 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 통해 비교 평가하였다. [그림 2.3.10]과 같이 대상건물의 모델링은 Google Sketch up의 TRNSYS 3D를 이용하여 진행하였고, 동적 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 사용하여 건물을 해석하였다. Trnbuild modeling과 TRNSYS Studio modeling을 사용하여 대상건물의 세부 데이터를 입력하고 HVAC 시스템을 구현하였다. 이를 통해 시뮬레이션 결과를 도출하고 신뢰도 검증을 통해 제안된 알고리즘을 평가하였다.

TRNSYS는 크게 건물을 모델링하는 TRNBuild와 모델링된 건물 데이터를 포함하여 시뮬레이션 수행을 위한 Simulation studio로 구성된다. 건물 부하 분석은 TRNBuild를 통한 건물 모델링을 과정을 거쳐 각각의 구조체의 구성요소와 구성요소들의 물성치를 입력하는 것으로부터 출발한다. TRNSYS 시뮬레이션에서 시스템 해석은 건물 부하 해석을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 TRNSYS Studio에서 시스템을 모델링하여 시스템의 운전 상태, 에너지 사용량 등의 분석을 위해 사용한다.

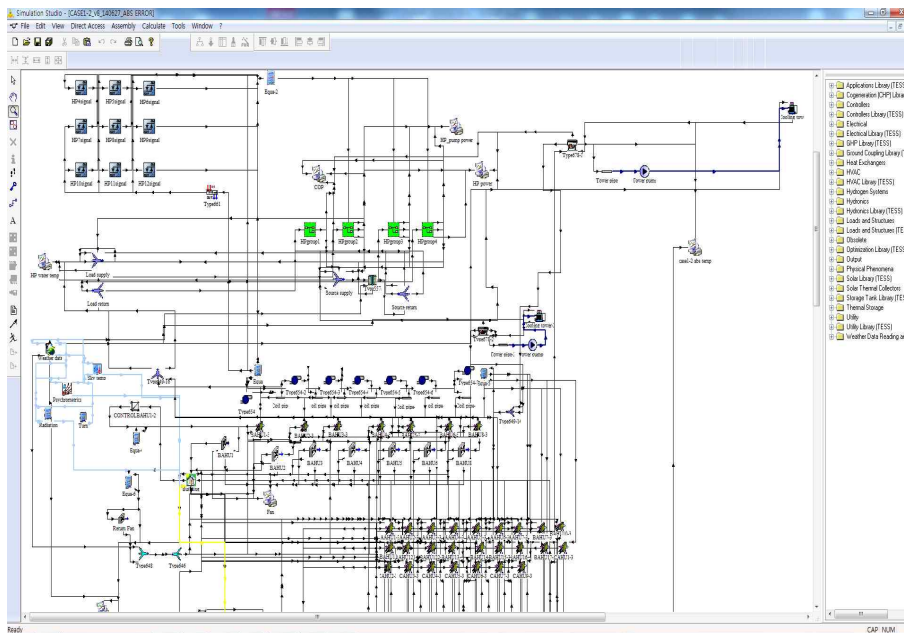
Simulation studio는 TRNSYS 시뮬레이션을 위한 각각의 컴포넌트들을 링크시켜주는 유틸리티이며 GUI환경으로 구성된다. Simulation studio에서 모델링된 건물의 데이터를 가져오는 모듈이 Type56 Multi-zone building이다. TYPE 56은 ASHRAE의 전달함수법(transfer function method)을 토대로 하여 벽체, 천장, 바닥 등을 모델링한다. 벽체의 안쪽과 바깥쪽을 대상으로 모든 복사열교환(태양으로부터의 단파장 및 다른 벽체, 천공으로부터의 장파장 모두)을 고려한다.



[그림 2.3.10] 대상건물 TRNSYS 3D Modeling



(a) Trnbuild modeling



(b) TRNSYS Studio modeling

[그림 2.3.11] Simulation tool - TRNSYS

대상건물의 모델링은 Google Sketch up의 TRNSYS 3D를 이용하여 [그림 2.3.10]과 같이 모델링 하였다. 그 후 [그림 2.3.11]와 같이 Trnbuild modeling과 TRNSYS Studio modeling을 사용하여 대상건물의 세부 데이터를 입력하고 HVAC 시스템을 구현하였다.

나. 시뮬레이션 CASE 선정

기존 멀티 지열 히트펌프 시스템은 냉 온수 공급온도를 기준으로 대수운영이 이루어지고 있었다. 이를 CASE1-1으로 설정하였고 기존열원인 흡수식 냉온수기와 분리설계 되는 운영 방안을 CASE2-1로 설정하였다. 멀티 지열 히트펌프 시스템의 효율을 향상시키기 위해 기기의 성능을 고려하는 성능계수를 제어 포인트에 반영하였고 이를 CASE1-2로 설정하였다. 지열 히트펌프 시스템의 효율을 향상 시킨 후 기존의 열원과 통합하는 방안을 CASE2-2로 설정하였으며 이는 효율이 높은 지열 히트펌프 시스템을 우선적으로 사용하여 기존 열원의 에너지 사용을 줄이는 운영방안이 될 것이다. [표 2.3.7]는 시뮬레이션 CASE를 정리한 내용이다.

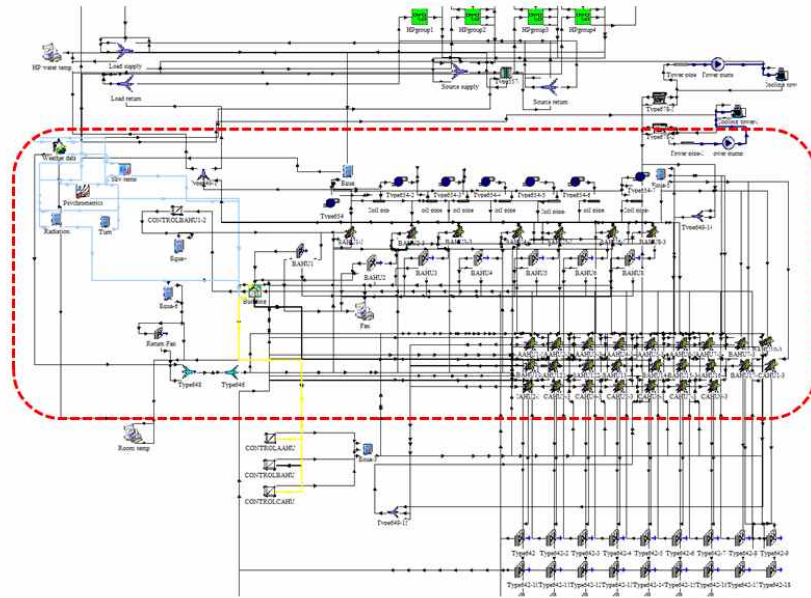
[표 2.3.6] 시뮬레이션 CASE

	단일 지열 히트펌프 시스템	복합 지열 히트펌프 시스템
기존 지열히트펌프 시스템 운영방안	멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 대수 운영방안 (CASE1-1)	지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영 방안(CASE2-1)
제안된 지열히트펌프 시스템 운영방안	멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 대수 운영방안 (CASE1-2)	지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영 방안(CASE2-2)

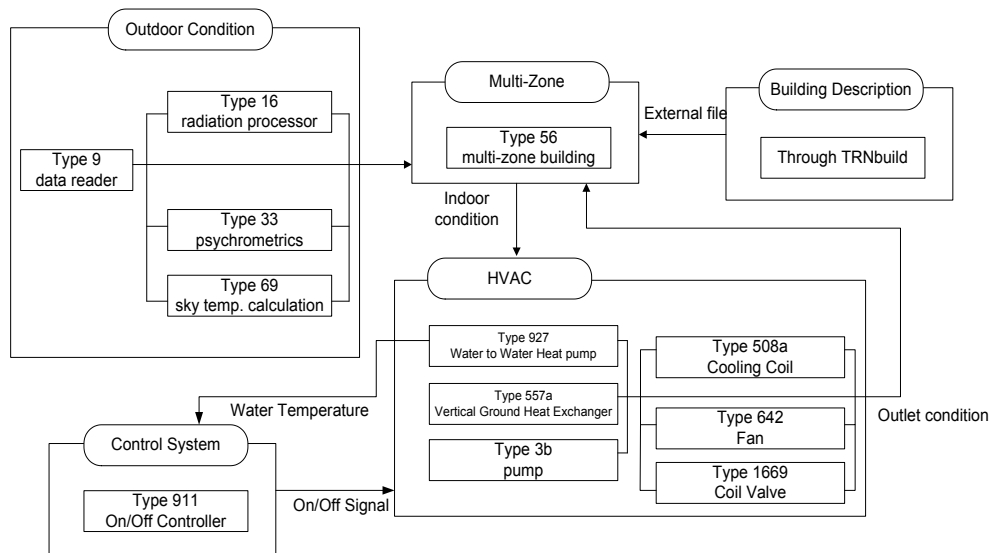
다. 시뮬레이션 모델링

(1) 단일 지열 히트펌프 시스템

히트펌프 시스템의 효율을 높이는 운영방안을 제시하였고 기존의 방식과 제안된 방식의 에너지 소비량을 비교하기 위하여 [그림 2.3.12]과 같이 Trnsys simulation studio를 통하여 모델링한 후 시뮬레이션 하였다. [그림 2.3.13]는 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 운영방안(CASE1-1)의 시뮬레이션 흐름도를 나타낸다. 히트펌프는 물대물 방식의 Type927을 사용하였고, 지중열교환기는 Type557a 수직형 열교환기를 사용하였다. 지열 히트펌프는 총 3 그룹으로 나누었으며 각각의 설정온도 제어를 위해서 Type 911의 on/off Controller를 사용하였다. 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안 (CASE1-2)의 경우 [그림 2.3.14]와 같이 제어포인트를 변경하여 지열히트펌프의 환수온도 대신 COP를 모니터링 하여 순차적 제어를 나타냈다. 또한 시간지연을 위한 Type 661과 실내온도를 반영하고 순차적 제어를 위한 Equation을 사용하여 COP에 따른 순차적 제어를 구현하였다.

