

대형 수열원 히트펌프 국내 설치 사례

김진성 | LG전자(주) AE연구소 책임연구원, j.kim@lge.com

국내 기술로 개발된 대형 원심압축식 수열원 히트펌프의 설치사례와 대용량 원심식 히트펌프 개발 과정 및 기술 개요에 대해 소개하고자 한다.

지구의 한정된 자원의 효율적 사용과 지구 환경에 대한 악영향을 최소화하는 문제에 대한 세계적인 공감대가 형성되고 있는 현 시점에서, 에너지 사용 효율의 증대 및 신재생·미사용 에너지 사용 확대, 그리고 온실가스 및 오염물질의 배출 감소에 큰 기여를 할 수 있는 히트펌프 시스템에 대한 관심이 과거 어느 때보다 높다. IEA Heat Pump Centre의 자료에 의하면 현재 설치되어 사용되는 히트펌프 시스템으로 전 세계에서 전체 CO₂ 방출량의 약 1.2% 수준인 연간 약 1억8천만 톤의 CO₂ 감소 효과를 얻고 있으며, 히트펌프의 보급 확대를 통해 전체 CO₂ 배출의 8%를 절감할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 또한, IEA의 CO₂ 배출 시나리오에서 히트펌프 시스템을 통한 건물 냉난방 분야 CO₂ 배출량 감축이 2050년 12.5억 톤에 달할 것으로 예상되는 등, 히트펌프 시스템의 고효율성 및 친환경성이 크게 부각되고 있다.

히트펌프 중 원심식 냉매압축기를 이용한 시스템은 주로 북미와 북유럽을 중심으로 대용량 프로젝트에 적용되어 왔으며, 최근에는 중국에서 수열원 활용시장의 성장에 따라 수요가 크게 증가하고 있다. 국내에서는 반도체 공정 등에서 원심식 냉동기 시스템의 방출열을 이용하는 등 중

저온 시스템은 사용되었으나, 본격적인 가열용 대형 원심식 히트펌프 시스템은 거의 전무하였다. 최근 정부의 친환경·녹색성장 정책 및 글로벌 에너지 절감, 효율향상의 흐름에 힘입어 복합발전소 폐열 활용, 하수처리장 폐수열원 활용 등 대용량 히트펌프 시스템에 대한 관심이 증대되고 실제 적용이 시도되면서 대용량 원심식 히트펌프 시스템에 대한 수요가 발생하고 있다. 특히 2010년에 국내 GS파워의 안양 및 부천 복합발전소에 가열용량 9 Gcal/hr 급의 원심식 히트펌프 시스템이 설치되어, 2010년 동절기부터 성공적으로 운전되고 있다. 이에 GS파워 안양/부천 복합발전소에 설치된 히트펌프 시스템을 중심으로 원심식 중·대용량 수열원 히트펌프 기술 및 국내 개발사례를 소개하고자 한다.

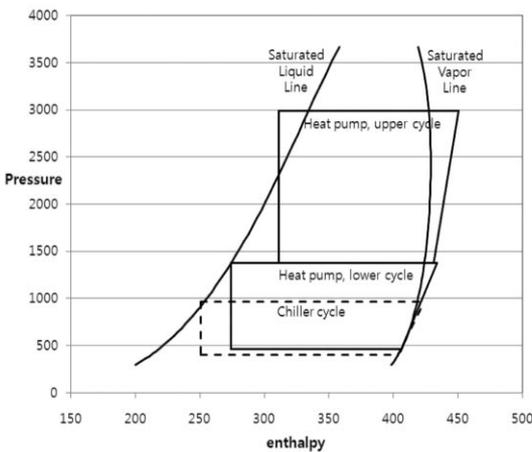
원심식 히트펌프 기술

국내 및 일본에서는 주로 터보 냉동기(turbo chiller), 터보 히트펌프(turbo heat pump)로 많이 알려진 원심압축식 냉동기와 원심압축식 히트펌프는 근본적으로 동일한 작동원리를 가지며, 동일한 구성요소로 이루어져 있다. 두 시스템 모두 원심 압축기를 이용하여 증기 압축식 냉동사이클을 구동하고 상대적으로 저온/저압에서의 작동유체(냉매) 증발을 이용하여 저온부에서 열을 빼앗고, 압축기로 압축된 고압 증기의 응축과정을 통해 상대적 고온부로 열을 방출하여 저온의 열을



