



원심식 냉매 압축기 기술 및 수열원 히트펌프 개발

■ 김진성 / LS엠트론 책임연구원 jkim@lsmtron.com

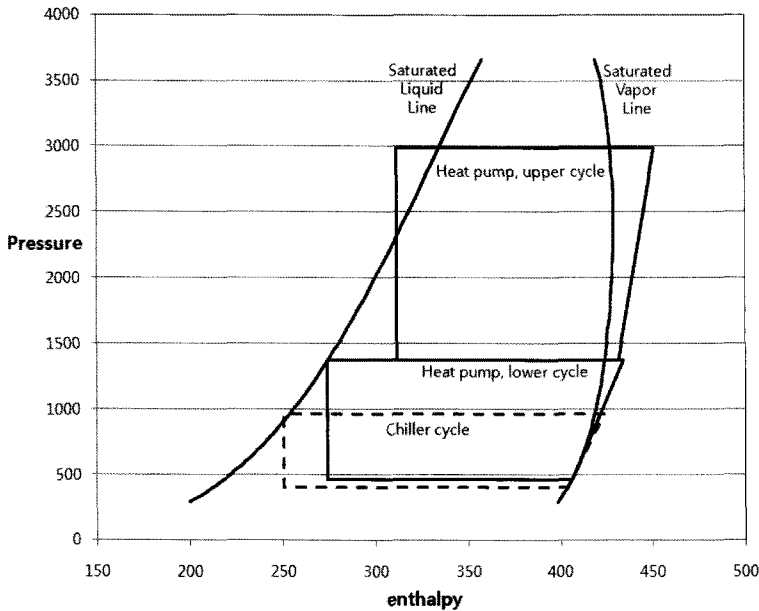
중대용량 신재생 및 미활용 에너지 이용 시스템의 핵심 열원기기로 사용되는 원심압축식 히트펌프 관련 원심압축기 기술 및 국내 개발사례를 소개하고자 한다.

서론

인류의 에너지·자원 과용에 따라 지구 환경의 항상성이 위협받고 있는 현 시점에서 에너지사용 효율의 증대 및 신재생·미사용 에너지 사용 확대, 그리고 온실가스 및 오염물질의 배출 감소 필요성이 중요하게 대두되고 있다. 선진국을 중심으로 이와 관련한 로드맵을 마련하고 기반기술 확보 및 산업

육성에 전력을 다하고 있으며, 특히 기술을 선도하는 몇몇 국가에서는 자국의 관련 에너지·환경규제의 강화와 연계하여 새로운 무역장벽을 형성하고 관련 국제 산업 전반에서의 지배력을 높이고자 하고 있다. 이러한 상황에서 에너지 사용효율의 증대와 신·재생에너지 사용 확대의 큰 축을 담당하는 히트펌프의 활용도가 활발히 증가하고 있다.

히트펌프 중 원심식 냉매압축기를 이용한 시스템은 주로 북미와 북유럽을 중심으로 한 대용량 프로젝트에 적용되어 왔으며 최근에는 중국에서 수열원 활용시장의 폭발적 성장에 따라 수요가 증가하고 있다. 국내에서도 복합발전소 폐열 활용, 하수처리장 폐수열원 활용 등 대용량 히트펌프 시스템에 대