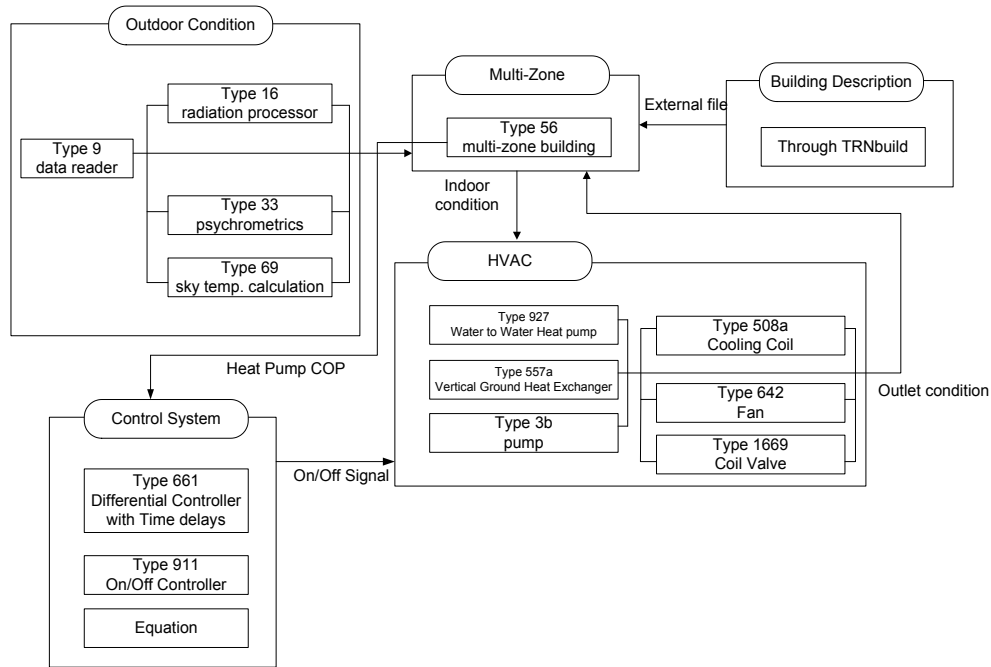


[그림 2.3.12] 단일 지열 히트펌프 시스템의 모델링 화면



[그림 2.3.13] CASE1-1 시뮬레이션 흐름도

* Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 운영방안

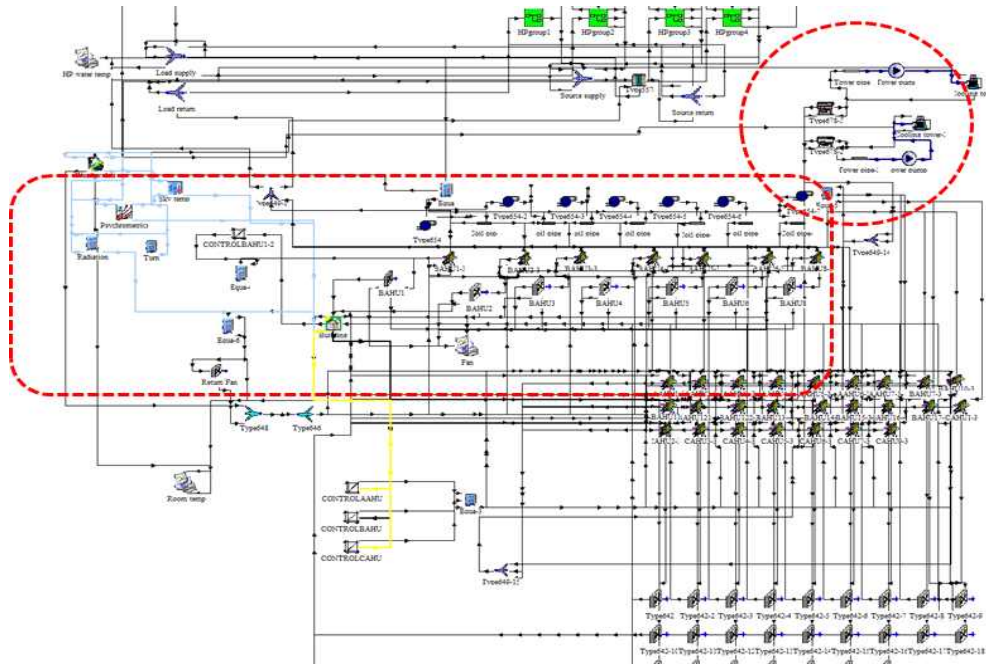


[그림 2.3.14] CASE1-2 시물레이션 흐름도

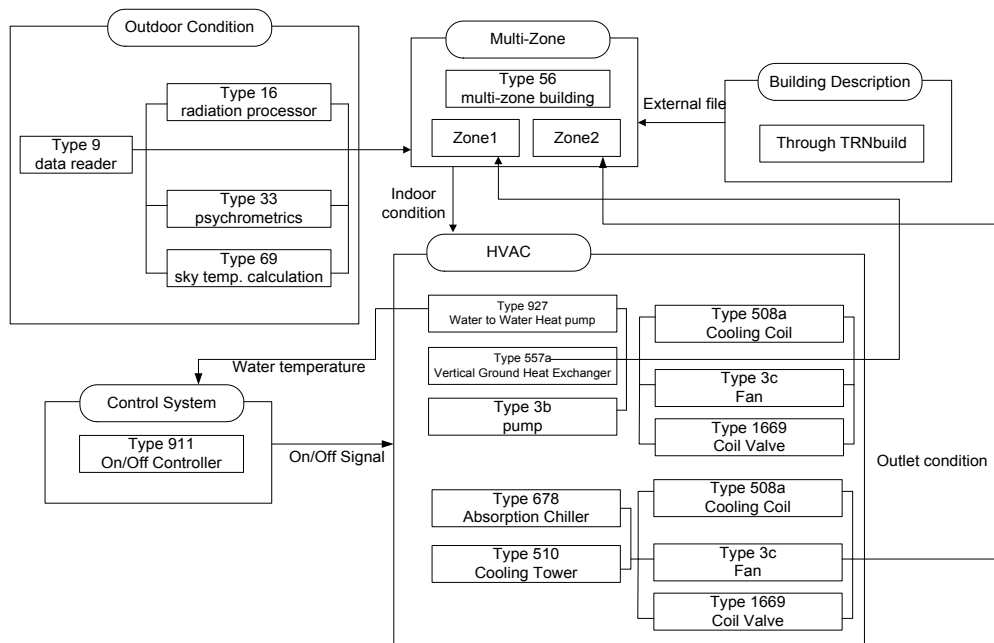
* Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적
운영방안

(2) 복합 지열 히트펌프 시스템

[그림 2.3.15]은 복합 지열 히트펌프 시스템의 모델링 모습이다. 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안(CASE2-1) 기존의 열원인 흡수식 냉온수기와 지열 히트펌프 시스템의 계통이 분리되어 있는 운영방식이다. Type678 (Absorption chiller)과 Type700 (Gas boiler)를 사용하여 흡수식 냉온수기를 모델링 하였고 시물레이션의 개념도는 [그림 2.3.16]과 같다. [그림 2.3.17] 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안(CASE2-2)의 경우 독립적으로 분리되어 있는 지열 히트펌프와 흡수식 냉온수기의 계통을 결합하여 하나의 계통으로 모델링한 후 시물레이션 하였다. COP 순차적 제어를 통해 히트펌프 시스템의 효율을 향상하고 운영방안을 CASE에 반영하여 기존열원인 흡수식 냉온수기와 계통을 결합하는 복합운영 방식이다.

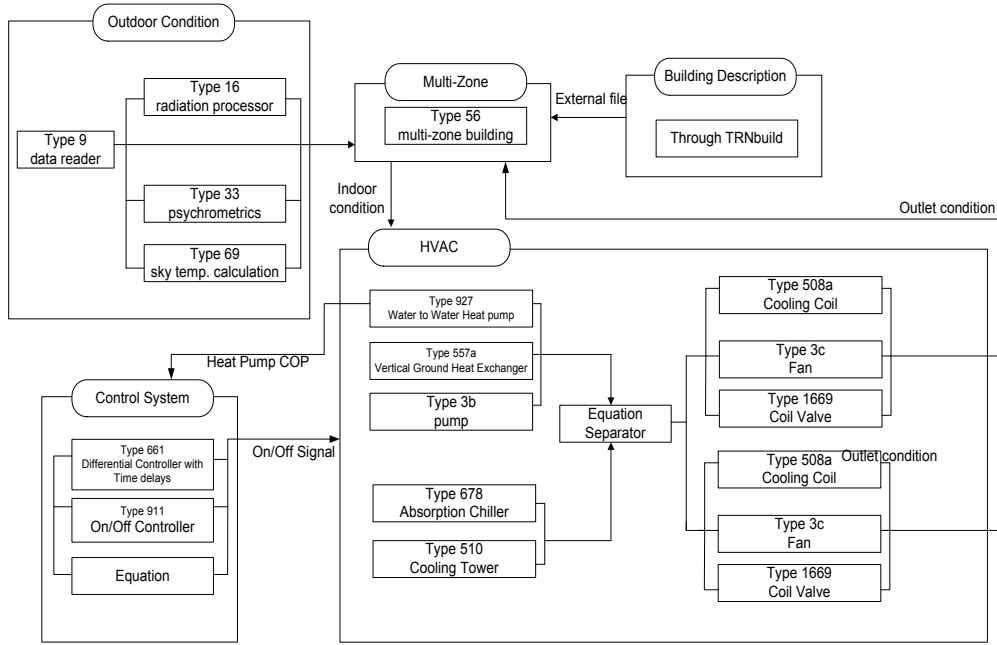


[그림 2.3.15] 복합 지열 히트펌프 시스템의 모델링 화면



[그림 2.3.16] CASE2-1 시뮬레이션 흐름도

* Case2-1 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안



[그림 2.3.17] CASE2-2 시뮬레이션 흐름도

* Case2-2 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안

다. 시뮬레이션 신뢰도 검증

시뮬레이션 비교분석에 앞서 시뮬레이션의 신뢰도를 평가하기 위하여 실제 측정된 데이터와의 비교를 통해 통계적 방법의 하나로 식 (1)-(4)과 같이 MBE (Mean Bias Error)법과 변동계수인 (Cv(RMSE) Coefficient of Variation of Root Mean Square Error)를 사용하였다.

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{Period} (S - M)_{INT}}{\sum_{Period} M_{INT}} \times 100 \quad (1)$$

$$SE_{Period} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{INT}^2}{N_{INT}}} \quad (2)$$

$$A_{Period} = \frac{\sum_{Period} M_{INT}}{N_{INT}} \quad (3)$$

$$C_V(SE_{Period}) = \frac{SE_{Period}}{A_{Period}} \times 100 \quad (4)$$

여기서,

$S_{Interval}$: 시뮬레이션 결과값 (kWh)

$M_{Interval}$: 측정된 소비량 (kWh)

$N_{Interval}$: 실제 데이터의 총 개수

M_{avg} : 실제 모니터링 데이터의 평균

[표 2.3.7] Acceptable Calibration Tolerances

Calibration Type	Index	Acceptable Value
Monthly	MBEmonth	±5%
	Cv(RMSEmonth)	15%
Hourly	MBEmonth	±10%
	Cv(RMSEmonth)	30%

[표 2.3.8] 신뢰도 검증

Month	Aug
Measured data (kWh)	348,682
Simulated data (kWh)	337,283
MBEmonth	-3.27%
Cv(RMSE)	10.83%

ASHRAE's Guideline14에 의하면 전체 건물 시뮬레이션의 경우 실제 데이터와의 비교 결과의 오차 범위는 MBE의 경우 ±5%, CV의 경우 15% 미만인 경우 모델링이 신뢰도가 있다는 것으로 규정한다.

대상건물의 실제 8월분 전기 사용량은 약 348,682kWh 이며 시뮬레이션을 통한 전기 사용량은 약 337,283kWh 이다. 에너지사용량 모니터링결과와 비교한 결과 전력사용량 시뮬레이션 값은 실제 측정된 값의 96.7%로 산출되었으며, MBE = -3.27%. Cv(RMSE) = 10.83%로 계산되었다. MBE (Acceptable Value : ±5%)와 Cv(RMSE) (Acceptable Value : 15%) 값이 모두 오차 범위 안에 들어왔다. 따라서 시뮬레이션은 신뢰도가 있다고 판단할 수 있다.

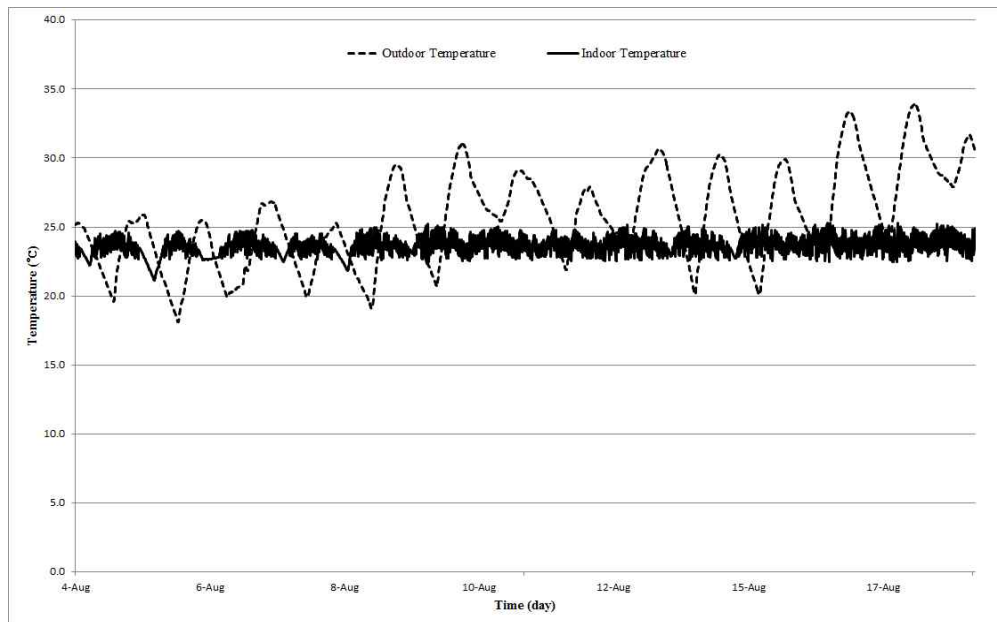
라. 시뮬레이션 결과 분석

(1) 단일 지열 히트펌프 시스템

(가) 실내열환경 분석

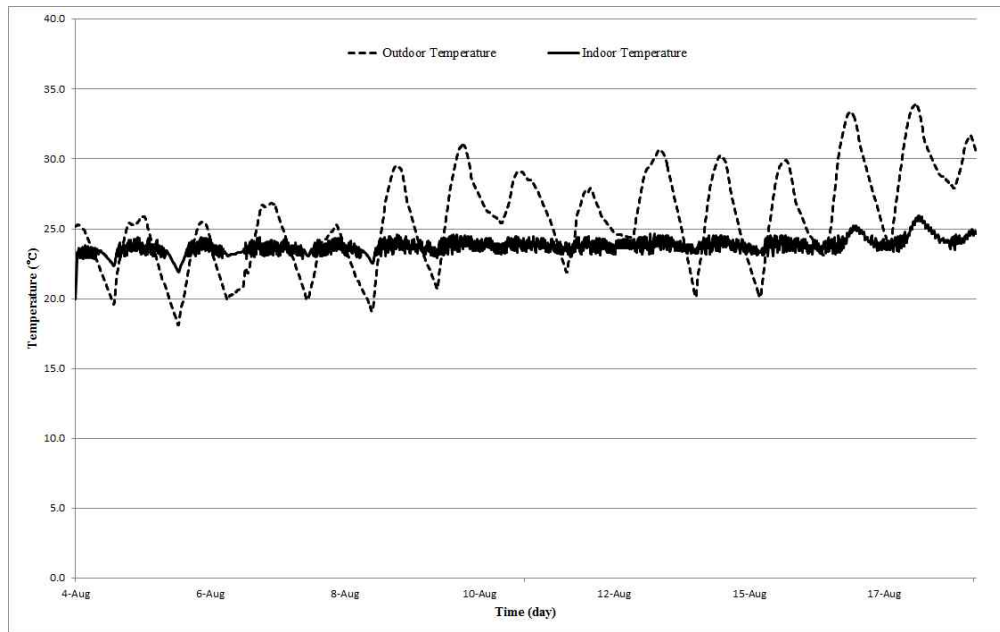
[그림 2.3.18]는 하절기 실내온도를 24℃(±1℃)로 설정 하였을 때 실내 공간의 온도를 [그림 2.3.19]은 동절기 실내온도를 24℃(±1℃)로 설정 하였을 때 대표 실내 공간의 온도 나타낸 그래프이다. 모든 공간의 실내온도가 설정 값에 맞게 제어 되고 있지만 32개의 공조 공간을 대표하는 하나의 실내공간을 그래프로 나타냈다. 대표 실내 공간은 AHU8으로 움직이며 노