고온으로 이동시킨다. 이 때 저온부에서의 열 제거를 이용한 냉열제조가 주목적인 경우 이 장치를 냉동기라고 부르며, 온열제조를 위해 고온부에서의 열 방출을 이용하는 경우에는 히트펌프라 지칭한다. 온열 및 냉열을 동시에 이용하거나, 온열제조와 냉열제조간 시스템 전환이 가능한 경우에도 히트펌프라 부르는 것이 일반적이다. 이와 같이 원심압축식 히트펌프와 냉동기는 동일한 원리로 작동하나 냉동기의 냉수/냉각수 온도 조건과 히트펌프의 열원/온수 온도가 각각 상이하여 증기압축 사이클의 각 동작점의 상태는 크게 다를 수 있다. 그림 1에 R134a를 사용하는 경우에 대하여 열원수 출구온도 10℃, 온수 공급온도 85℃인 히트펌프의 사이클 선도를 KS표준 냉동기 조건(냉수 출구온도 7℃, 냉각수 출구온도 37℃)과 비교하여 나타내었다.

그림 1에서 보는 바와 같이 R134a 냉동기의 경우 시스템 최고 압력이 약 10 bar(a)정도임에 비해 온수 공급온도 85℃인 히트펌프의 시스템의 고압부 압력은 약 30 bar(a)까지 올라가게 된다. 이렇게 시스템 압력이 증가함에 따라 내압 안전 설계에 많은 주의가 필요하다. 또한 응축과정이고온고압에서 이루어짐에 따라 작동유체 단위 질량 당 얻을 수 있는 상변화 잠열이 감소하여 용량당 필요 작동유체 유량이 증가하게 되고 교축 후



[그림 1] 냉동 사이클 및 히트펌프 사이클 비교

의 건도가 높아지는 등 시스템 설계가 까다롭게 된다. 따라서 히트펌프의 경우 냉동기에 비해 과냉기(subcooler)의 성능이 중요하게 된다. 상변화 열전달이 일어나는 응축기에 비해 현열교환이 일어나는 과냉기의 총괄열전달계수는 현격히 낮으므로, 필요한 과냉 열량이 커짐에 따라 과냉기의 부피가 많이 커지게 된다. 그 예로서, 80 ~ 90℃ 정도의 고온을 요구하는 경우 거의 응축기와 유사한 크기의 과냉기를 사용하기도 한다.

압축기의 경우 열원 및 온수 공급온도에 따라 차이는 있으나 대개 히트펌프 구동을 위해서는 요구 양정이 약 3500 m 이상으로 상용 냉동기의 약 2100 m에 비해 상당히 높은 압축양정을 필요로 한다. 여기서 압축기의 양정은 다음 식 1로 계산할 수 있다.

$$H = \frac{1}{g} \int_{in}^{out} v dp \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, v 는 비체적, p 는 압력이며, H 는 길이 단위로 표현된다. 정확한 압축양정을 알기 위해서는 압축기 입구에서 출구까지의 압축과정에 따른 적분이 필요하나, 실제 압축 과정을 알아내기는 불가능에 가까우므로 주로 압축 과정을 폴리트로픽으로 가정하여 계산한 값을 사용하고 있다. 그림 1의 P-h선도에서 보인 히트펌프의 경우 필요 압축양정은 약 4000 m에 달한다. R134a냉매의 경우 일반적으로 단단 원심압축기로 설계 가능한 한계양정은 약 3400 m정도이며, 안정적 운전영역 확보를 위해 동작점을 3000 m 이하에서 설계하는 것이 바람직하다. 따라서 원심압축식 히트펌프 구동을 위해서는 2단 압축기의 적용이 바람직하다. 원심압축기의 공력 설계는 냉동기의 경우와 크게 다를 바 없으나, 작동유체가 고압으로 압축됨에 따라 작동유체의 밀도가 증가하여 동일 크기의 압축기에서 소모되는 동력이 커져 냉동기보다 대형 모터와의 조합이 필요하며 동력 및 추력 증가에 따라 베어링 설계에 주의를 기울여야 한다. 또한 압축기 입출구 압력차가 증가하므로, 압축기 내부 실링

(sealing)에 주의해야 한다.

