

수열원 히트펌프의 사이클 설계 및 제어 기술

Cycle design and control technology of water source heat pump systems

이 동 혁*, 진 심 원 (LG전자 DAC 연구소)

1. 머리말

국내 시스템에어컨 시장은 신도시 형성과 주상복합건물 및 중대형 아파트의 전실 공조 필요성 및 쾌적한 실내 환경 유지에 대한 요구의 증가 등에 의해서 수요가 매년 30% 이상의 급격한 증가 추세에 있으며, 중대형 공조 설비를 대체할 차세대 공조시스템으로 시장에서 평가 받고 있다. 이에 국내에서도 LG전자, 삼성전자 이외에 다수의 업체들이 자체의 기술력 확보 및 해외 업체와의 제휴를 통하여 국내 시스템에어컨 시장에서 치열한 경쟁을 하고 있다. 또한 국내 공조 시스템은 공조 방식에 따라 개별 공조 방식과 중앙 공조 방식으로 분류될 수 있는데, 공랭식을 이용한 시스템 멀티 에어컨은 개별 공조 방식으로 중앙 공급식보다 초기 투자비와 운전비용이 적어서 중앙 공조 방식이 주를 이루었던 대형 상업용 공조 시장에서 차지하는 비율이 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나 기존 개별 공조 방식의 공랭식 냉난방 시스템은 열원을 외부의 공기를 이용하므로 혹한기에 성능 계수가 급격하게 떨어져서 난방 약의 문제가 발생하는 단점이 있으며, 실외기의 팬 운전을 통한 공기 열 교환으로 인해서 유동 소음 및 진동 문제가 발생하고, 초고층 아파트에서 많이 발생하는 빌딩 풍에 의한 열풍 문제, 고저 차 및 장 배관 제한 기준으로 인하여 끝 분지 실내기의 능력 부족 문제, 인테리어 중요성 증가로 인한 실외기 설치 공간 확보 및 위치 선정의 어려움에 대한 난제가 있기 때문에 이를 극복하기 위한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

자사에서 수행한 에어컨 설치 전문점 및 설비설계업체와의 인터뷰 결과, 시스템 에어컨에서 중앙 공조 및 타 시스템으로 변경하는 주된 이유는 제품 신뢰성이 중앙 공조 대비하여 낮고, 건물주가 대형 덕트를 선호하는 경우가 많으며, 환기를 위한 별도의 덕트 설치를 해야 하고, 옥상 공간의 타 용도 사용, 정부 지원 및 난방 효율 문제에 대한 인식에 기인하는 것으로 조사되었고, 중앙 공조 시스템에서 시스템 에어컨으로 변경하는 주된 이유는 초기 투자비 및 설치비가 중앙 공조 대비 30%정도 절감되고 관리 인원이 절감되는 장점이 있기 때문이며 또한, 임대 건물 증가에 따른 개별 제어 요구 수요가 증가하고 지하 기계실의 주차장 사용으로 인하여 공간이 절감되는 장점 때문인 것으로 파악되었다. 이에 중앙 공조 시스템의 단점을 해결하면서 공랭식 개별 공조 시스템의 장점을 가진 수열원 개별 공조 시스템 개발 필요성이 시급하여 국내에서는 자사가 2005년에 휘센 수열원 냉난방기를 국내 최초로 개발하여 국내 시스템 에어컨 시장의 기술 경쟁력을 확보 및 중대형 공조 시장을 확대할 수 있는 기초를 마련하였다. 또한 OO 종합연구단지 및 인천 송도 신도시에 국내 최초로 수열원 냉난방기 시스템을 적용하였고, OO 대학교에 신재생 에너지인 지열을 이용한 수열원 냉난방기 시스템을 적용하여 운영하고 있다. 이에 자사에서 개발한 수열원 히트 펌프 시스템에 기초하여 사이클 설계 및 제어 기술에 대하여 소개를 드리 고자 한다.

2. 수열원 히트펌프 시스템 소개

수열원 히트펌프 시스템은 미국에서 1950년대 말부터 상업용으로 제작 판매되었고 최초 수열원 히트펌프는 플로리다 주에서 지하수와 운하 내 물을 열원으로 사용, 주거용으로 이용하도록 구성된 시스템이었다. 1960년대 초부터 각 용도별로 분리된 형태의 히트펌프가 사업용 및 공공용 건물에 적용되기 시작했다. 캘리포니아에 적용된 시스템의 경우 응축기 방열을 위하여 간접식 밀폐형 냉각수 회로가 구