인동의 일부를 공조하고 있다. 병원의 경우 일반 건물과 달리 실내공간의 쾌적이 중요하다. 실내공간의 설정온도는 조금만 벗어나도 재실자들의 쾌적에 문제가 생길 것이다. 시뮬레이션 결과 두 방안 모두 실내 공간의 설정 편차 내에서 실온의 제어가 가능했으며, 평균 실의 온도는 기존의 운영방안에서 성능계수에 따른 순차적 운영방안으로 갈수록 설정 값에 더 근접하였으며 실온편차가 줄어드는 것을 확인하였다. 이에 따라 실내 열 환경을 쾌적하고 안정적으로 실온을 제어할 수 있음을 확인하였다.



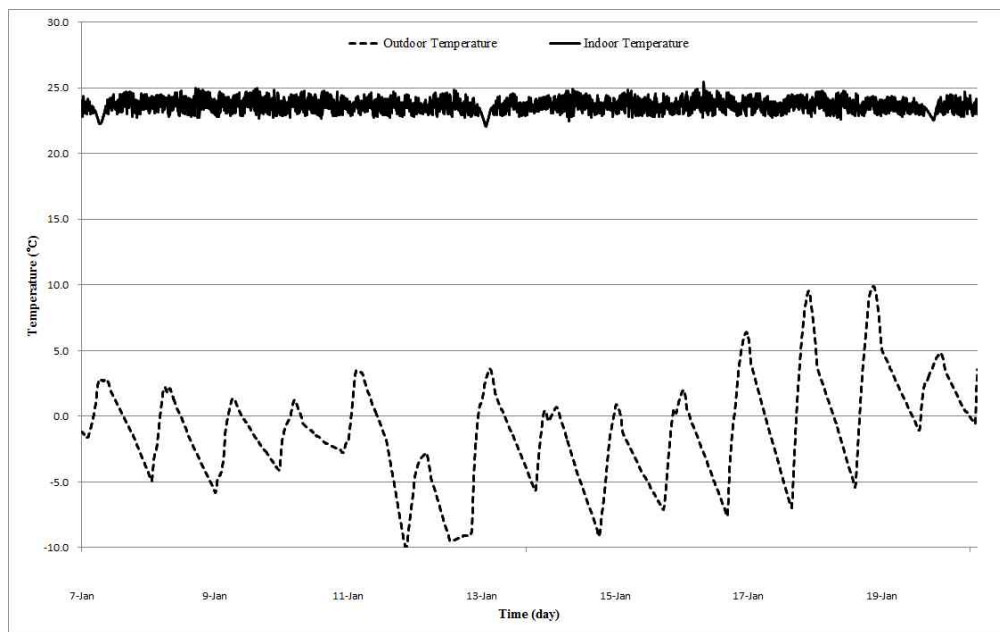
[그림 2.3.18] (a) CASE1-1 여름철 실내온도

* Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 운영방안



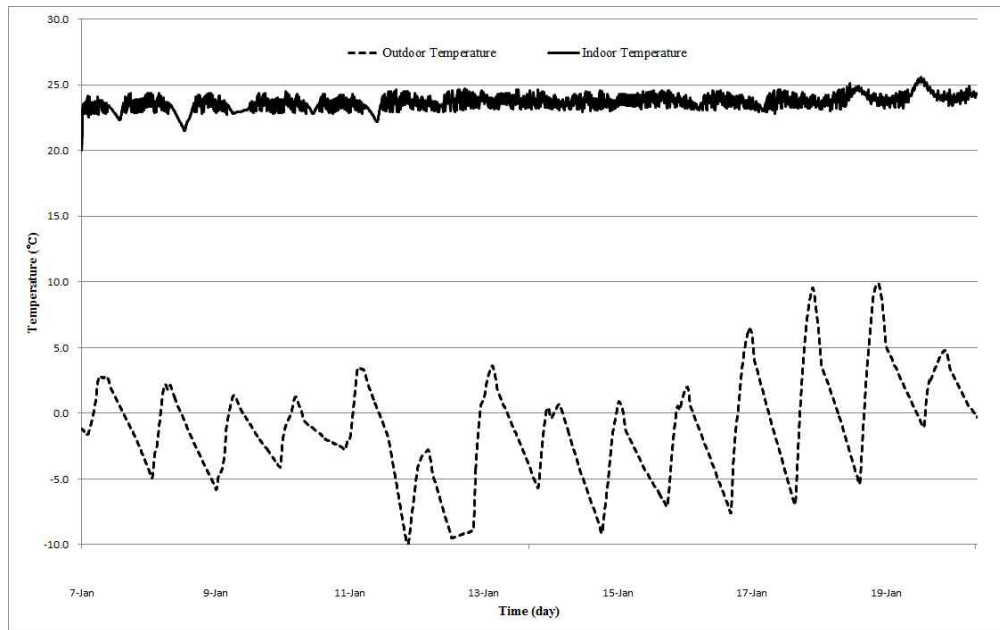
[그림 2.3.19] (b) CASE1-2 여름철 실내온도

* Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안



[그림 2.3.20] (a) CASE1-1 겨울철 실내온도

* Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 운영방안

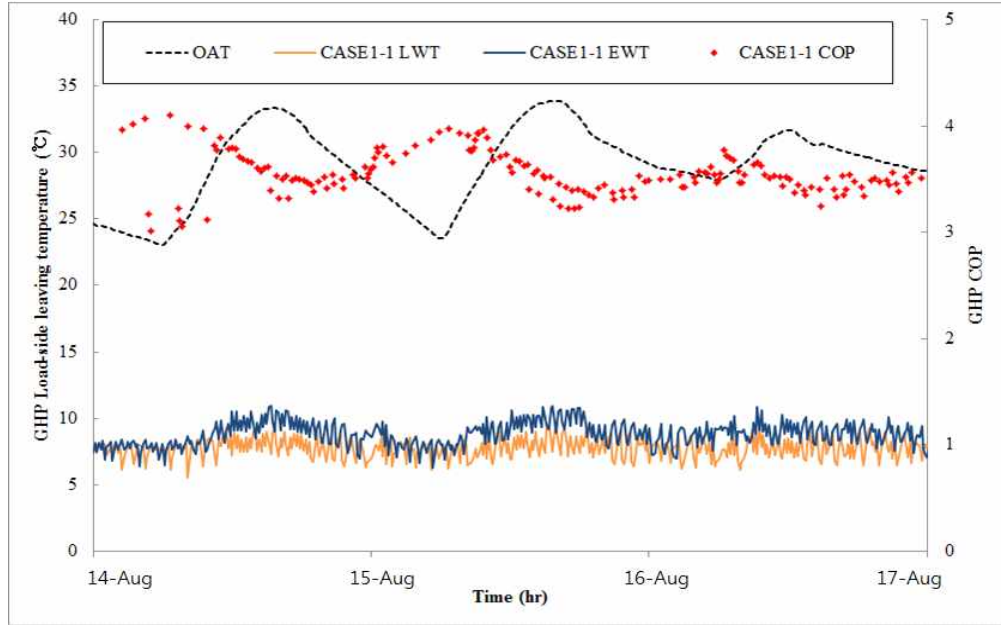


[그림 2.3.21] (b) CASE1-2 겨울철 실내온도

* Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안

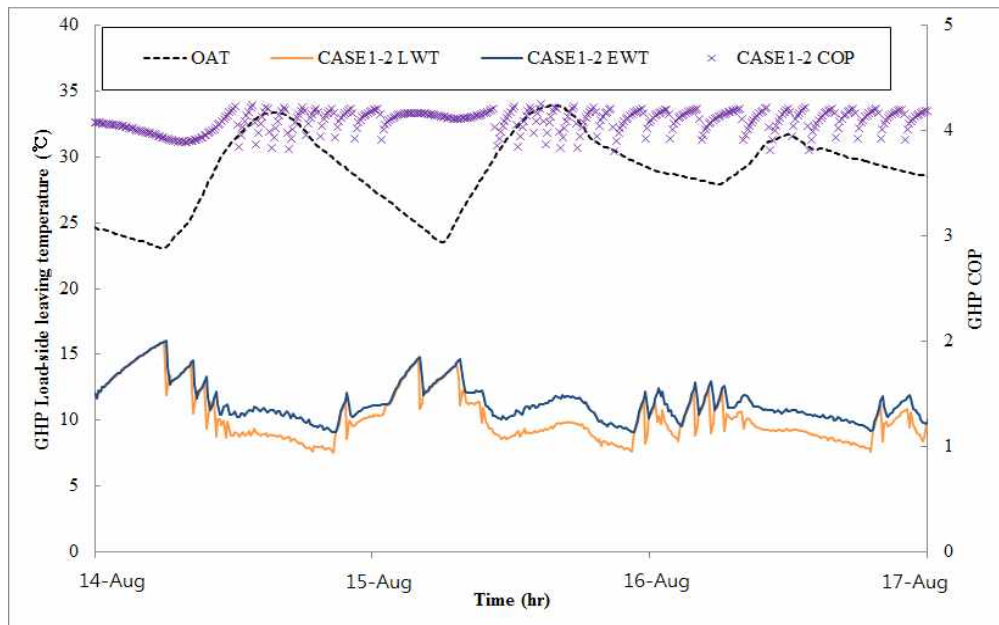
(나) 지열 히트펌프 시스템의 냉수 입 출구 온도 및 성능계수 분석

[그림 2.3.22]의 경우 각 운영방안별 지열히트펌프의 여름철 냉수 입 출구 온도와 COP를 분석한 결과이다. 기존운영방안의 경우 지열히트펌프의 출구온도는 평균 7.51℃ 입구온도는 평균 7.91℃이며 COP는 HP4번의 COP를 나타냈으며, 최대 4.10 평균 3.55로 나타나고 있다. 부하가 없는 경우에도 여름철 설정온도인 냉수온도 7℃를 맞추기 위해 낭비되는 에너지가 발생하므로 제어 포인트를 COP를 추가하여 성능계수에 따른 순차적 운영방안을 적용하였다. 그 결과 성능계수에 따른 순차적 운영방안의 경우 지열히트펌프의 출구 온도는 평균 12.33 입구온도는 평균 13.33℃를 나타냈다. 냉수 출구온도를 설정 값에 맞추는 것이 아니라 COP 4.2를 기준으로 순차적 제어를 하게 되고, 이에 따라 불필요한 에너지가 줄어들 것으로 예상된다. CASE1-2의 COP는 평균 4.1의 값을 나타냈으며 최대 4.25로 운영된다. [표 2.3.7]는 단일 지열히트펌프 시스템 각 CASE별 여름철 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.