국내 원심식 냉매압축기 기술

원심식 냉매압축기의 국내 기술은 2000년도 이전까지는 미국 및 일본의 설계를 도입하여 생산하는 수준이었으나, 2000년에 KS조건 냉동기용 양정 2100 m급 R134a 원심 압축기가 국산화된 이래 많은 발전이 이루어졌다. 이후 다양한 조건에 대응하는 1단 원심식 압축기의 개발 및 제품 전개가 국내 기술로 진행되었다. 이러한 압축기 기술 및 이를 바탕으로 한 일반 공조용, 산업용 및 원전 플랜트용 원심 냉동기 기술의 국산화가 이루어져 관련 산업에 많은 발전이 있었다. 압축기 적용 범위의 확대와 함께 압축효율의 향상 및 소음 저감, 압축기 제어성 향상, 부분부하 운전 영역의 확대 등 많은 부분에 대한 연구개발이 계속적으로 진행되고 있다. 특히 압축기의 효율향상에 대한 요구수준이 높아짐에 따라 R134a 냉매용 2단 압축기에 대한 개발도 진행되었고 국내 기술로 제품이 출시되고 있다. 현재 냉동기용 원심식 냉매 압축기의 국내 기술 수준은 해외 선진 업체와 충분히 경쟁력 있는 수준에 도달하였다고 할 수 있다.

냉동기용 원심 압축기와는 달리 히트펌프용 원심식 냉매압축기에 대한 연구개발은 활발히 진행되지 못하였으나, 친환경 녹색성장을 위한 국가 에너지사용 효율의 향상 및 신·재생에너지, 미활용 저온에너지 활용에 대한 요구가 계속 증가하였고, 이에 핵심적인 역할을 수행하는 대용량 고효율 히트펌프에 대한 관심도 커지게 되어 2008년 하반기부터 수열원을 이용한 대용량 히트펌프 연구에 국가 지원이 이루어져 원심식 히트펌프에 대한 본격적인 연구개발이 진행되게 되었다.

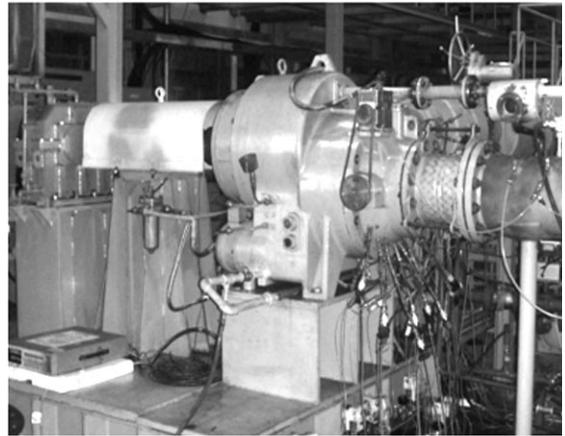
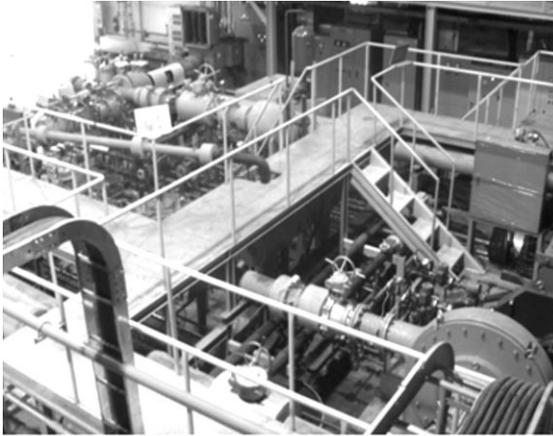
원심식 냉매압축기의 기술개발 및 냉동기/히트펌프 적용을 위해서 크게 원심 압축기 공력 설계 기술, 회전체 설계기술, 압축기 시험/평가 기술, 압축기 시스템 매칭 기술의 확보가 필요하다. 공

력설계에서는 특히 작동유체가 비교적 고밀도이면서 음속이 낮은 특성을 가진 냉매가 사용됨에 따른 고려가 필요하며 냉매 물성치 데이터베이스와 공력설계 툴의 연동이 필수적이다. 컴퓨터의 성능이 지속적으로 발전함에 따라 공력설계시 CFD 툴이 적극 활용되고 있다. 회전체 설계에서는 고속 회전하는 원심 임펠러 및 축의 안정성을 보장하기 위한 회전체 모드 해석 및 베어링 설계, 윤활 시스템 설계 등의 기술이 필요하다. 특히 원심압축기에서 발생할 수 있는 서지(surge) 상태에서도 기계 손상이 발생하지 않도록 설계조건을 설정하는 것이 중요하다. 설계 기술 이외에도 설계된 압축기의 실험을 통한 압축기 성능측정이 매우 중요한 부분으로, 실험에 의한 피드백이 이루어져야 설계 프로세스의 개선이 가능하다. 또한 실험으로 얻어진 압축기데이터를 무차원화 한 압축기의 작동 특성을(주로 압축기 맵, compressor map이라 부름) 보유하고 있어야 압축기와 시스템의 매칭을 성공적으로 수행할 수 있으며 히트펌프와 같이 각 사용처별 열원 온도 및 온수 온도조건이 매우 다양한 경우에 대해서 맞춤형 설계를 할 수 있다. 그림 2에 R134a 냉매 원심압축기 실험설비를 보였다.