성되고 난방시 보조 열원으로 보일러가 추가되었다. 이 같은 개념의 히트 펌프는 미국 동서부로 급속히 전파되어 오늘날 수열원 히트 펌프의 기술을 기반으로 발전되어 보급되는 추세에 있다. 전 세계적으로 10%/년 이상 설치가 증가되고 있으며 미국 내에서만 12%/년 이상 설치가 증가되고 있다. 국내에서도 수열원 히트펌프 시스템은 2000년에 국내 처음으로 도입되었고, 현재 900여 곳에 설치되어 운용되고 있다. 이는 대부분 지열을 이용한 수열원 히트펌프 시스템으로 2004년 정부의 대체 에너지 적용 의무화 법규 시행 이후 급격한 증가 추세에 있다. 그러나 보급된 대부분의 수열원 히트 펌프 시스템은 해외에서 도입되어 설치되고 있어 독자적 기술 확보를 통한 시장 형성이 어려웠다고 할 수 있겠다. 이에 자사에서 자체 국내 기술로 개발한 수열원 냉난방기는 수열원을 이용한 중대형 용량 가변 냉난방기로 국내 타 주상 복합 및 고층 건물에 적용되는 기존의 공랭식과는 달리 차별화된 수열원 공조시스템을 도입하여 고급 호텔 수준의 공조를 제공하는 프리미엄 시스템이다. 또한 덕트 타입의 일체형 시스템과 배관 연결 타입의 멀티 형 시스템으로 개발이 되었다. 그림1에서 알 수 있듯이, 덕트 타입의 일체형 시스템은 실외기가 필요 없는 실내외기 일체형 구조로 다양한 실내 공간의 효율적 냉난방은 물론 실내를 프리미엄 인테리어 공간으로 연출할 수 있다. 그리고 그림2의 배관 연결 타입의 수열원 멀티 시스템은 물-냉매 열 교환이 이루어지는 실외기에 여러 대의 실내기를 단 배관으로 직접 연결하여 냉난방하는 시스템이라고 할 수 있다.