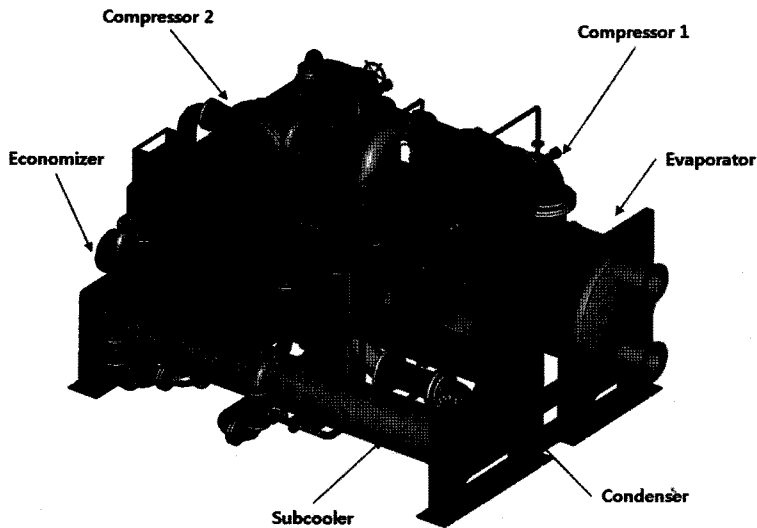
[그림 1] 냉동기와 히트펌프의 사이클 선도 비교

한 관심이 증대되고, 실제 적용이 시도되면서 대용량 원심식 히트펌프 시스템에 대한 수요가 발생하고 있다. 이에 원심압축식 히트펌프의 핵심기술인 원심식 냉매압축기 기술을 중심으로 원심압축식 히트펌프 기술 및 국내 개발사례를 소개하고자 한다.

원심압축식 히트펌프 기술 개요

국내 및 일본에서는 주로 터보 냉동기(turbo chiller), 터보 히트펌프(turbo heat pump)로 많이 알려진 원심압축식 냉동기와 원심압축식 히트펌프는 그 구성요소 및 작동원리가 근본적으로 동일하다. 두 시스템 모두 원심 압축기를 이용하여 증기압축식 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. 이와 같이 원심압축식 히트펌프와 냉동기는 동일한 원리로 작동하나 냉동기의 냉수/냉각수 온도 조건과 히트펌프의 열원/온수 온도가 각각 상이하여 증기압축 사이클의 각 동작점이 다르다. 그림 1에 R134a를 사용한 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 시스템 압력은 약 30 bar(a)까지 올라가게 된다. 이렇게 시스템 압력이 증가함에 따라 내압 안전설계에 많은 주의가 필요하다. 또한 응축과정이 고온고압에서 이루어짐에 따라 작동유체 단위 질량 당 얻을 수 있는 상변화 잠열이 감소하여 용량 당 필요 작동유체 유량이 증가하게 되고 교축 후의 건도가 높지는 등 시스템 설계가 까다롭게 된다. 따라서 히트펌프의 경우 냉동기에 비해 과냉기(subcooler)의 성능이 중요하게 되고, 80~90℃ 정도의 고온을 요구하는 경우 거의 응축기와 유사한 크기의 subcooler를 사용하는 경



[그림 2] 2000RT급 히트펌프 3-D 모델



우도 있다(그림 2).

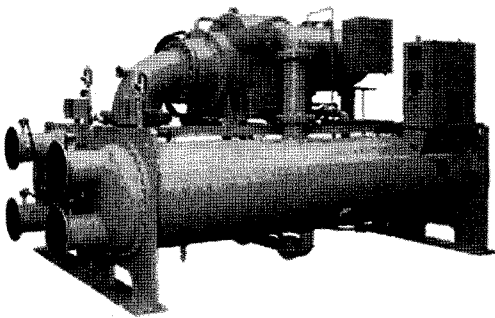
압축기의 경우 열원 및 온수 공급온도에 따라 차이는 있으나 대개 히트펌프 구동을 위해서는 요구 양정이 약 3500 m 이상으로 상용 냉동기의 약 2100 m에 비해 상당히 높은 압축양정을 필요로 한다. 그림 1에서 보인 히트펌프의 경우 필요 압축양정은 약 4000 m에 달한다. R134a냉매의 경우 일반적으로 단단 원심압축기로 설계 가능한 한계 양정은 약 3400 m정도이며, 안정적 운전영역 확보를 위해 동작점을 3000 m 이하에서 설계하는 것이 바람직하다. 따라서 원심압축식 히트펌프 구동을 위해서는 2단 압축기의 적용이 필요하다. 약 4000 m의 양정이 요구되는 히트펌프의 경우 1, 2단에 양정을 균등 분배하여 필요시 1, 2단 압축기 병렬 운전으로 냉동기로 운전할 수 있도록 설계하기도 한다. 원심압축기의 공력 설계는 냉동기의 경우와 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 주의할 기을여야 한다.