냉매 압축기는 공기 압축기와 달리 시스템이 closed-loop를 이루어야 하며 압축기에서 도출된 냉매를 적절한 열교환 및 교축을 통하여 다시 입구 온도/압력 조건에 맞추어 공급을 해주어야 한다. 냉매는 많은 종류의 플라스틱 및 고무 재질에 손상을 줄 수 있으므로 압력 측정용 튜빙, 가시화를 위한 투명 창 등의 재질 선정에도 많은 주의를 기울여야 한다. 그림 2에 보인 설비를 활용하여 1단 압축기의 양정 전개 및 2단 압축기의 개발을 진행할 수 있었으며, 원전공조용 및 히트펌프 등 고향정 특수사양의 압축기에 대한 대응을 할 수 있었다.

국내 대형 원심식 히트펌프 개발 및 설치 사례

앞에서 설명한 1단 및 2단 원심식 냉매압축기 기술 국산화 및 압축기 시험설비를 바탕으로 2008

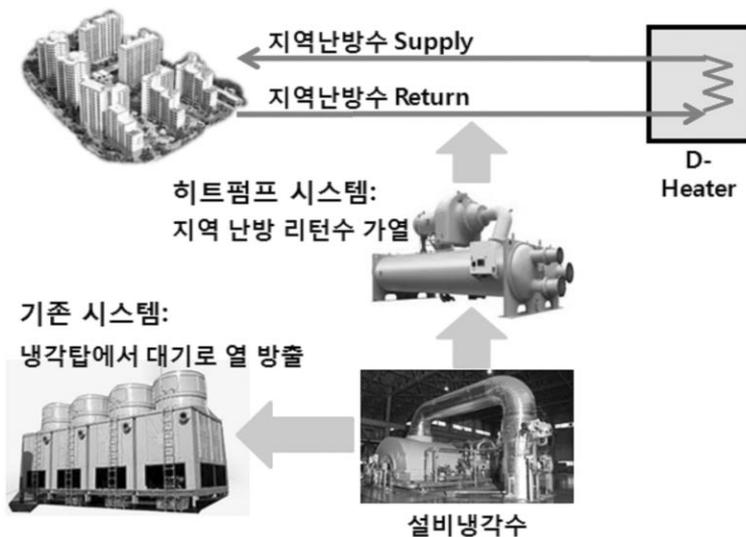


[그림 2] 원심식 냉매압축기 시험 설비

년 이후 한국에너지기술평가원 과제인 “하수 열원을 이용한 2000 RT급 터보열펌프 개발” 과제가 진행됨에 따라 대형 원심식 히트펌프에 대한 본격적인 개발이 진행될 수 있었으며, 나아가 GS파워에서 운영하는 안양 및 부천의 복합발전소에 대용량 원심식 히트펌프를 설치할 수 있는 원동력이 되었다(그림 3 참조).

GS파워 안양/부천 발전소는 발전 및 지역난방

용 열 생산을 수행하는 복합발전소로서, 발전소 설비 냉각수의 온도 유지를 위하여 냉각탑을 사용하고 있었다. 기존 시스템에서 냉각탑을 통해 대기중으로 버려지는 열은 발전설비 정격 운전 시 약 7.3 Gcal/hr에 달하는 양이었다. GS파워에서는 이 버려지는 열을 활용하여 지역난방수를 가열하는 히트펌프 시스템 도입을 결정하고, 기술검토 후 국내기술의 히트펌프 시스템 도입을



[그림 3] 대형 원심압축식 히트펌프 시스템 구성도

결정하였다. 발전소 설비 냉각수는 온도가 약 35℃정도이며, closed-loop 배관 시스템 내를 순환하므로 하천수, 하수 등 타 수열원 대비 수질 및 수온이 매우 우수한 열원이다. 이 열을 이용하여 지역난방 리턴수의 일부를 약 70℃까지 가열하도록 시스템을 설계하였다. 열원의 온도가 비교적 높아, 압축기에 필요한 양정은 3000 m 미만이었으나, 추가적인 효율 향상을 위하여 2단 압축기를 이용한 2단 히트펌프 사이클로 구성하였다.