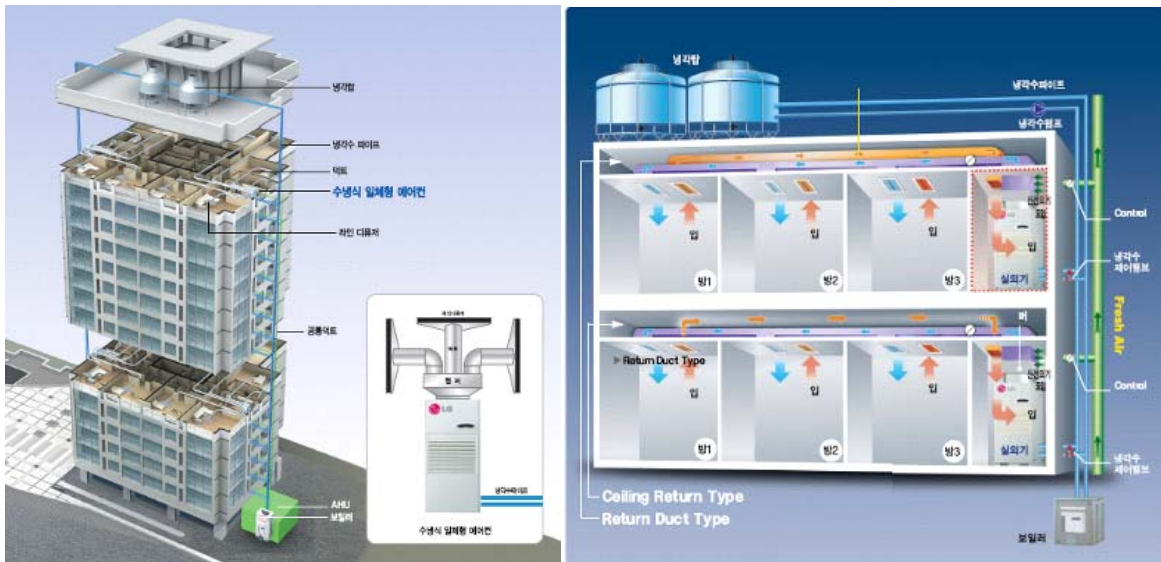


그림 1 Water source package heat pump system

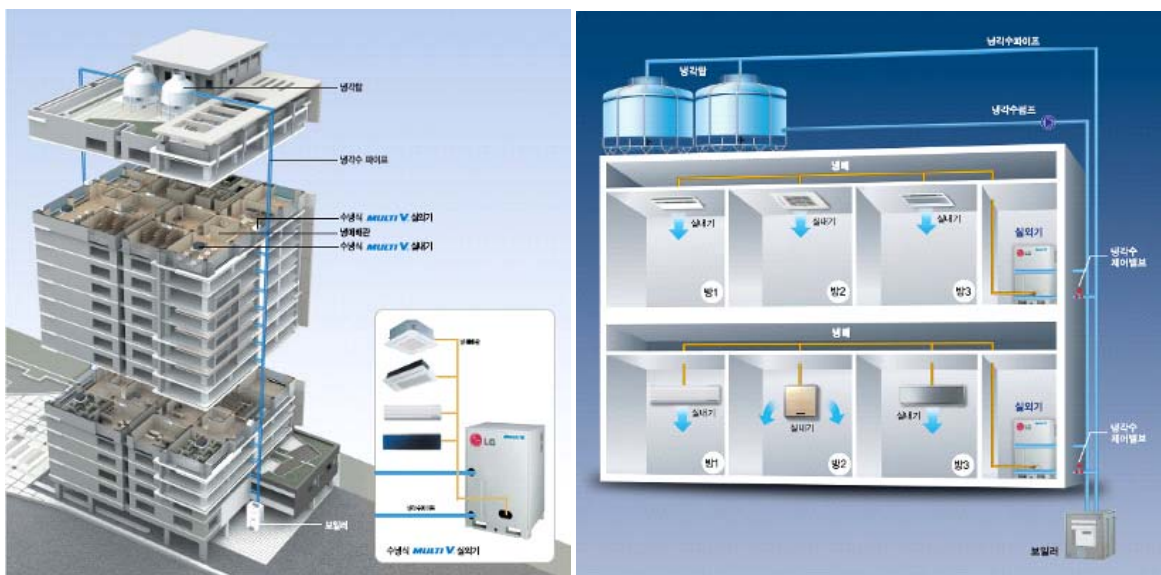


그림 2 Water source multi heat pump system

2.1 수열원 일체형 히트펌프

자사에서 개발한 4~6마력용 수열원 일체형 히트 펌프 시스템은 에어 핸들러부, 열교환기부 및 사이클부로 나눌 수 있다. 신선 외기는 시스템의 전면 흡입 그릴 및 고성능 필터를 통과하여 열교환기부에 있는 환-튜브 열교환기와 열 교환을 한 후 에어 핸들러부의 상부 토출구를 통해서 변풍량 유닛으로 이동하여 각 실내 공간으로 반송된다. 에어 핸들러부는 고정압 시로코 팬과 하우징, 초경량 BLDC 팬모터로 구성되어 있으며 시로코 팬의 블레이드 개수 및 길이, 하우징의 형상, 오리피스 직경 등을 CFD 해석을 통하여 최적 설계 인자를 도출하고, 팬 모터 마운트에서는 CAE를 이용하여 응력 설계를 수행하게 된다. 그림3은 CFD 해석을 통한 시스템 유로 및 덕트-디퓨저 해석 결과를 보여 준다. 실제 현장에서는 건물의 구조나 특성에 따라 다양한 기외 정압이 요구되고 있으며 이에 대응하기 위해서 본 시스템은 시로코 팬의 회전수 조절을 통해서 표준 풍량의 최소 20%까지 가변되도록 현장 맞춤형 설계를 하였다. 그림4는 기외 정압이 5.09mmAq 및 15mmAq일 때 시로코 팬 주파수에 따른 풍량 변화 및 시로코 팬 모터의 소비 전력 변화 특성을 보여 주고 있다. 이 그림으로부터 실내 부하 변동에 의하여 100%의 풍량 운전 조건에서 20%의 풍량 운전 조건이 될 경우, 팬 모터의 소비 전력을 약 500W까지 절감할 수 있다. 또한, 동일한 기외 정압에서 팬 회전수에 따라 풍량이 가변되는 특성과 인버터 압축기 운전 특성을 이용하면 부분 부하 효율을 최대화할 수 있고, 실내 거주자에게 최적의 공기 질을 제공할 수 있는 장점이 있다.