[그림 2.3.22] (a) CASE1-1 지열히트펌프 시스템 냉수 입 출구 온도 및 COP (여름철)

* Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 운영방안



[그림 2.3.22] (b) CASE1-2 지열히트펌프 시스템 냉수 입 출구 온도 및 COP (여름철)

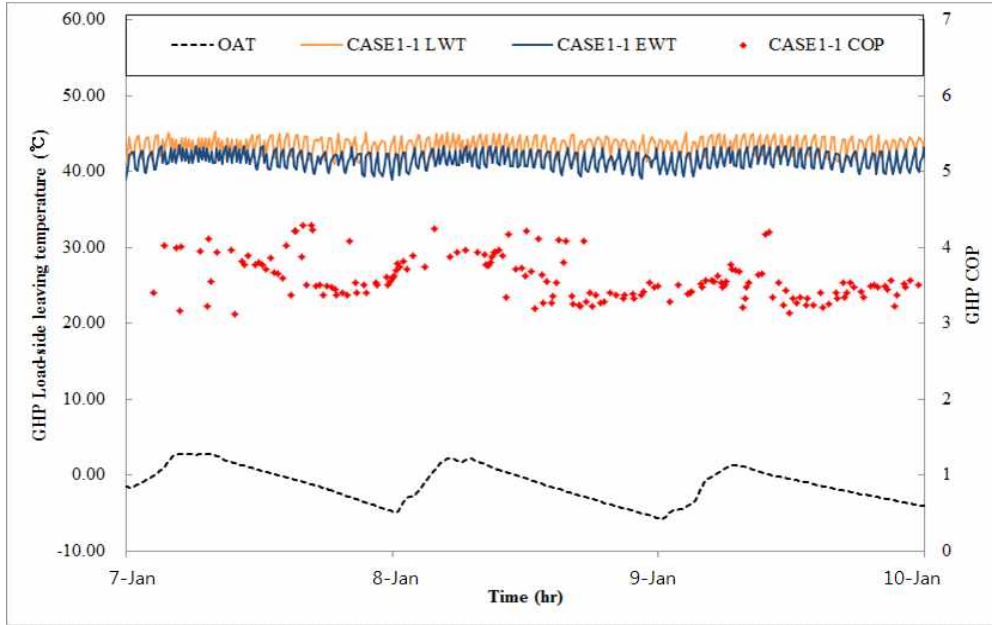
* Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안

* OAT : Outdoor Air Temperature LWT : Leaving water temperature
EWT: Entering water temperature COP : Coefficient of Performance

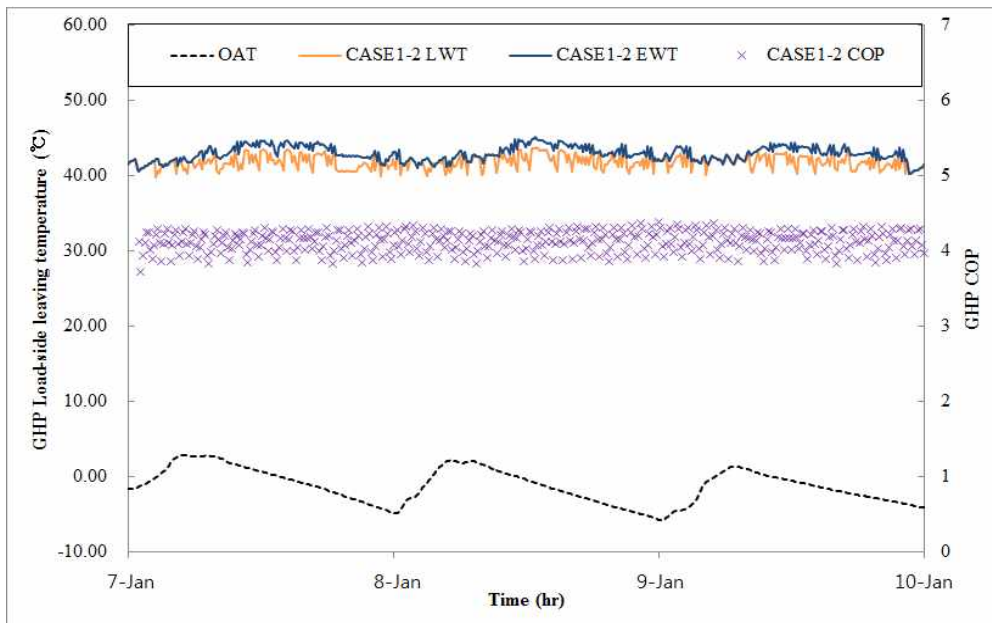
[표 2.3.9] 각 CASE별 여름철 시뮬레이션 결과

		CASE1-1	CASE1-2
Room air temperature(℃)	Min	22.13	22.9
	Max	25.9	25.3
	Average	23.76	23.59
LWT(℃)	Min	6.02	7.12
	Max	9.75	16.02
	Average	7.51	12.93
EWT(℃)	Min	6.38	8.4
	Max	11.18	16.02
	Average	7.91	13.33
COP	Max	4.10	4.25
	Average	3.55	4.1

[그림 2.3.23]의 경우 각 운영방안별 지열히트펌프의 겨울철 온수 입·출구 온도와 COP를 분석한 결과이다. 기존운영방안의 경우 지열히트펌프의 출구온도는 평균 43.46℃ 입구온도는 평균 41.71℃이며 COP는 최대 4.29 평균 3.59로 나타나고 있다. COP는 여름철과 동일하게 HP4의 COP를 그래프에 나타냈다. 성능계수에 따른 순차적 운영방안의 경우 지열히트펌프의 출구 온도는 평균 42.3 입구온도는 평균 41.5℃를 나타냈다. COP는 평균 4.12의 값을 나타냈으며 최대 4.3으로 운영된다. 겨울철 또한 설정온도 값에 COP 제어 포인트에 추가하고 순차적 운영방안을 적용함으로써 최대 효율에서의 순차적 운영을 통해 에너지 절감이 가능할 것이다. [표 2.3.8]은 단일 지열히트펌프 시스템 각 CASE별 겨울철 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.



[그림 2.3.23] (a) CASE1-1 HP 냉수 입출구 온도 및 COP (겨울철)
 * Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 순차적 운영방안



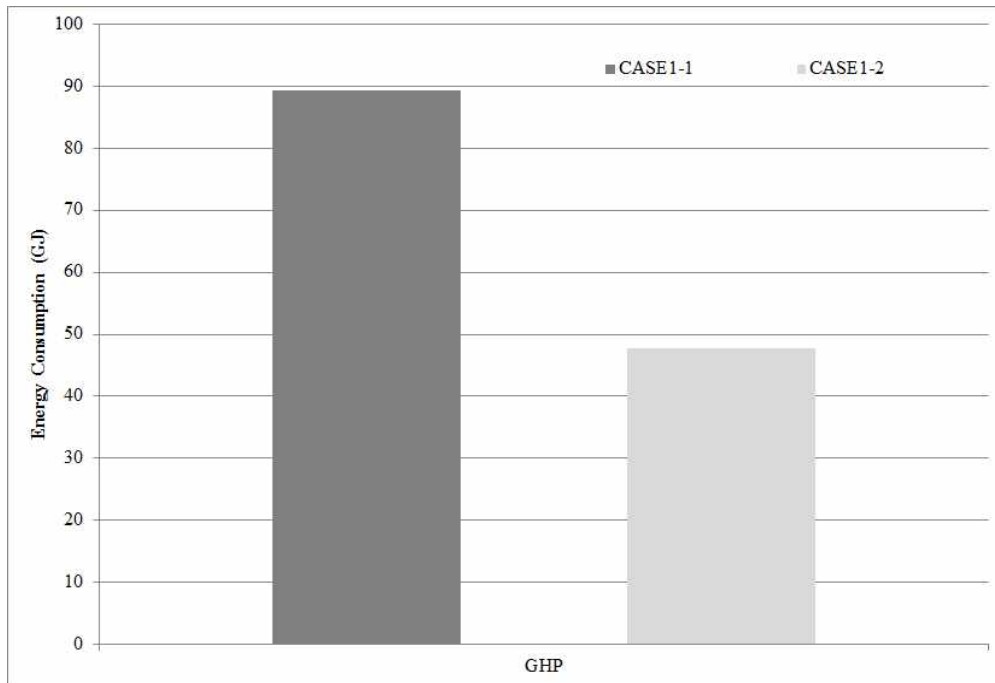
[그림 2.3.23] (b) CASE1-2 HP 냉수 입출구 온도 및 COP (겨울철)
 * Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안
 * OAT : Outdoor Air Temperature LWT : Leaving water temperature
 EWT: Entering water temperature COP : Coefficient of Performance

[표 2.3.10] CASE별 겨울철 시뮬레이션 결과

구분		CASE1-1	CASE1-2
Room air temperature (℃)	Min	22.08	23.53
	Max	25.58	25.44
	Average	23.67	23.66
LWT(℃)	Min	41.02	39.44
	Max	45.67	43.75
	Average	41.71	41.5
EWT(℃)	Min	38.98	39.98
	Max	44.91	45.24
	Average	43.46	42.3
COP	Max	4.19	4.12
	Average	3.59	4.3

(다) 에너지소비량 분석

[그림 2.3.24]은 3그룹에 해당하는 총 9대의 지열히트펌프 시스템의 총 에너지 소비량을 나타낸 그래프이다. 또한 [표 2.3.9]는 CASE별 총 지열 히트펌프 시스템의 총 에너지 소비량을 나타낸 표이다. 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안(CASE1-2)의 경우 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 순차적 운영방안(CASE1-1)에 비해 약 46%의 에너지가 절감되었다. 그러나 [그림 2.3.24]와 [표 2.3.10]인 각각의 히트펌프 시스템의 에너지 사용량을 봤을 때 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안(CASE1-2)의 경우 HP 4번으로 대부분의 부하를 부담하고 있었다. 기존 지열 히트펌프 시스템의 용량이 과다 설계되어 히트펌프 한 대의 최대 효율로 순차적 운영을 하게 되었을 때 HP 4번만으로도 대부분의 부하를 부담할 수 있었다. 지열 히트펌프 시스템의 설계 용량에 비해 담당하는 공조공간이 적어 효율이 높은 지열 히트펌프 시스템을 더 활용할 수 있음에도 불구하고 기존 열원과의 계통 분리로 인해 에너지 낭비가 발생하고 있었다. 즉, 효율이 높은 지열 히트펌프 만으로 건물의 부하를 만족시킬 수 있는 경우에도 각각 담당하는 AHU에 따라 두 열원 시스템이 모두 작동하게 되며 그로 인해 에너지 낭비가 발생하게 된다. 그러므로 남은 지열 히트펌프 시스템의 에너지를 기존 흡수식 냉온수기의 부하 분담율을 저감 시키고 지열 히트펌프 시스템의 사용을 극대화 한다면 에너지 효율 향상이 가능할 것이다.



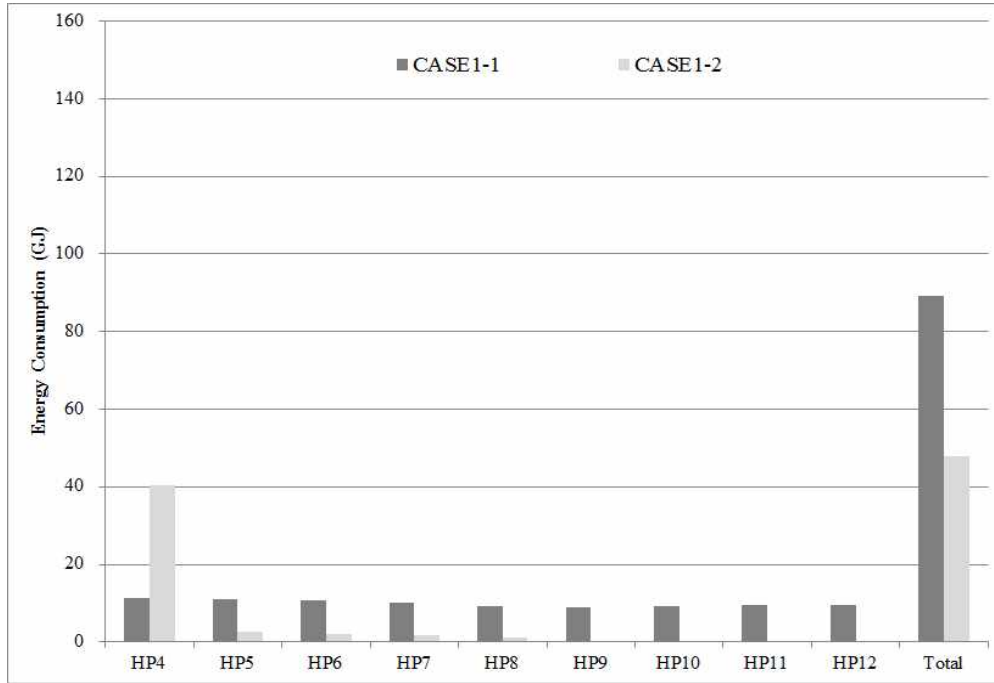
[그림 2.3.24] 단일 지열히트펌프 시스템-지열 히트펌프 총 에너지 소비량

[표 2.3.11] 단일 지열히트펌프 시스템-지열 히트펌프 총 에너지 소비량

CASE	에너지소비량 (GJ)
CASE1-1	89.26
CASE1-2	48.21

* Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 순차적 운영방안

* Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안



[그림 2.3.25] 단일 지열히트펌프-각 지열히트펌프 에너지 소비량

- * GHP, HP : 지열 히트펌프 시스템
- * Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 순차적 운영방안
- * Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안