국내 원심식 냉매압축기 기술 개발

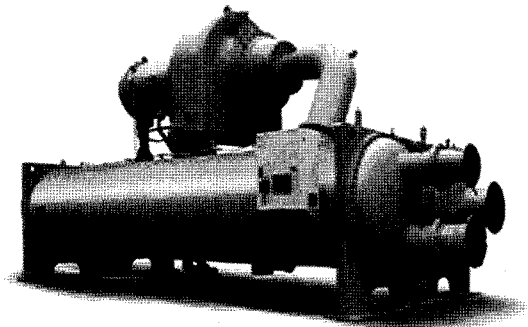
원심식 냉매압축기의 국내 기술은 2000년도 이전까지는 미국 및 일본의 설계를 도입하여 생산하는 수준이었으나, 2000년에 KS조건 냉동기용 양정

2100 m급 R134a 원심 압축기가 국산화된 이래 많은 발전이 이루어졌다. 이후 KS표준 냉동기 조건인 냉각수 출구 온도 37℃에서 냉수 7℃를 공급하는 양정 2100 m급 1단 원심 압축기를 기본으로 냉수 5℃용 양정 2250 m 압축기, 반도체 설비 프로세스 온도제어용 양정 1800 m압축기, 중동지역의 지역 냉방용 양정 2550 m 압축기, 그리고 원전 공조용 양정 2900 m 압축기까지 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 운전영역의 확대 등 많은 부분에 대한 연구개발이 계속적으로 진행되고 있다. 특히 압축기의 효율향상에 대한 요구 수준이 높아짐에 따라 R134a 냉매용 2단 압축기에 대한 개발도 진행 되었고 국내 기술로 제품이 출시되고 있다. 2010년 현재 냉동기용 원심식 냉매 압축기의 단독 특성으로 비교할 경우 국내 기술 수준은 해외 선진업체와 충분히 경쟁력 있는 수준에 도달하였다고 할 수 있다. 그림 3에 국내 기술로 개발된 1단 및 2단 원심식 냉동기의 예를 보였다.

냉동기용 원심 압축기와는 달리 히트펌프용 원심식 냉매압축기에 대한 연구개발은 활발히 진행되지 못하였다. 반도체 공정 등에 국내 제조사의 원심식 히트펌프 보급 실적이 있으나 공급 온수의 온도가



1단 압축 원심 냉동기



2단 압축 원심 냉동기

[그림 3] 1단 및 2단 원심식 냉동기

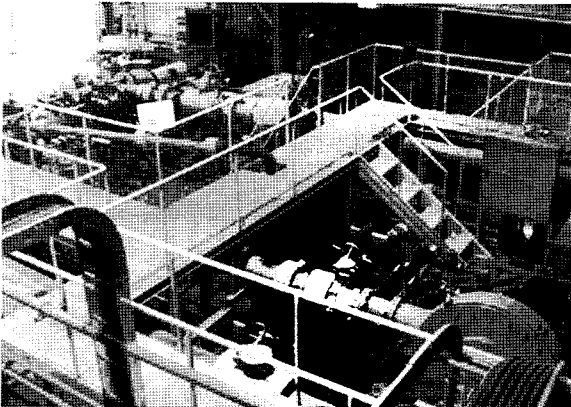
냉동기 조건과 비슷하여 기존 냉동기용 압축기의 약간의 수정으로 대응할 수 있는 수준이었으며 Friotherm, York 등 해외 업체와 같은 본격적인 히트펌프의 개발은 이루어지지 못하고 있었다. 그러던 중 친환경 녹색성장을 위한 국가 에너지사용 효율의 향상 및 신·재생에너지, 미활용 저온에너지 활용에 대한 요구가 계속 증가하였고, 이에 핵심적인 역할을 수행하는 대용량 고효율 히트펌프에 대한 관심도 커지게 되어 2008년 하반기부터 수열원을 이용한 대용량 히트펌프 연구에 국가 지원이 이루어져 원심식 히트펌프에 대한 본격적인 연구개발이 진행되게 되었다.