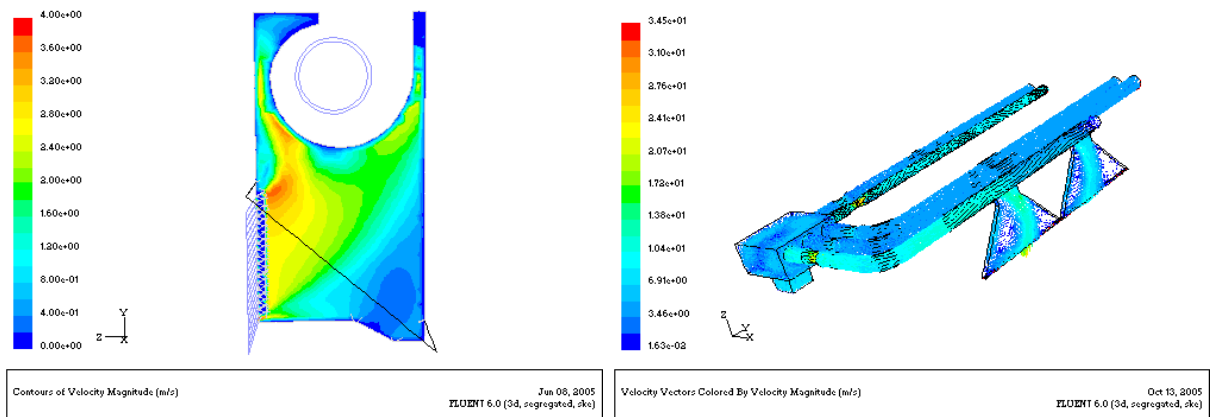


그림 3 Air flow pattern of the water source package heat pump

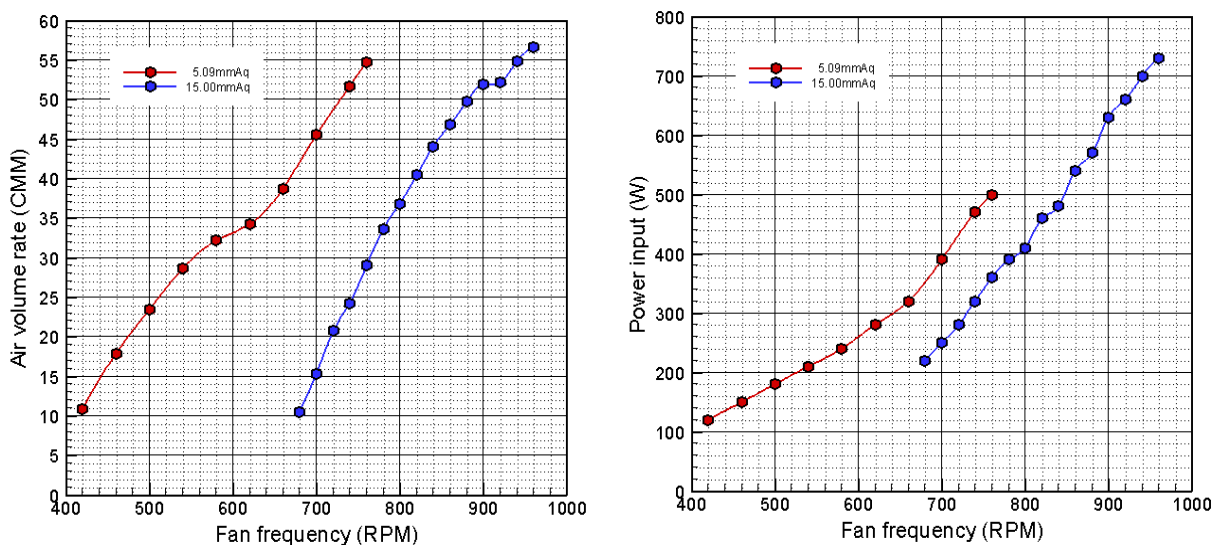


그림 4 Air volume rate and fan motor power input with sirocco fan frequency for 6HP