[표 2.3.12] 단일 지열히트펌프 시스템-각 CASE별 지열히트펌프 에너지 소비량

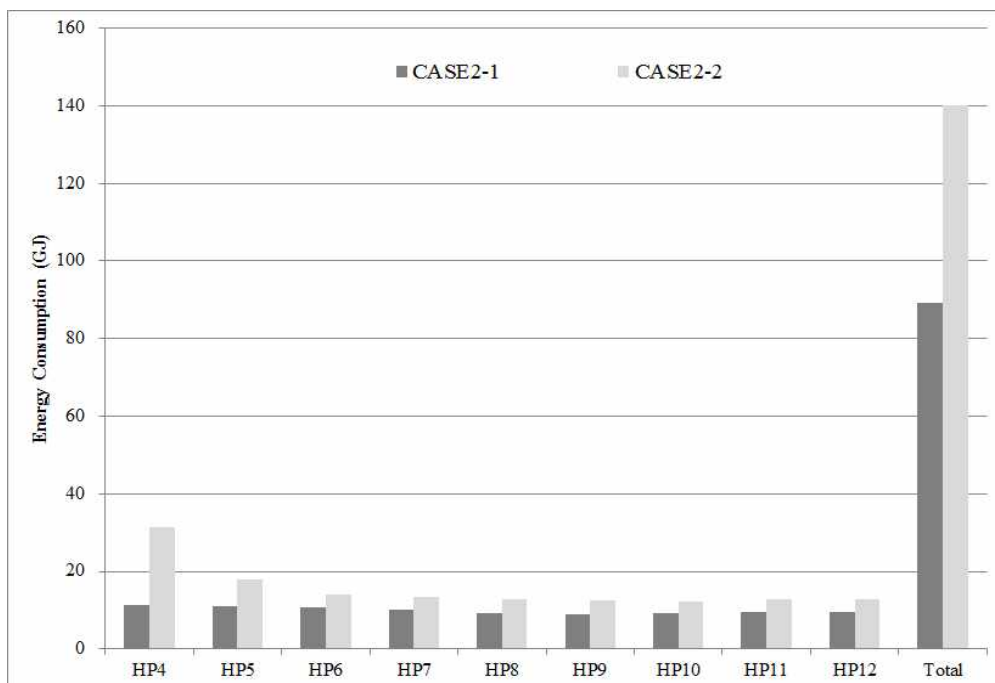
CASE	HP4 (GJ)	HP5 (GJ)	HP6 (GJ)	HP7 (GJ)	HP8 (GJ)	HP9 (GJ)	HP10 (GJ)	HP11 (GJ)	HP12 (GJ)	Total (GJ)
CASE1-1	11.26	10.93	10.77	10.01	9.28	8.87	9.32	9.42	9.43	89.26
CASE1-2	40.38	2.52	1.94	1.77	1.29	0.09	0.00	0.00	0.00	48.21

- * Case1-1 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 순차적 운영방안
- * Case1-2 : 멀티 지열히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안

(2) 복합 지열 히트펌프 시스템

1) 에너지소비량 분석

[그림2.3.26]는 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안(CASE2-1)과 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안(CASE2-2)의 각각의 지열 히트펌프 시스템 에너지 소비량을 비교한 그래프이다. 또한 [표 2.3.11]의 경우 각 지열 히트펌프 시스템의 에너지 소비량을 표로 나타낸 것이다. [그림2.3.26]와 같이 COP에 따른 순차적 운영방안을 적용하고 흡수식냉온수기와 계통을 통합한 CASE2-2가 각각의 히트펌프를 봤을 때 에너지 소비량이 증가함을 알 수 있다. 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통이 분리되어 있는 기존의 운영방식의 경우 열원별로 담당하는 공조공간이 정해져 있어 효율에 상관없이 두 열원 모두 작동하게 되며 그로 인해 에너지가 발생하게 된다. 이에 따라 CASE2-2에서는 흡수식 냉온수기와 지열 히트펌프 시스템의 계통을 통합하고 효율이 높은 지열 히트펌프 시스템을 우선적으로 사용할 수 있도록 운영하였다. 그 결과를 [그림 2.3.27]과 [표 2.3.12]에서 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 총 에너지 소비량으로 나타났다. 지열 히트펌프 시스템의 총 에너지 소비량의 경우 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안(CASE2-1)에 비해 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안(CASE2-2)에서 약 35%의 에너지 소비량이 증가하였지만, 흡수식 냉온수기의 경우 약 45% 에너지 소비량이 감소하였다. 그 결과 총 에너지 소비량의 경우 약 40%의 에너지 소비량이 감소하였다. 이는 COP에 따른 순차적 운영을 통해 지열 히트펌프 시스템의 효율적인 운영이 이루어졌으며, 흡수식 냉온수기와 계통 통합으로 부하를 부담하고 남은 지열 히트펌프 시스템의 에너지를 기존 흡수식 냉온수기의 부하를 분담하여 부하 분담율을 저감 시키고 지열 히트펌프 시스템의 사용을 최대한으로 한 결과로 에너지 절감이 이루어졌다.



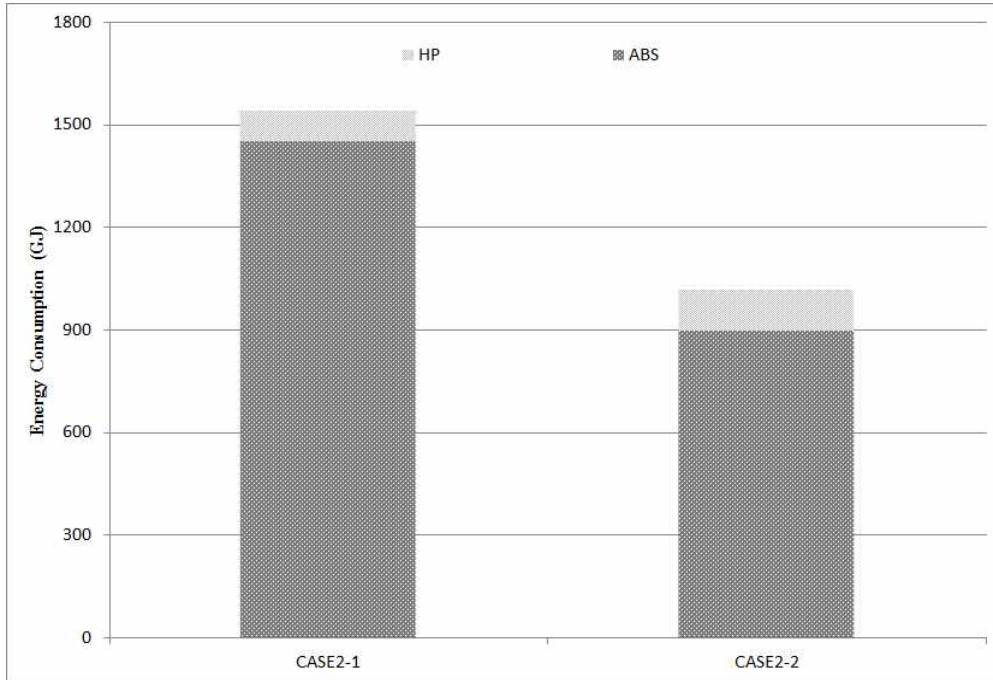
[그림 2.3.26] 복합 지열히트펌프 운영방안에서 각 지열히트펌프 에너지 소비량

[표 2.3.13] 복합 지열히트펌프 시스템- 각 CASE별 지열히트펌프 에너지 소비량

CASE	HP4 (GJ)	HP5 (GJ)	HP6 (GJ)	HP7 (GJ)	HP8 (GJ)	HP9 (GJ)	HP10 (GJ)	HP11(GJ)	HP12 (GJ)	Total (GJ)
CASE2-1	11.26	10.93	10.77	10.01	9.28	8.87	9.32	9.42	9.43	89.26
CASE2-2	31.4	18.03	14.04	13.39	12.92	12.43	12.3	11.7	11.5	137.7

* Case2-1 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안

* Case2-2 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안



[그림 2.3.27] 흡수식냉온수기와 지열 히트펌프 시스템의 에너지 소비량

*HP : Geothermal heat pump system, ABS : Absorption chiller

* Case2-1 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안

* Case2-2 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안

[표 2.3.14] 복합 지열히트펌프 시스템-지열 히트펌프 총 에너지 소비량

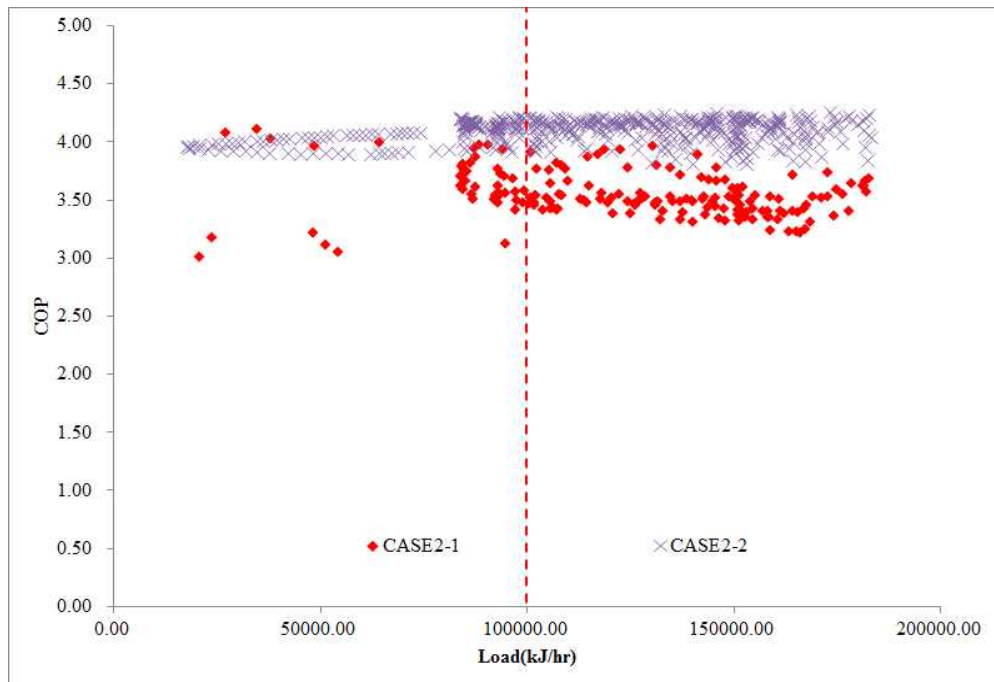
CASE	CASE2-1	CASE2-2
지열히트펌프 (GJ)	89.26	137.7
흡수식냉온수기 (GJ)	1451.52	801.02
합계(GJ)	1540.78	938.72

* Case2-1 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안

* Case2-2 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안

2) 지열 히트펌프 시스템의 COP와 부하의 관계

[그림 2.3.28]은 부하에 따른 COP의 관계를 분석하여 나타낸 그래프이다. 같은 부하조건일 때 지열 히트펌프 시스템의 COP를 살펴보면 기존운영방안보다 COP에 따른 순차적 제어를 적용하였을 때 히트펌프의 성능이 더 높게 나타나는 것을 확인하였다. 기존운영방안의 경우 히트펌프의 효율과 관계없이 냉수온도에 따라 ON/OFF제어가 되므로 상대적으로 히트펌프의 효율이 낮아지는 경향을 보인다. 반면 COP에 따른 순차적 제어는 최적의 COP로 효율이 좋은 상태에서 순차적으로 제어되기 때문에 효율이 높게 나타났다.



[그림 2.3.28] 지열 히트펌프 시스템의 COP와 부하의 관계 그래프

- * Case2-1 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통분리 운영방안
- * Case2-2 : 지열 히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기의 계통통합 운영방안

제3장 최종 연구성과

3.1 HVAC 시스템의 가상센서 개발

1. HVAC 시스템의 가상센서 개요

건물시스템에는 각각의 특성을 갖는 수천 개의 모니터링 센서가 필요하다. 이러한 센서들의 정보 이용은 높은 가치를 가지며 이전에는 불가능했던 건물의 최적화를 가능하게 한다. 하지만 모든 부분에 센서를 설치하는 것은 비용측면에서도 큰 문제가 따를 뿐 아니라 경우에 따라 정확하게 원하는 양을 측정 할 수 있는 물리적 센서를 설치하는 것은 매우 어려움이 있다. 일반적으로 건물 시스템은 각각의 건물마다 개별적으로 설계하는 경향이 있어 고급기능에 대한 비용 임계값이 훨씬 높다. 따라서 건물보다 지능적인 기능을 실현하는 핵심은 비용 임계값을 줄이는 데에 있고, 그 해결방법 중 하나가 가상센서 기술을 활용하는 것이다.

가상센서는 측정하기 어려운 부분을 저비용으로 여러 가지 수학적 모델을 사용하여 새로운 추정을 이끌어 내는 것을 말한다. 즉, 실제 센서를 설치하지 않고, 기 측정되는 데이터 포인트를 이용하여 물리량을 산출하는 방법이다. 이러한 방법은 안전성, 에너지 효율성, 비용 측면에서 건물의 시스템을 향상시키는 역할을 하며 높은 가치의 정보를 제공하기 위한 잠재력을 지니고 있다.