히트펌프 시스템 설계 시 단일 설계점에서의 성능 이외에 연간 운전형태를 고려하여 다양한 운전조건에서의 운전 안정성 및 성능 최적화가 필요하다. 이를 위하여 히트펌프 시스템 설계팀과 GS파워 발전소 설비 운영팀 간 협력을 통하여 최종 시스템 설계가 이루어졌다.

개발된 히트펌프는 설치 이전에 LG전자의 대형 수열원 히트펌프 시운전 설비에서 실제 운전조건에서의 시운전 시험을 거쳐 성능 및 효율을 검증하였다. 2010년 하반기에 안양 및 부천 복합발전소 각각 열 공급 능력 9 Gcal/hr의 히트펌프 1기씩 설치가 이루어졌으며, 현장 시운전을 거쳐 2010년 동절기부터 상용 운전이 이루어지고 있다. 그림 4에 GS파워 안양 복합발전소에 설치된 히트펌프의 설치 현장 사진을 나타내었다.

GS파워 복합발전소에 설치된 9 Gcal/hr급 히

트펌프 두 대로 연간 17억원의 에너지 절감 효과가 기대되며 삼나무 70만 그루 식목효과에 해당하는 연간 약 9740톤의 CO₂ 저감효과가 예상된다. 특히, 수도권 인구밀집지역에 가까이 자리잡은 복합 발전소에 설치됨으로써 기존 냉각탑으로 대기중에 발산시키던 열을 히트펌프를 활용하여 지역난방수에 공급함으로써 주거지역 환경 개선에도 큰 효과가 기대된다. GS파워 복합발전소 히트펌프 시스템은 국내 기술로 개발되어 실 수요처에 설치되는 대형 원심압축식 히트펌프 첫 제품으로, 향후 국내 히트펌프 보급 및 신재생, 미활용 에너지 이용에 좋은 본보기가 될 것으로 기대한다.

맺음말

신재생 및 미활용에너지 이용의 핵심 기기인 대용량 고효율 원심식 히트펌프는 그 기저 기술은 원심식 냉동기와 동일하나, 고온/고압의 작동조건, 고양정 압축기의 적용, 다양한 열원 조건에 대한 대응 등 냉동기기술을 바탕으로 새롭게 보강해야 할 여러 가지 기술적 과제를 가지고 있다. 국내에서 2000년 이후 국산화된 R134a 냉매 원심압축기 기술을 바탕으로 원심식 히트펌프의 개발이 진행되어 그 가시적인 성과가 나타나고 있다. 실제 하수 또는 하천수, 해수, 지하수 등의



[그림 4] GS파워 복합발전소 설치 현장



열원에 적용 가능한 운전조건으로 85℃, 2000 RT의 열을 공급할 수 있는 원심식 히트펌프가 개발되었으며, 이 기술을 바탕으로 복합발전 플랜트의 설비 냉각수 폐열을 회수하여 지역난방에 활용하는 9 Gcal/hr급 히트펌프 시스템의 상용화가 이루어져 2010년 동절기부터 운전이 되고 있다. 현재 국내 기술수준은 대용량 수열원 원심식 히트펌프 유닛에 대한 핵심적인 기술역량은 갖추었다고 볼 수 있으며, 앞으로 히트펌프의 추가적인 효율 향상, 운전 부하형태에 따른 최적 제어 및 다양한 부하조건에서의 효율 최적화, 온수

공급온도의 향상 등에 대한 연구개발이 계속적으로 이루어져야 할 것이다. 그리고 하천수, 호수 등 지표수를 비롯하여 해수, 지하수, 플랜트 냉각수, 처리/비처리 하수, 오수 등 매우 다양한 형태의 열원 활용과 관련된 1차 열교환기에 대한 연구도 시급한 실정이다. 이와 같은 히트펌프 및 그 응용기술의 발전에 따라 국내 대용량 원심압축식 히트펌프 관련 산업 전반의 발전 및 국가적인 에너지 효율향상이 기대되며, 고 부가가치 시장을 형성하고 있는 해외시장에 대한 공략이 기대된다. ④