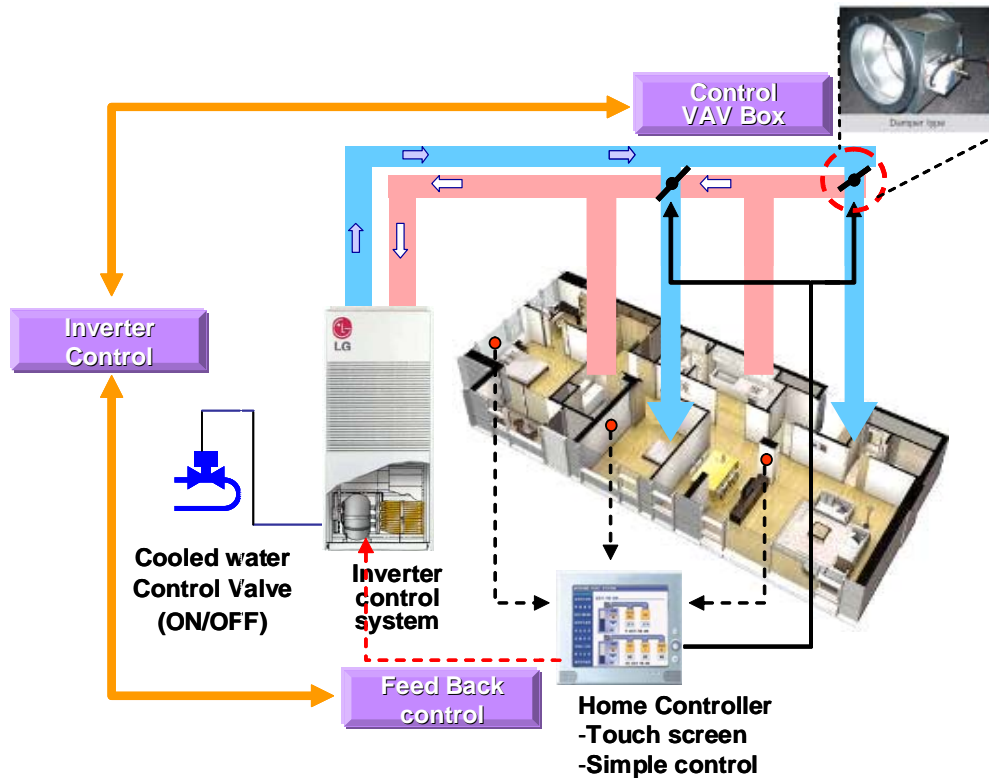


그림 5 Automatic control of HVAC system for energy saving

열교환기부는 부하 변동에 따른 인버터 압축기 제어에 의해서 냉매 이동량 변화가 크고, 변풍량에 의해서 열교환기 전단을 통과하는 공기 유속의 차이가 크므로 열교환기 냉매 분지에 대한 설계 및 과열도 제어가 아주 중요하다고 할 수 있다. 사이클 부는 인버터 로터리 압축기, 기액분리기 및 브레이징 판형 열교환기, 전자 팽창변으로 구성되어 있으며, 설계할 때 고려 사항은 사이클부의 저진동 및 저소음이며, 특히 인버터 압축기의 토출 및 흡입 측 배관 및 바이패스 관의 진동 및 응력에 문제가 없도록 설계하는 것이 중요하다. 또한 설치 편리성 측면을 고려하여 제품의 좌우 측면에서 설치자가 원하는 방향으로 수 배관을 설치할 수 있도록 설계하는 것도 중요하다고 할 수 있다. 사이클부 내의 냉매 배관은 CAE를 이용한 진동 해석을 통하여 공진 회피 및 응력 설계가 가능하다. 또한 물-냉매 열교환기의 경우 이중관 타입 열교환기 또는 브레이징 판형 열교환기가 주로 사용되는데 최근에는 브레이징 및 제조 기술이 향상됨에 따라 친환경 냉매인 R410A의 압력 조건에 적합한 고효율 브레이징 판형 열교환기를 많이 사용되고 있다. 이 열교환기들이 증발기로 사용될 경우, 냉매측은 저온저압의 이상유체가 이동하므로 냉매 균일 분배 특성을 고려하여 열교환기를 설계하는 것이 중요하다. 그림 5는 수열원 일체형 히트 펌프, VAV 유닛 및 수배관의 연동 제어에 대하여 보여 주고 있다. 공기 측 변풍량 제어, 물 측 변유량 제어, 제품 측의 인버터 냉매 제어를 통하여 HVAC 설비 시스템의 에너지 절약이 가능할 것이라 생각된다. 이러한 설비 연동 제어 시 각 제어 부품들의 피드백 제어 및 시퀀스 제어에 대한 주기 설정 및 냉각탑 및 보일러, 펌프 등과의 상호 통신 등이 중요한 설계 인자가 될 수 있다.

2.2 수열원 멀티형 히트펌프

일반적으로, 공랭식 멀티 히트 펌프를 설계할 때 고려되는 사항들은 다양한 실내기를 자유롭게 접속할 수 있도록 하고, 운전 범위가 10%~130%까지 가능하면서 부분 부하 효율을 향상할 수 있는 인버터 압축기 제어 방법, 장 배관 고저차를 고려한 냉매 유량 및 오일 회수 제어 방법 및 실외기 팬 저소음화 및 실외기 배관 진동 개선 방법, 기기 간 통신 네트워크 방법, 고장 진단을 이용한 신뢰성 강화 방법 등이다. 수열원 멀티 히트펌프 시스템은 기존의 공랭식 멀티 시스템과 다른 점은 수열원을 이용하기 위하여 환-튜브 열교환기와 송풍용 축류 팬을 제거하고 물-냉매 열교환기를 대신 사용하는 것이다. 그러므로 공랭식 멀티 히트 펌프의 많은 핵심 부품들을 공용으로 사용이 가능하다. 개별 공조 방식을 가지는