2. 지열 히트펌프 COP 모니터링 시스템 개발

효과적인 지열히트펌프 시스템 제어를 위해 저비용으로 높은 수준의 성능 모니터링을 위해 향후 COP 모니터링 적용과 함께 건물 자동제어 시스템에서 활용하여 건물의 제어 및 진단 시스템에 효과적으로 활용하는 방안을 모색해보고자 한다. COP 계산시 필요한 요소들을 얻어내기 위한 수식 (1),(2),(3)을 통해 산정 프로세스를 도출하였다.

Step 1. Power consumption 모델을 결정한다.

$$\eta_v = \frac{\dot{V}_{suc}}{\dot{V}_D} = \frac{\dot{N}V_{suc}}{\dot{N}V_D} = \frac{V_{suc}}{V_D} = 1 - \frac{c}{1-c} \left[\left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^{1/m} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}_{suc}}{v_{suc}} = \frac{\eta_v \dot{V}_D}{v_{suc}} = \frac{\eta_v \dot{N}V_D}{v_{suc}} \quad (2)$$

$$\dot{W} = \dot{m}w = \dot{m} \left\{ p_{suc} v_{suc} \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^{(m-1)/m} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

여기서,

η_v = Volumetric efficiency

$\dot{V}_D$ = Compressor Displacement rate

$\dot{N}$ = the number of suction strokes per unit time (rpm)

V_D = the volume of the suction chamber(s) (m³)

$\dot{V}_{suc}$ = actual volumetric flow rate evaluated at the suction condition

m = empirical parameter

Step 2. 지열히트펌프의 성능과 지열히트펌프 시스템의 성능은 일반적으로 성능계수 (COP, Coefficient of Performance)로 나타내며 다음의 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$COP = \frac{Q}{\dot{W}} \quad (4)$$

여기서,

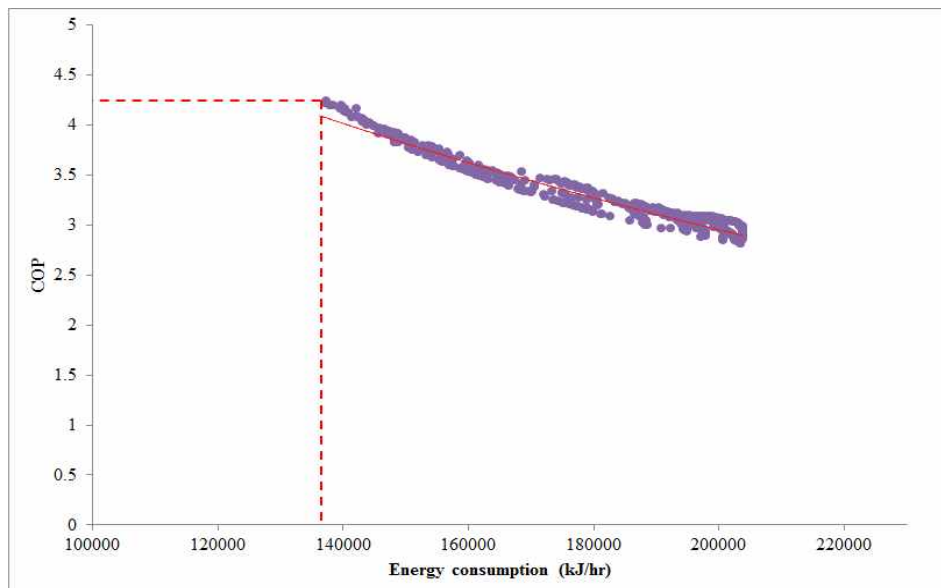
Q = Capacity(kW)

$\dot{W}$ = Power consumption (kW)

3.2 건물에너지 성능 모니터링 시스템 및 최적제어 알고리즘 개발

1. 건물에너지 성능 모니터링 시스템 및 최적제어 알고리즘 개요

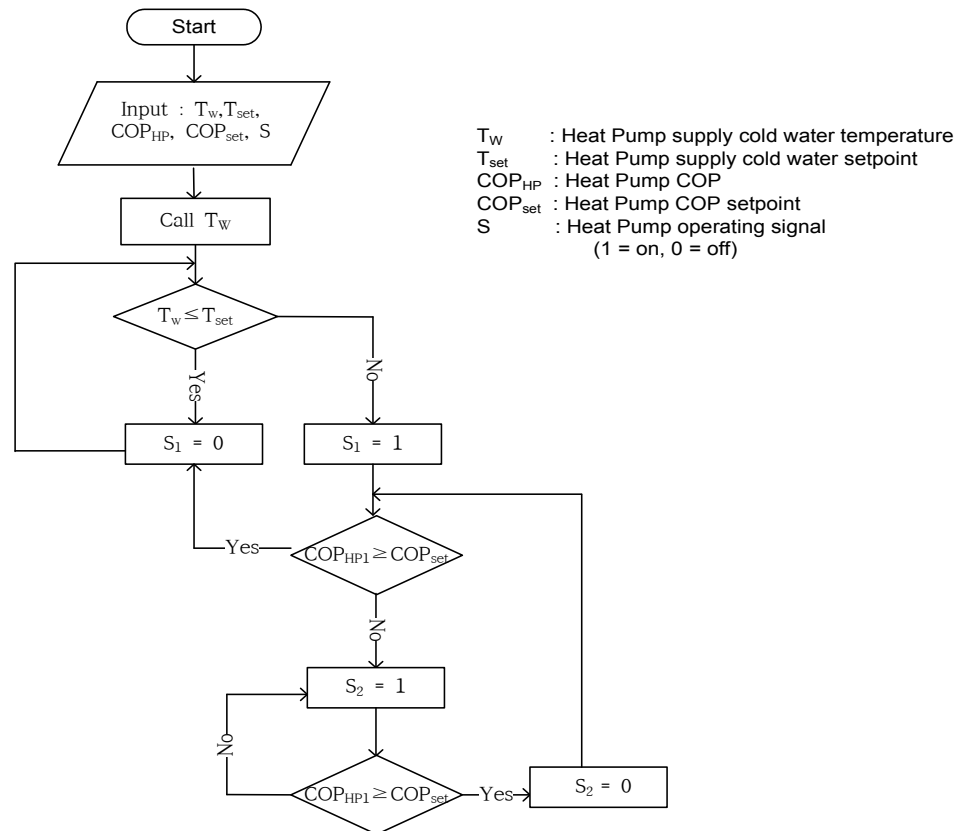
냉동기의 성적계수(Coefficient Of Performance, COP)는 냉동기의 열효율이 좋고 나쁨을 판정하는 기준으로 사용되며, 압축기가 1kg의 냉매를 압축하여 얻을 수 있는 냉각효과를 성능계수(COP)로 표시한 것이다. 즉, 어떤 조건 하에서 공급하는 일(W)에 대하여 냉동 효과의 비율로서 기기의 성능을 나타내는 계수이다. 한 대의 지열 히트펌프시스템이 낼 수 있는 최대 효율인 상황을 활용한다면 높은 효율을 가지는 동시에 가장 적은 에너지를 사용하여 기기의 제어가 가능할 것이다. 즉, 최적의 COP를 기준하여 COP모니터링에 따른 지열 히트펌프의 순차적 제어를 실시한다면 가장 적은 에너지로 높은 효율을 낼 수 있을 것이다. [그림 3.2.1]과 같이 지열 히트펌프의 에너지 소비량과 COP의 관계를 분석해본 결과 COP가 4.2일 때 가장 적은 에너지를 사용하고 높은 효율을 나타냈다. 따라서 최대 COP가 4.2를 넘을 경우 히트펌프가 순차적으로 작동하는 운영방안을 제시하였다. 이를 [그림 3.2.2]과 같이 알고리즘에 적용하여 지열 히트펌프 시스템의 기기의 성능을 고려하여 제어 포인트에 반영하는 멀티 지열 히트펌프 시스템의 성능계수에 따른 순차적 운영방안을 제안하였다.



[그림 3.2.1] 지열 히트펌프 시스템의 COP와 에너지 소비량 관계 그래프

2. 지열 히트펌프 최적제어 알고리즘 개발

1) 단일 지열 히트펌프 시스템일 경우



[그림 3.2.2] 성능계수에 따른 순차적 제어방안 알고리즘

① 현재 히트펌프 시스템이 작동중이지 않은 경우

히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높으면 ($T_w > T_{set} + d$) 히트펌프를 작동시킨다. 그 후 한 대의 히트펌프의 COP가 COPSET이 되어도 실의 부하를 부담하지 못하는 경우 다음 히트펌프를 작동시킨다. 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높지 않으면 현 상태를 유지한다.

② 현재 히트펌프 시스템이 작동중인 경우

최초 한 대의 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 낮으면 ($T_w < T_{set} + d$) 히트펌프 시스템을 작동을 중지한다. 한 대의 히트펌프 COP가 COP설정 값보다 높아지면 ($COP_{HP} > COP_{set} + d$) 실의 부하를 부담하지 못하고 있으므로 다음 히트펌프를 작동시킨다.

2) 복합 지열 히트펌프 시스템일 경우 (with 흡수식 냉온수기)

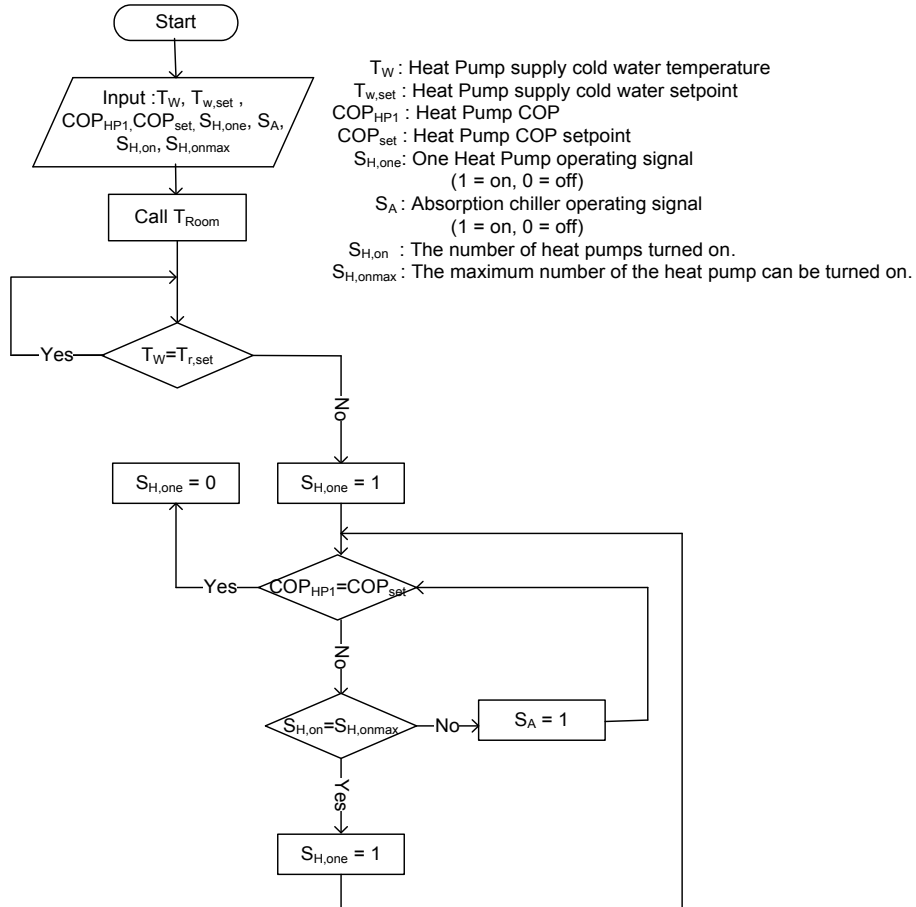
멀티 지열 히트펌프 시스템의 설정온도에 따른 대수운영 방안(CASE1-1) 에서 기기의 효율을 고려하는 성능계수를 제어 포인트에 추가하여 지열히트펌프 시스템의 효율을 높여 에너지를 절약하고, 기존운영방식의 문제점을 해결하기 위해 흡수식 냉온수기와 계통을 통합하여 복합운영방안을 제안하고자 한다. 이 방식은 각 열원 시스템의 열원수를 하나의 헤더로 공급하여 각 AHU로 분산시키는 방식이다. 열원 시스템 계통의 연결로 인하여 부하가 적을 경우 효율이 좋은 지열 히트펌프 시스템만으로 공조가 가능할 것이라 판단된다. 따라서 두 열원 시스템의 설정온도를 동일하게 설정해 주어야 할 것이다. 사용하지 않고 남은 지열 히트펌프 시스템의 에너지를 우선적으로 사용하고 기존 열원의 사용을 줄여 지열 히트펌프의 운영을 최대화하고, 기존 열원인 흡수식 냉온수기의 사용을 최소화한다면 에너지 효율을 향상시키는 운영방안이 될 것이다. [그림 3.2.3]은 CASE2-2의 운영방안을 알고리즘으로 나타낸 그림이다.