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

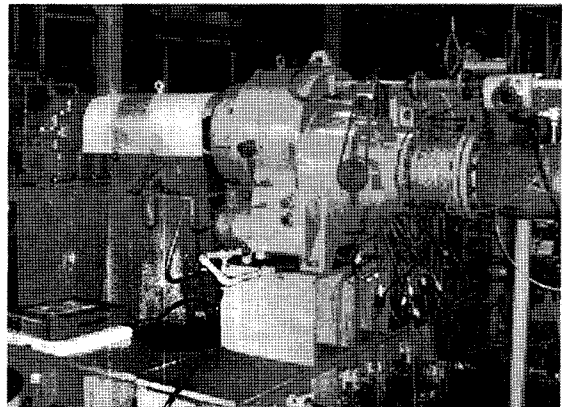
이 필요하다. 특히 원심압축기에서 발생할 수 있는 서지(surge) 상태에서도 기계 손상이 발생하지 않도록 설계조건을 설정하는 것이 중요하다. 설계 기술 이외에도 설계된 압축기의 실험을 통한 압축기 성능측정이 매우 중요한 부분으로, 실험에 의한 피드백이 이루어져야 설계 프로세스의 개선이 가능하다. 또한 실험으로 얻어진 압축기데이터를 무차원화 한 압축기의 작동 특성(주로 압축기 맵 - compressor map - 이라 부름) 보유하고 있어야 압축기와 시스템의 매칭을 성공적으로 수행할 수 있으며 히트펌프와 같이 각 사용처별 열원 온도 및 온수 온도조건이 매우 다양한 경우에 대해서 맞춤설계를 할 수 있다. 그림 4에 R134a 냉매 원심압축기 실험설비를 보였다.

그림 4에 나타난 설비는 약 400 RT급 냉동기용 원심 압축기를 실험할 수 있는 설비로 1단 또는 2단 압축기를 시험할 수 있다. 냉매 압축기는 공기 압축기와 달리 밀폐 시스템을 이루어야 하며 여러 압축기 공력부품을 시험하기 위한 분해/조립 마다 진공배기 및 기밀 검사가 필요하다. 시스템이 closed-loop를 이루어야 하며 압축기에서 토출된 냉매를 적절한 열교환 및 교축을 통하여 다시 입구 온도/압력 조건에 맞추어 공급을 해주어야 한다. 그리고 압축기 구동 토크 측정을 위해 구동 축을 개방함에 따

Compressor2



Compressor1



Compressor2, detail

[그림 4] 에너지 리사이클링



라 mechanical seal을 이용한 밀폐가 필요하다. 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 4에 보인 설비를 활용하여 1단 압축기의 양정 전개 및 2단 압축기의 개발을 진행할 수 있었으며, 원전공조용 및 히트펌프 등 고양정 특수사양의 압축기에 대한 대응을 할 수 있었다.

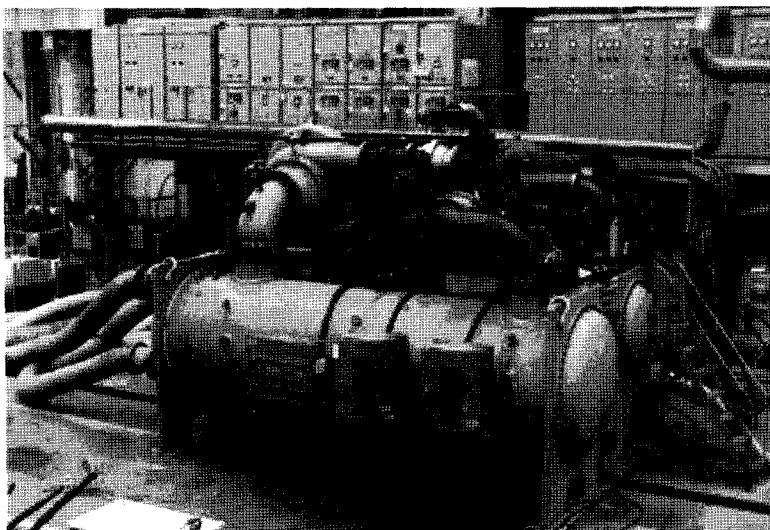
원심식 히트펌프 개발 사례

앞에서 설명한 1단 및 2단 원심식 냉매압축기 기술 국산화 및 압축기 시험설비를 바탕으로 2008년 이후 원심식 히트펌프에 대한 연구를 수행하여 2010년 현재 약10℃의 하수열원을 이용하여 85℃의 온수를 공급하는 2000 RT급 원심식 히트펌프의 샘플이 개발되었고 성능 및 신뢰성 시험이 진행되고 있다. 시스템의 난방 성능계수는 약 3.0이다. 그림 2에서 보인 3D 모델이 이 2000 RT급 히트펌프로, 그림 5에 실제 샘플의 성능시험 장면을 보였다.