그림 6 Apparatus of water source Multi V system

수열원 히트펌프가 중앙공조 제품에 대한 경쟁력을 가지기 위해서 설치 면적을 최소화하고, 용량 확대 및 설치 편리성 강화와 수열원 설비 연동 제어가 중요한 인자들이라고 할 수 있다. 자사에서 2008년도에 세계 최소 설치 면적을 제공하는 20마력용 수열원 멀티 시스템을 개발하였다. 동일 용량에서 국내외 경쟁사 대비 30%이상 설치 면적을 축소시킨 고효율 콤팩트한 제품이라고 할 수 있다. 수열원 멀티 히트 펌프 시스템의 사이클 부는 그림6과 같이 인버터 스크롤 압축기 및 정속 스크롤 압축기, 판형 열교환기, 전자 팽창변, 기액 분리기, 유분리기, 수액기 및 과냉각기로 나뉜다. 압축기 선정의 경우, 제품의 콤팩트화를 위해서는 대용량 인버터 압축기 및 정속 압축기의 조합이 필수적이라고 할 수 있다. 수열원 멀티 히트 펌프의 경우, 수열원을 이용하기 때문에 공랭식 히트 펌프와 동일한 압축기 조합을 사용하더라도 냉매 이동량이 증가하여 더 큰 용량을 획득할 수 있다. 대용량을 얻기 위해서는 인버터 압축기의 고 주파수 영역 운전이 많아진다. 인버터 압축기가 고 주파수 영역에서 운전할 경우, 압축기로부터 토출되는 냉매 량과 오일 량이 증가하게 되므로 유 분리기 설계가 중요하다. 그림7과 같이 압축기에서 토출된 고온고압의 냉매와 압축기 오일은 유분리기로 유입되고, 유분리기에서 사이클론 유동 특성을 이용하여 고온고압의 냉매는 유분리기 토출구를 통하여 응축기로 이동하고 압축기 오일은 유분리기 아래로 떨어져서 다시 모세관을 통하여 압축기로 재유입 된다. 모세관 설계의 경우, 모세관 내를 이동하는 압축기 오일 거동을 층류로 가정하면 아래와 같은 식(1), 식(2)에 의해서 모세관 내를 이동하는 압축기 오일 량을 간단히 예측할 수 있다.

$$\Delta P = f \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2}, f = \frac{64}{Re} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{oil} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot \Delta P \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot \Delta L} \quad (2)$$

여기서, ΔP : 압축기 토출 압력과 압축기 흡입 압력 차이,
 ΔL : 모세관 길이,
 ΔD : 모세관 내경,
 ρ, μ : 압축기 오일의 밀도 및 점성 계수
 \dot{m}_{oil} : 모세관 내 압축기 오일 이동 량

식(1) 및 식(2)로부터 오일 회수 량은 시스템의 고저압차, 모세관의 직경 및 길이의 함수인 것을 알 수 있다. 공랭식 히트펌프의 경우, 실외기 측 냉매 사이클 부의 압력을 필요에 따라 송풍용 팬으로 가변이 용이하지만, 수열원 히트 펌프에서는 냉각수를 정유량 제어할 경우, 실외기 측 냉매 사이클 부의 압력을 제어하기가 쉽지 않다. 그러므로 실내외측이 과부하 조건인 경우, 시스템의 고저압차가 작고 인버터 압축기의 주파수가 높을 때 압축기 오일을 회수할 때 문제가 될 수 있으므로 이를 고려하여 유분리기 및 오일 회수 운전 제어 로직을 설계하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 또한 제품의 콤팩트화를 위해서는 각 주요 부품들의 설치 면적을 줄이는 것이 중요한데, 이를 위하여 기존의 직경이 크고, 높이가 낮은 기