① 현재 히트펌프 시스템이 작동중이지 않은 경우

히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높으면 ($T_w > T_{set} + d$) 히트펌프를 작동시킨다. 그 후 한 대의 히트펌프의 COP가 COPSET이 되어도 실의 부하를 부담하지 못하는 경우 다음 히트펌프를 작동시킨다. 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 높지 않으면 현 상태를 유지한다.

② 현재 히트펌프 시스템이 작동중인 경우

최초 한 대의 히트펌프 냉수 출구온도가 설정온도보다 낮으면 ($T_w < T_{set} + d$) 히트펌프 시스템을 작동을 중지한다. 한 대의 히트펌프 COP가 COP설정 값보다 높아지면 ($COP_{HP} > COP_{set} + d$) 실의 부하를 부담하지 못하고 있으므로 다음 히트펌프를 작동시킨다. 지열 히트펌프 시스템의 운영을 최대한으로 진행하여도 부하를 부담하지 못한다면 흡수식 냉온수기의 작동을 시작한다.



[그림 3.2.3] 지열히트펌프 시스템과 흡수식 냉온수기 계통통합 운영방안 알고리즘

3. 건물에너지 성능 모니터링 시스템 및 최적제어 알고리즘 기대효과

지열 히트펌프 시스템을 기존의 열원인 흡수식 냉온수기와 계통을 통합하여 복합운영방안을 제안하였다. 이 방식은 각 열원 시스템의 열원수를 하나의 헤더로 공급하여 각 AHU로 분산시키는 방식으로, 열원 시스템 계통의 연결로 인하여 지열 히트펌프 시스템을 우선적으로 사용하고 여분의 에너지까지 기존 열원의 대상 공간에 분배 할 수 있도록 한다. 부하가 적을 경우 효율이 좋은 지열 히트펌프 시스템만으로 공조가 가능할 것이라 판단된다.

Heat pump의 성능을 확인할 수 있는 COP 가상 센서를 개발하였으며, 이것을 BEMS에 적용하여 순차적으로 제어할 경우 약 40%의 에너지 소비량이 절감되는 것을 확인하였다. 이에 따라, 실제 건물에 적용 시 약 20% 이상의 에너지 절감이 기대된다.

제4장 연구목표 달성 및 효과

4.1 연구개발 최종목표 달성도

[표4.1 연구개발 최종목표 달성도]

연차	연구목표	달성도 (%)	주요연구내용
1차년도	기존 가상센서 개발에 관한 국내외 실태조사 및 현황분석	100	- 국내외 학술 자료 및 논문 조사를 통한 가상센서 특징 및 현황 파악 - 국내외 산업조사 및 기술조사를 통한 가상센서 기술요소 분석 - 국외 가상 센서 제품 적용 및 활용사례 조사
	가상센서 성능목표 및 개발방향 설정	100	- 기 개발된 국외 선진 가상 센서 기술 조사를 통한 가상 센서 개발 방향 및 진행 조사 - 가상 센서 기술개발의 성능 목표 및 개발 방향 제시
	기존 건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어에 관한 국내외 실태조사 및 현황분석	100	- 국내외 학술 자료 및 논문 조사를 통한 특징 및 현황 파악 - 국외 선진 BEMS 분석
	건물 에너지 성능 모니터링 및 최적제어 개발 방향 설정	100	- 가상 센서를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 방안 검토 - HVAC 시스템 최적제어를 위한 가상센서 적용 방안 검토 - BEMS 연계 기술 개발 방향 설정
	가상센서 개발	100	- 가상 센서 개발을 위한 입출력 제어 인자 도출 - HVAC 시스템 가상센서 개발
2차년도	이론적 성능 검토 및 현장 실험 평가	100	- 수치 해석적 모델링 - 가상 센서 모델 및 함수 도출 - 가상 센서 현장 적용 프로세스 마련 - 가상 센서 신뢰성 검증
	가상센서 검토 및 보완	100	최종 검토 후 최종 설계 요소 제공
	건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어 적용	100	- 건물에너지 성능 모니터링을 위한 가상센서 적용 - HVAC 시스템 최적제어 알고리즘 개발 및 BEMS 연계
	시뮬레이션 및 현장실험 평가	100	- 최적 제어 알고리즘 적용 에너지 시뮬레이션 분석 - 경제성 분석 - 가상 센서 정확도 검증 - BEMS 활용성 분석
	가상 센서를 활용한 건물 에너지 성능 모니터링 및 HVAC 최적제어 시스템 상용화 및 브랜드화	100	- 최종 시스템 적용안 작성 - 가상 센서 시스템 시장 분석 - 브랜드화 및 상용화 - 신뢰성 검증

4.2 연구개발 성과의 학문적 효과분석

- 기후 인자와 건물 에너지 부하 결정 인자에 대한 수학적 이론과 건물 에너지와 관련된 다양한 최적화 및 제어 알고리즘에 대한 기초 이론 정립
- 국내외 건물에너지관리시스템과 관련된 정부, 산업, 학계 간의 인적 네트워크를 구축하고, 인터넷 매체와 세미나 등을 통한 관련 기술의 정보 공유 유도
- 신진 연구자의 연구 역량 확대는 물론 건축설비, 에너지, 자동제어, 시스템 설계 분야의 우수한 석·박사 양성에 기여

4.3 연구개발 성과의 기술적 효과분석

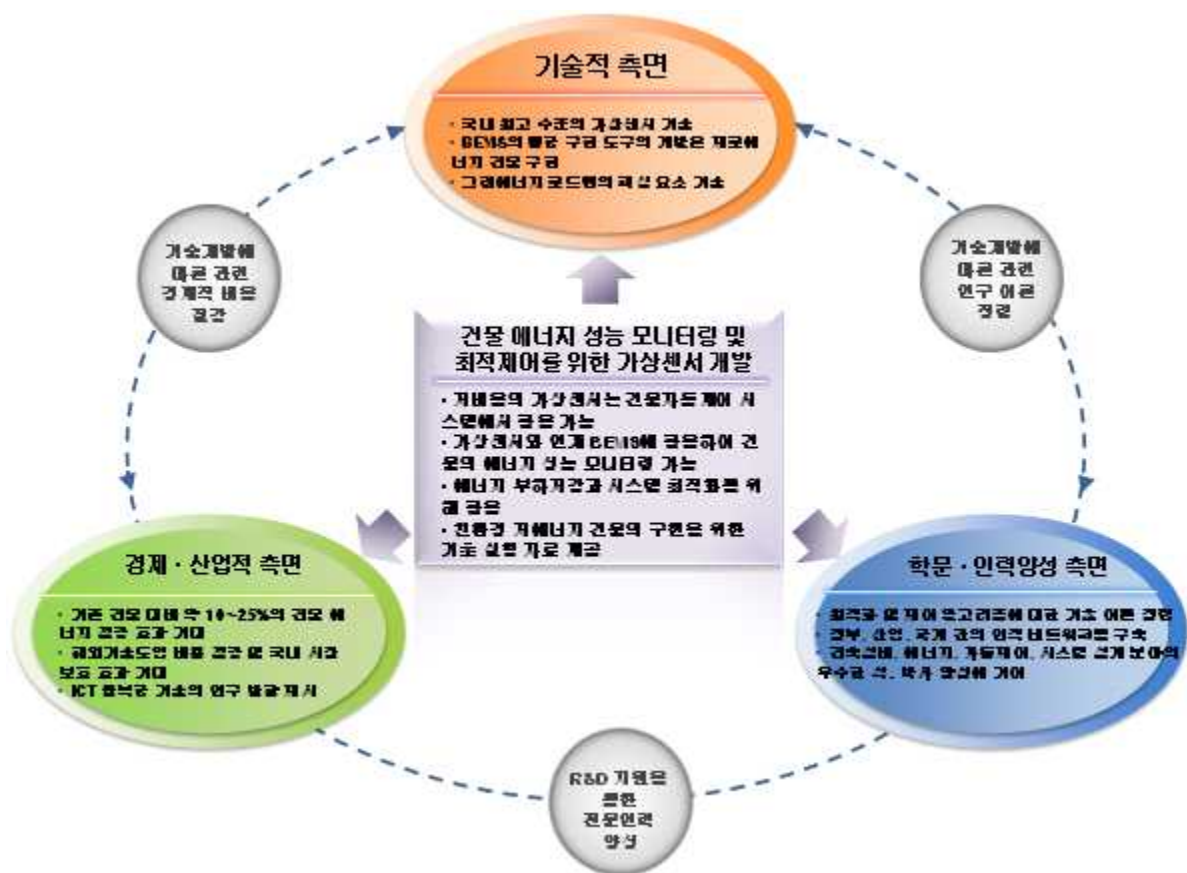
- 설비시스템의 제어 알고리즘 및 운영방안 개발로 축적된 관련 제어 요소 기술에 대한 기초 데이터 및 실증 데이터는 관련 산업 전반은 물론, 이후 다양한 관련 제어 기술개발 연구에서 활용도가 높을 것으로 예상됨.
- BEMS와 연계된 가상센서로 인한 HVAC 시스템 실증사업을 통해 건물의 쾌적, 유지관리, 에너지절감이 기대되고 건물 자동제어 기술의 적용 및 저비용 설비 시스템 구현을 통합적으로 실시할 경우 기존 건물 에너지 사용량 대비 약 20% 이상의 에너지비용 절감 효과가 예상됨.
- 개발 기술은 주변의 사물이나 센서들을 활용하여 건물 시스템 내에 새로운 가상센서를 만들 수 있고, 센서 간의 융합을 통해 새로운 정보를 얻을 수 있어 신산업 및 서비스를 창출할 수 있을 것으로 기대됨.

4.4 연구개발 성과의 경제적 효과분석

- 개발된 가상센서를 통해 추가적인 가상센서 개발이 가능하고 이를 통하여 건물의 고장진단이나 유지관리 시스템을 구축하고 이를 BEMS에 적용함으로써 건축분야 뿐만 아니라 관련 분야에 선도적으로 연구를 수행해 차별화된 운영 기술을 갖추. 또한 향후 연구에 대한 방향을 제시.
- 저에너지·친환경 건축에 대한 국내외의 시장 수요는 기후 변화 관련 산업의 성장에 힘

입어 높은 비율로 증가하고 있음. 가상센서와 연계한 고장진단 건물에너지관리시스템은 기업과 연계하여 시스템 상용화를 통해 국내 시장은 물론 해외시장 진출을 통한 수익 창출 가능.

- 해외기술도입(설계 및 컨설팅) 비용 절감 및 국내시장을 보호하고 수입 대체효과 기대.
- HVAC 기술 및 건물에너지 제어/관리를 위한 ICT 융복합 기술의 연구 방향 제시



[그림 4.1] 연구개발 성과의 경제적 효과분석

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

5.1 연구성과 향후 활용방안

▫ 본 연구의 목표는 BEMS를 활용하여 저비용으로 높은 가치의 시스템 정보를 얻기 위해 가상센서를 개발하고, 건물의 안정성과 에너지 절감을 확보하기 위한 성능모니터링 및 최적제어 기술을 개발하는 것임. 개발된 시스템을 활용하여 저비용으로 건물에너지 유지관리에 사용할 수 있으며, BEMS에 연계하여 온실 가스 감축을 위한 저에너지 건물의 실현에 중요한 요소 기술이 될 수 있음.

본 연구의 결과물별 활용 방안을 세부적으로 정리하면 다음과 같음.

1. HVAC 시스템의 가상센서 기술

- 건축설비 분야에서 저비용으로 높은 가치의 시스템 정보를 얻을 수 있는 가상센서는 건물자동제어 시스템에서 활용 가능
- 또한 개발된 가상센서는 물리적 센서와의 통합 적용으로 진보된 건물 고장진단 시스템 및 건물 유지 관리에 효과적으로 활용가능

2. 건물에너지 성능 모니터링 및 최적제어 기술

- 가상센서와 연계하여 BEMS에 활용하여 HVAC 시스템의 최적화를 구축가능하며 에너지 부하저감과 시스템 최적화를 위해 활용
- 개발된 최적제어 기술은 국가의 에너지 전략 로드맵의 건축설비 측정 및 제어 시스템 개발과 건축설비 통합에너지 관리 시스템 개발 부문의 연구에 직·간접적으로 활용 가능

5.2 추가연구 필요성

▫ 본 연구에서는 지열 히트펌프 시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 성능계수에 따른 순차적 운영을 적용하여 기존열원인 흡수식 냉온수기와의 계통통합 운영방안을 제안하였다. 제안된 운영방안은 실내 열 환경을 만족하였으며, 기존의 운영방안과 비교 평가 한 결과 에너지 소비량 또한 절감 할 수 있는 운영방안임을 확인하였다. 본 연구는 제안한 운영방안이 실제 건물에 적용되었을 때 시뮬레이션과 같은 결과를 나타내는지 확인할 필요가 있다. 따라서 향후 연구에서는 제안된 운영방안을 실제 건물에 적용한 후 평가하여 지열 히트펌프 시스템의 효율적인 운영이 가능하도록 해야 할 것이다.