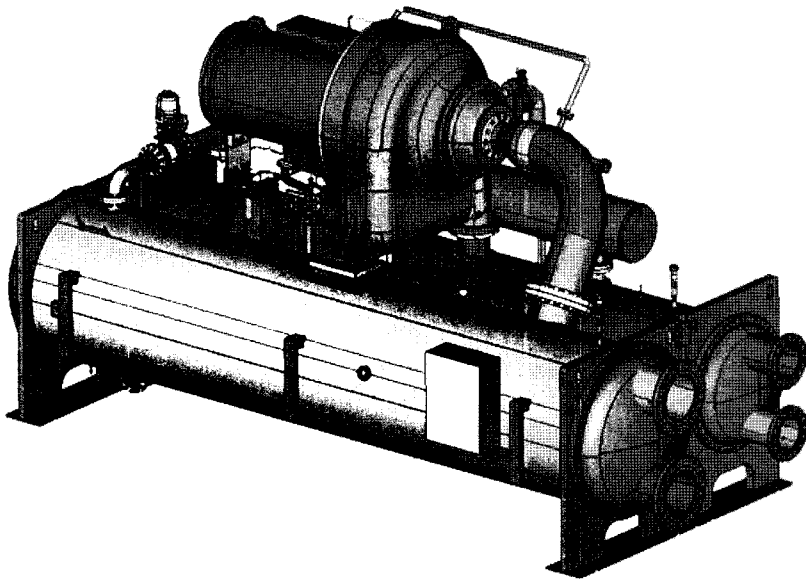
기존 냉동기 시험설비에서는 냉동기의 냉수와 냉각수를 섞어 임의의 부하를 형성하고 모터에 입력된 에너지는 냉각수를 통해 냉각탑으로 대기로 방

출하는 구성이었으나, 히트펌프의 경우 온수측 온도가 85℃로 일반 사양의 냉각탑에서는 사용할 수 없는 온도가 되어 중간 열교환기를 추가하여 히트펌프 운전에 대응하였다. 이 2000 RT급 히트펌프는 1단 및 2단 압축기가 별도의 프레임으로 나누어져 별도의 모터로 구동되며, 동절기 히트펌프 운전시에는 2단 압축 사이클 히트펌프로 운전하고 하절기에는 자동밸브들로 배관 연결상태를 변경하여 두 압축기를 병렬로 냉동기로 운전이 가능하다.

2000 RT급 원심식 히트펌프 연구개발에서 얻은 경험을 바탕으로 국내 복합발전 플랜트의 설비 냉각 부하를 열원으로 하여 지역난방용 온수에 열을 공급하는 3000 RT급 원심식 히트펌프에 대한 수주가 2009년에 이루어져 개발이 진행되고 있으며 2010년 동절기부터 수도권의 복합발전 플랜트 두 곳에서 운전될 예정이다. 이 3000 RT급 히트펌프의 경우 냉방 운전이 필요치 않고 열원의 온도가 약 35℃ 수준으로 높아, 앞서 설명한 2000 RT 히트펌프와 달리 단일 프레임의 2단 압축기로 구성하였다(그림 6). 이 3000 RT급 히트펌프 단 두 대로 연간 17억원의 에너지 절감 효과가 기대되며 삼나무 70만그루 식목효과에 해당하는 연간 약 9740톤의 CO₂ 저감효과가 예상된다.



[그림 5] 2000 RT급 히트펌프 시운전



[그림 6] 복합발전소 폐열 회수용 3000 RT급 히트펌프 3-D 모델링

맺음말

신재생 및 미활용 에너지 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 열원에 적용 가능한 운전 조건으로 85℃, 2000 RT의 열을 공급할 수 있는 원심식 히트펌프가 개발 되었으며, 복합발전 플랜트의 폐열을 회수하여 지역난방에 활용하는 3000 RT급 히트펌프는 실제 수주가 이루어져 2010년 연내 운전이 시작될 예정이다. 이와같은 대용량 고효율 원심식 히트펌프의 국산화에 따라 히트펌프 시스템을 응용 관련 산업 전반의 발전이 기대된다. ●