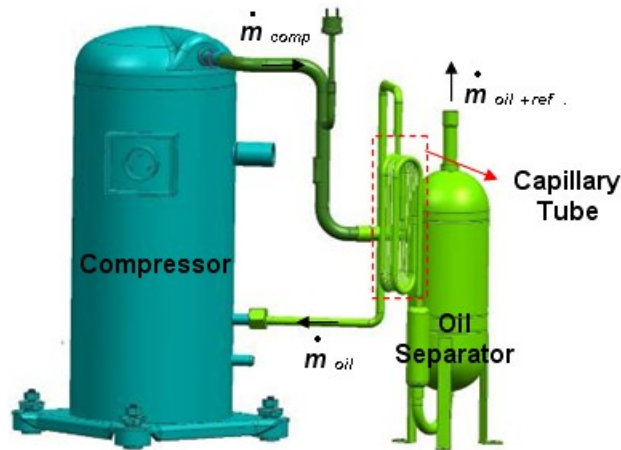


그림 7 Refrigerant circuit of the compressor and the oil separator

액 분리기를 직경이 작고, 높이를 키운 형태로 개발하여 적용하였으며, 기액 분리 방법은 기액 분리기 용기 내에 흡입가스를 도입하여 용기 중에서 갑자기 속도를 늦추고, 사이클론 방식의 회전을 이용하여 가스 중의 냉매 액을 중력으로 분리하여 용기 하부에 냉매액과 오일은 쌓이게 된다. 그리고 주기적으로 기액 분리기의 바닥에 설치된 유배출구를 통하여 압축기 오일은 다시 압축기로 회수된다. 시스템 에어 컨디셔너의 경우, 공조 부하의 변동이 아주 심하기 때문에 압축기의 액 압축을 방지하기 위한 기액 분리기의 설계가 중요하다. 그래서 장배관시 배관 길이를 고려하여 기액 분리기의 용량을 설계한다. 수열원 멀티 히트펌프에서는 수액기의 역할도 중요하다고 할 수 있겠다. 공랭식 히트펌프의 환-튜브 열교환기와 수열원 멀티 히트펌프의 관형 열교환기의 내부 체적 차이가 아주 크므로, 수열원 히트펌프의 냉방 및 난방 운전시 최적 냉매량 차이가 크게 발생할 수 있다. 이를 보상하기 위해서 최적의 수액기 설계가 필요하다. 또한, 퍼지 제어를 이용한 관형 열교환기 과냉각회로를 적용하여 제품의 신뢰성을 향상시켰다. 응축기나 증발기로 사용되는 관형 열교환기는 관수가 증가할수록 냉매 분배 문제로 인한 능력 감소 현상이 발생할 수 있으므로 이를 고려한 설계가 필요하다. 앞서 언급하였듯이, 실외 온도와 냉각수 온도가 아주 낮거나, 냉각수 순환 유량이 아주 작을 때 관형 열교환기 내에 결빙이 발생할 가능성이 있으므로 이에 대한 안전 제어를 고려하는 것도 중요하다. 물의 특성상, 밀폐계가 형성된 시스템 내에서 물의 온도 변화가 발생할 경우 부피 팽창에 의한 압력 변화가 아주 크게 변하므로 이를 고려하지 않고 설계를 한다면 시스템과 수배관 측에 피해를 줄 수도 있을 것이다. 사이클 제어의 경우, 공랭식 히트 펌프에서 사용되는 인공 지능 FLC (Fuzzy logic control) 시스템 적용으로 냉방 및 난방시 실내외 온도 차이에 따라 신속하게 운전 조건을 맞추고, 목표 값에 안정적으로 도달하여 실내로 토출되는 공기 온도를 안정적으로 제어한다. 또한 인공 지능 제어 알고리즘으로 실외기의 압력과 실내기의 과냉도 및 과열도를 퍼지 제어하여 제품의 내구성 및 효율을 향상시켰다. 첫 분지된 실내기에 마지막 실내기까지 냉매 유량을 분배할 수 있는 냉난방 균일 제어 기술로 실내기 간 성능 편차 없이 우수한 냉난방을 구현한다.

3. 신재생 에너지인 지열 이용 수열원 히트펌프 시스템

수열원 히트 펌프는 수열원을 냉각탑과 보일러 대신 신재생 에너지인 지열로부터 공급받을 수 있다. 지중으로부터 4계절 일정한 열원을 공급받으므로 안정적인 효율적인 냉난방 능력을 제공할 수 있다는 장점이 있다. 이에 자사에서 개발한 수열원 멀티 히트 펌프 12대를 108 RT 용량으로 지열과 연계하여 OO 대학교에 설치하였다. 에너지 관리 공단의 “신재생 에너지 보급 사업”의 지원으로 초기 투자비의 50%를 지원받았다. 지중 열교환기는 수직 밀폐형 타입으로, 직경 150mm, 깊이 175m, 보어홀 개수 24개로 설치되었고 지중 열전도도는 3.08W/m°C이다. 그림 8은 지중 열교환기, 지열 수열원 멀티 히트 펌프 및 실내기, 모니터링 시스템의 설치도를 개략적으로 보여 주고 있다. 실내기에 흡입 및 토출되는 공기의 온도 및 습도, 지열 수열원 멀티 히트 펌프의 소비 전력 및 냉각수 입 출구 온도를 측정하여 실