참고문헌

- 1) ANSI/ARI. 2003. ANSI/ARI Standard 540-1999, positive displacement refrigerant compressors and compressor units, New York: American National Standards Institute/Atlanta, GA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
- 2) ASHRAE. 1992. ANSI/ASHRAE Standard 52.1-1992, gravimetric and dust-spot procedures for testing air-cleaning devices used in general ventilation for removing particulate matter. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- 3) ASHRAE. 1999. ANSI/ASHRAE Standard 52.2-1999, method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- 4) ASHRAE. 2009. 2009 ASHRAE Handbook.Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- 5) ASTM. 1991. ASTM Standard E779-87, Test Method for Determining Air Leakage by Fan Pressurization. West Conshohocken, PA: ASTM.
- 6) Bose, R., A. Helal, V. Sivakumar, and S. Lim. 2007. Virtual sensors for service oriented intelligent environments. 3rd IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Technology (ACST 2007), April 2.4, 2007,Phuket, Thailand, pp. 165.70.
- 7) Carling, P., and P. Isakson. 1999. Temperature measurement accuracy in an air-handling unit mixing box. Proceedings of the 3rd International Symposium on HVAC (ISHVAC '99), November 17.19, Shenzhen, China.
- 8) Devogelaere, D., M. Rijckaert, O.G. Leon, and G.C. Lemus. 2002. Application of feedforward neural networks for soft sensors in the sugar industry. Proceedings of the VII Brazilian Symposium on Neural Networks (SBRN 2002), November 11.14, Recife, Brazil, pp. 2.6.
- 9) Dorst, L., A.G. Hoekstra, J.M. van den Akker, M. Bergman, F.C.A. Groen, J.M. Lagerberg, A. Visser, H. Yakali, and L.O. Hertzberger. 1998. Evaluation automatic debiting systems by modeling and simulation of virtual sensors. IEEE Instrumentation

and Measurement 1:118.25.

- 10) Doumiati, M., A. Victorino, A. Charara, and D. Lechner. 2009. Virtual sensors, application to vehicle tire-road normal forces for road safety. 2009 American Control Conference, July 10, St. Louis, MO, pp. 3337.43.
- 11) Federspiel, C. 2000. Predicting the frequency and cost of hot and cold complaints in buildings. HVAC&R Research 6(4):289.305.
- 12) Friedman, G. 2004. Too hot too cold diagnosing occupant complaints. ASHRAE Journal 46(1):S157.8, S160.3.
- 13) Gawthrop, P.J. 2005. Virtual actuators with virtual sensors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 219(5):370.77.
- 14) Gomez, E., H. Unbehauen, P. Kortmann, and S. Peters. 1996. Fault detection and diagnosis with the help of fuzzy-logic and with application to a laboratory turbogenerator. Proceedings of the 13th IFAC World Congress N:175.80.
- 15) Gonzalez, G.D. 1999. Soft sensors for processing plants. Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, July 10.15, Honolulu, HI.
- 16) Hardy, N., and A. Ahmad. 1999. De-coupling for re-use in design and implementation using virtual sensors. Autonomous Robots 6:265.80.
- 17) Hardy, N., A.A. Maroof. 1999. ViSIAr.a virtual sensor integration architecture. Robotica 17(6):635.47.
- 18) Healy, W. 2010. Building sensors and energy monitoring systems, building america meeting on diagnostic measurement and performance feedback for residential space conditioning equipment. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- 19) Joo, I.-S., M. Liu, and G. Liu. 2007. Application of fan airflow stations in air-handling units. Energy Engineering 104(2):66.80.
- 20) Jos de Assis, A., and R. Maciel Filho. 2000. Soft sensors development for on-line bioreactor state estimation. Computers and Chemical Engineering 24(2):1099.103.
- 21) Kabadayi, S., A. Pridgen, and C. Julien. 2006. Virtual sensors: Abstracting data from physical sensors. Proceedings of the 2006 International Symposium on World of

Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Washington, DC: IEEE.

- 22) Katipamula, S., and M.R. Brambley. 2005. Methods for fault detection, diagnostics and prognostics for building systems. a review, Part I. IJHVAC&R Research 11(1): 3.25.
- 23) Kestell, C.D., C.H. Hansen, and B.S. Cazzolato. 2001. Virtual sensors in active noise control. Acoustics Australia 29(2):57.62.
- 24) Kohonen, T. 1997. Self-Organizing Maps. Secaucus, NJ: Springer-Verlag.
- 25) Kourti, T. 2002. Process analysis and abnormal situation detection: From theory to practice. IEEE Control Systems Magazine 22(5):10.25.
- 26) Lee, P.S., and A.L. Dexter. 2005. A fuzzy sensor for measuring the mixed air temperature in air-handling units. Measurement 37(1):83.93.
- 27) Li, H. 2004. A decoupling-based unified fault detection and diagnosis approach for packaged air conditioners. Thesis submitted to the faculty of Purdue University.
- 28) Li, H., and J.E. Braun. 2002. On-line models for use in automated fault detection and diagnosis for HVAC&R equipment. Proceedings of the 2002 ACEEE Conference on Energy Efficiency in Buildings, August, Monterey, CA.
- 29) Li, H., and J.E. Braun. 2003. An improved method for fault detection and diagnosis applied to packaged air conditioners. ASHRAE Transactions 109(2):683.92.
- 30) Li, H., and J.E. Braun. 2007a. Decoupling features and virtual sensors for diagnosis of faults in vapor compression air conditioners. International Journal of Refrigeration 30(3):546.64.
- 31) Li, H., and J.E. Braun. 2007b. A methodology for diagnosing multiple-simultaneous faults in vapor compression air conditioners. HVAC&R Research 13(2):369.95.
- 32) Li, H., and J.E. Braun. 2007c. Economic evaluation of benefits associated with automated fault detection and diagnosis in rooftop air conditioners. ASHRAE Transactions 113(2):200.10.
- 33) Li, H., and J.E. Braun. 2009a. Development, evaluation, and demonstration of a virtual refrigerant charge sensor. HVAC&R Research 15(1):117.36.
- 34) Li, H., and J.E. Braun. 2009b. Virtual refrigerant pressure sensors for use in monitoring and fault diagnosis of vapor compression equipment. HVAC&R Research 15(3):597.616.
- 35) Li, H., and J.E. Braun. 2009c. Decoupling features for diagnosis of reversing and

check valve faults in heat pumps. *International Journal of Refrigeration* 32(2009):316.26.

- 36) Liu, G., M. Liu, and G. Wang. 2007a. Development of a pump water flow station in HVAC systems. 2007 Energy Sustainability Conference July 27.30, Long Beach, CA.
- 37) Liu, G., M. Liu, and G. Wang. 2007b. Optimized pump speed control using pump water flow station for HVAC systems. *ASHRAE Transactions* 113(2):362.7.
- 38) Liu, M., I. Joo, S. Li, K. Hansen, J. Wang, and A. Selzer. 2004. Implementing the continuous commissioning process in retrofit projects. *Journal of the Association of Energy Engineering* 101(4):37.58.
- 39) Reddy, T.A. 2007a. Formulation of a generic methodology for assessing FDD methods and its specific adoption to large chillers. *HVAC&R Research* 113(2):334.42.
- 40) Reddy, T.A. 2007b. Development and evaluation of a simple model-based automated fault detection and diagnosis (FDD) method suitable for process faults of large chillers. *ASHRAE Transactions* 113(2):27.39.
- 41) Robinson, K.D. 1999. Mixing effectiveness of AHU combination mixing/filter box with and without filters. *ASHRAE Transactions* 105(1):88.95.
- 42) Rossi, T.M., and J.E. Braun. 1997. A statistical rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners. *HVAC&R Research* 3(1):19.37.
- 43) Schulte, R., et. al. 2005. Continuous IAQ monitoring. *ASHRAE Journal* 47(5):38.40, 42, 44, 46.
- 44) Seo, D., J. Huang, and M. Krarti. 2008. Development of models for hourly solar radiation prediction. *ASHRAE Transactions* 114(1):392.403.
- 45) Tan, H., and A.L. Dexter. 2006. Automated commissioning of a cooling coil using a smart mixed-air temperature sensor. *Proceedings of the 7th International Conference on System Simulation in Buildings (SSB 2006)*, December 11.13, Liege, Belgium, Paper P14.
- 46) Wenzel, T.A., K.J. Burnham, M.V. Blundell, and R.A. Williams. 2007. Kalman filter as a virtual sensor: Applied to automotive stability systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 29(2):95.115.
- 47) Wichman, A. 2007. Evaluation of fault detection and diagnosis methods for

refrigeration equipment and air-side economizers. Masters thesis, Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.

- 48) Wichman, A., and J.E. Braun. 2009. A smart mixed-air temperature sensor. HVAC&R Research 15(1): 101.15.
- 49) Yang, M., and H. Li. 2010b. A virtual outside air ratio in packaged air conditioners. HVAC&R Research, forthcoming.
- 50) 남유진, 태양열 및 지중열원을 이용한 히트펌프 시스템의 최적이용법에 관한 연구, 설비 공학회논문집, 제24권, 제 6호, 2012.
- 51) 황인주 외 3명, 1. 지열-태양열원 복합시스템의 성능평가에 관한 연구, 대한설비공학회 논문집 제 18권 제 3호, 2006.
- 52) Ozgener, O. Experimental investigation of the performance of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating, International Journal of Energy Research. 2004.
- 53) 손병후 외 1명, 업무용 건물의 지열 히트펌프 시스템에 대한 성능 예측, 대한설비공학회 논문집, 제 26권 제9호, 2014.
- 54) 장재철, 통합 지열히트펌프 시스템의 성능 예측 및 검증에 관한 연구, 충남대학교 대학원 건축학과 석사학위 논문, 2011.
- 55) 박정환, 주거용 건물에 적용된 지열 히트펌프시스템의 냉방성능에 관한 연구, 경북대학교 대학원 건축공학과 석사학위논문, 2008.
- 56) 정영주 외 3명, 지열순환펌프 유량변화에 따른 지열히트펌프시스템의 에너지 성능 평가, 태양에너지학회 논문집 제34권, 제6호, 2014. 12.
- 57) 이신영, 대학건물에 적용된 지열 히트펌프 냉난방 시스템의 성능 특성에 관한 연구, 경북대학교 건축,토목공학부 석사학위 논문, 2013.
- 58) 유시완, 지열원 히트펌프와 흡수식 냉온수기의 복합운동을 통한 에너지 효율 향상에 관한 연구, 금오공과대학교 대학원 건축공학과 석사학위논문, 2012
- 59) 장향인 외 4명, 건축물 신재생에너지원의 이용 현황 및 문제점 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 제32권, 제5호, 2012년.
- 60) 박정환, 주거용 건물에 적용된 지열 히트펌프시스템의 냉방성능에 관한 연구, 경북대학교 대학원 건축공학과 석사학위논문, 2008.
- 61) 제5차 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 평가보고서(AR5, the 5th

Assessment Report)

- 62) 신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법 제12조의5 및 동법 시행령 제18조의 3
- 63) 신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법 제12조 및 동법 시행령 제15조
- 64) 미 에너지부(DOE) 에너지효율·재생에너지국(Energy Efficiency and Renewable Energy)
- 65) 지열이용 냉난방 시스템의 성능 및 효율 향상을 위한 연구, 부산대학교 HVAC & R Energy Lab.
- 66) 한국에너지기술연구원 신재생데이터센터
- 67) 전국대학교 시설관리자협의회, 청주대학교 지열 냉난방 설치사례
- 68) 에너지관리공단 신재생센터 그린홈
- 69) 2012년 신재생에너지 보급통계(2013.12, 신재생에너지센터)
- 70) 국회예산정책처, 신재생에너지보급사업평가, 2010
- 71) Redlich CA, Sparer J, Cullen MR. Sick-building syndrome. Lancet 1997;349(9057):1013.6.
- 72) Nabinger SJ, Persily AK, Dols WS. A study of ventilation and carbon dioxide in an office building. ASHRAE Transaction 1994;100(2):1264.73.
- 73) Lu, T. et al. (2010), A novel methodology for estimating space air change rates and occupant CO2 generation rates from measurements in mechanically-ventilated buildings. Building and Environment 45, 1161-1172
- 74) Kang, D. (2013), Estimation of Air Exchange rate of a Residential Building by Using Occupant-generated Carbon Dioxide Gas, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design 29(10), 293-300
- 75) Kueha, T.H.(1998), Thermal Environmental Engineering (3/E), Prentice-Hall
- 76) Kang, S. et al. (2014), A study on the control method of single duct VAV terminal unit through the determination of proper minimum air flow, Energy and Buildings 69, 464-472
- 77) K. Shin, Y. Cho. (2015) A study on the estimation of indoor carbon dioxide concentrations using air handling unit system, Proceeding of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 85-86

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.