제 냉방 및 난방 능력을 실시간으로 분석하였다. 여름철 성능의 경우, 2007년 8월16일에 외기 온도가 평균 32.7°C, 지열 히트 펌프의 순환수 입구 온도는 평균 21.5°C로 측정되었다. 평균 냉방 부하는 18.7kW(부하율 64%)이며, 지열 히트 펌프의 평균 COP는 평균 8.2 수준이다. 그리고 중간기 성능의 경우, 2007년 4월16일에 외기 온도는 평균 8.1°C이며, 지열 히트 펌프의 순환수 입구 온도는 평균 17°C로 측정되었고, 평균 난방 부하는 12kW(부하율 약 37% 수준)이며, 지열 히트 펌프의 평균 COP는 5이상으로 측정되어 아주 우수한 성능을 보여 주고 있다. LCC 분석 결과, 지열 히트 펌프는 중앙 공조 방식의 흡수식 냉온수기보다 경제성이 우수하게 나타났으나, 앞으로 지열 히트 펌프의 활발한 보급화를 위해서 초기 투자비 저감 방법, 급탕 연계 및 설비 연동 운전에 대한 운전비 저감 방법에 대한 기술적 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

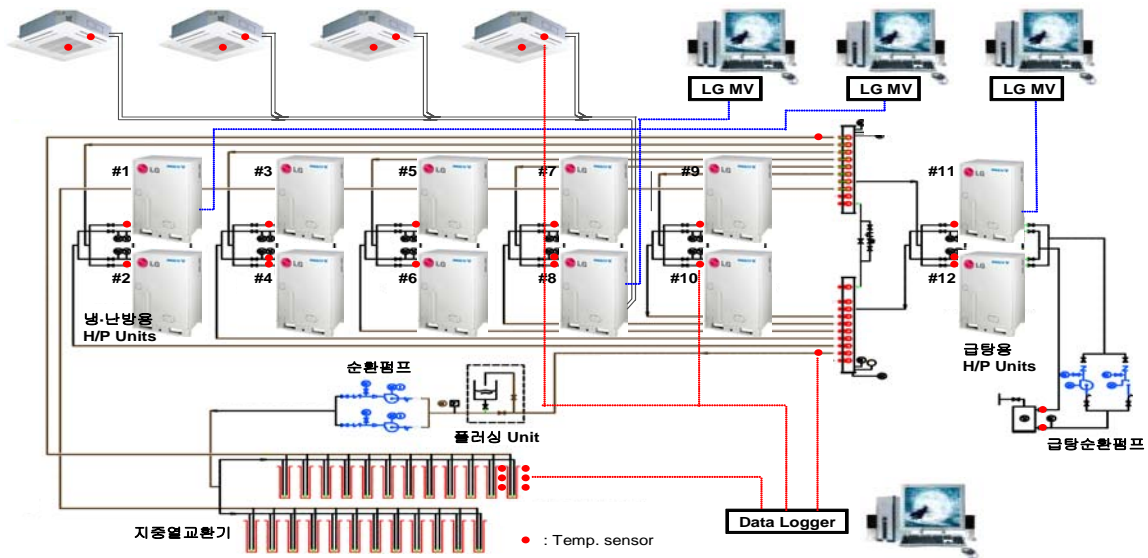


그림 8 Installation scene of the ground source heat pump and the monitoring system

4. 맺음말

수열원 히트펌프 시스템은 냉각탑, 보일러, 지역 난방 등을 이용하거나 지열원 시스템과 연결하여 안정된 냉난방을 구현하는 중앙공조방식과 개별 공조 방식을 혼합한 시스템이기 때문에 초고층, 대형 빌딩 공조 및 기존 중앙 공조 설비를 활용한 리모델링이 필요한 장소, 신재생 에너지 의무화 시설, 혹은 지역에서 우수한 에너지 효율을 제공하는 공조 솔루션이 될 수 있다. 개별 냉난방 제어, 장비 설치 면적 절감, 건물 인테리어 극대화, 중간기 냉각수 간 배열 회수를 통한 에너지 절감, 부분 부하 효율 증대와 같은 수열원 히트 펌프만의 장점을 확대하기 위해서는 고효율, 대용량화에 대한 주요 부품들의 기술 축적 및 신뢰성 확보에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 하며, 특히 냉각탑, 보일러, 펌프 및 수배관과 같은 설비와 연동이 될 수 있는 제어 기술이 정착이 된다면 중앙 공조 시장에서 수열원 히트펌프 시스템의 시장은 빠르게 성장할 것이라고 기대한다.

참고문헌

1. 홍기수, 장세동, 2002, 빌딩 멀티용 에어컨의 요구 조건과 제반 기술, 설비 저널, 제31권 제3호, pp. 23-30.
2. 전홍기, 김인규, 안영산, 진심원, 2007, 빌딩 멀티용 에어컨의 요구 조건과 제반 기술, 설비 저널, 제36권 제2호, pp. 41-48.