

김민수 서울대학교 기계항공공학부 교수 | e-mail : minskim@snu.ac.kr

이 글에서는 열에너지 네트워크의 산업 부문으로 최근 주목받는 스팀히트펌프 기술을 소개하고자 한다.

스팀히트펌프 소개

히트펌프란 일반적으로 에어컨과 같이 냉동사이클을 이용하여 냉방 및 난방을 할 수 있는 장치를 말하는데 여기서는 미활용 온수를 이용하여 증기를 생산하는 스팀히트펌프를 소개하고자 한다. 먼저 히트펌프의 기본 구성요소는 압축기, 열교환기(응축기, 증발기) 및 팽창기이고 시스템 내부는 열교환매체인 냉매로 채워진다. 작동원리는 압축기에서 기체상태의 저온·저압의 냉매를 압축시켜 고온·고압으로 만들고 응축기를 통해 외부로 열을 방출한다. 이후 응축된 액상 냉매를 팽창시켜 압력과 온도를 낮추고 증발기에서 외부로부터 열을 흡수하여 다시 기체상태로 압축기에 공급함으로써 사이클을 형성한다. 히트펌프의 장점은 원하는 상대적 고온의 열에너지를 공급하기 위해 상대적으로 온도가 낮은 열원(공기열, 수열, 지열, 태양열, 하수열 등)을 이용할 수 있다는 점이다.

산업공정에서 요구되는 열원은 스팀의 형태로 공급되는 경우가 많다. 스팀은 식품, 제지, 화학, 석유정제, 금속가공, 시멘트, 전기제품, 플라스틱 및 고무 제품, 유리제품, 섬유, 수소개질 등 다양한 영역에서 이

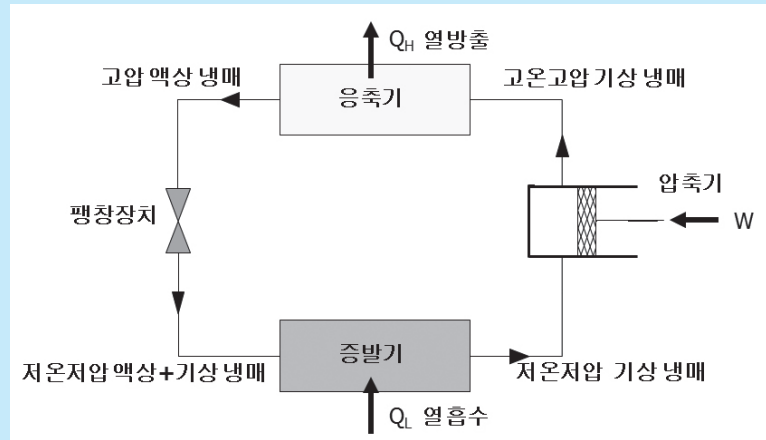


그림 1 히트펌프의 기본 원리

용되고 있다. 이처럼 스팀을 많이 이용하는 이유는 스팀의 잠열을 이용할 수 있기 때문에 공정 중에 열원의 온도를 안정적으로 확보할 수 있고 증기가 응축될 때의 잠열을 이용할 수 있기 때문이다. 다양한 영역에서 스팀이 사용되에도 불구하고 일반적으로 산업현장에서는 타 현장과 열관리를 연계하지 않고 있기 때문에 이용가치가 충분히 있는 고온의 온수를 버리기도 한다. 이 때문에 다양한 온도영역의 온수를 의미있게 이용할 수 있도록 산업용 열네트워크를 구축하는 것이 중요하며, 이는 에너지 저감 및 CO₂ 배출감소에 크게 기여할 것으로 예상된다. 산업용 열네트워크를 구축

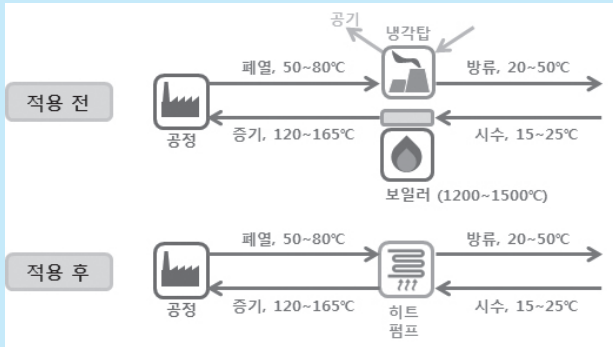


그림 2 보일러를 이용한 스팀공급과 히트펌프를 이용한 스팀공급

하기 위해서는 다양한 온도의 온수를 이용할 수 있는 히트펌프가 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 특히 산업 공정 이후에 생기는 다량의 고온수는 공정 중 생기는 이물질 등이 섞여 직접적인 이용가치가 떨어지지만 히트펌프의 열원으로 이용하게 되면 간접적으로 열공급을 할 수 있게 된다. 스팀히트펌프는 이와 같은 공정에서 나오는 온수를 열원으로 활용하여 스팀을 생산하는 장치이다. 스팀히트펌프를 이용하면 기존의 보일러를 이용하여 스팀을 만들고 공정 후 폐기되는 고온수를 냉각탑에서 냉각한 후에 방류하는 시스템을 히트펌프 시스템 하나로 단순화시키고 이를 통해 에너지 절감효과를 기대할 수 있다.

스팀히트펌프의 원리

스팀히트펌프를 가장 먼저 상용화한 곳은 일본의 고베제강이다. 고베제강의 스팀히트펌프 모델은 기존의 압축기, 응축기, 팽창기, 증발기로 이루어진 히트펌프에 플래시 탱크가 더해진 형태이다. 플래시 탱크는 응축기에서 열교환되어 나온 온수가 감압되면서 생기는 온수와 증기의 혼합된 형태를 분리하여 저장하는 역할을 하게 된다. 이는 플래시 탱크 없이 히트펌프만으로 구동하였을 때 응축기 출구에서 스팀만 나오도록 제어하는 것이 어렵기 때문이다. 분리된 온수는 다시 응축기에서 열교환을 하고 생산된 증기

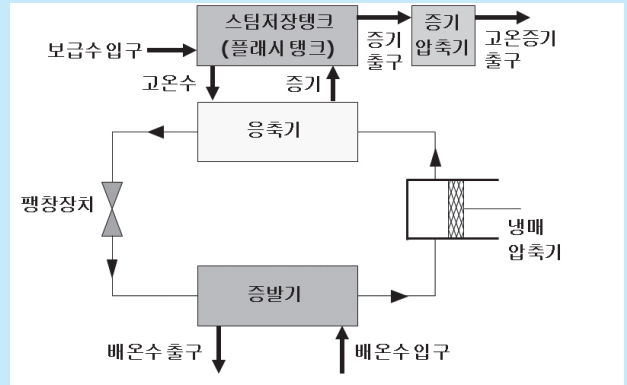


그림 3 일본 고베제강의 스팀히트펌프 사이클 개략도

는 수요처로 공급되며 사용된 증기의 양 만큼 시수로 채우게 된다. 이러한 과정을 통해 얻을 수 있는 증기의 온도는 약 100~120°C 정도인데 더 높은 온도의 증기를 얻기 위해서는 증기 압축기로 재가압(MVR: Mechanical Vapor Recompression)을 하기도 한다. 스팀히트펌프는 우리가 생각하는 일반 공기열원이나 수열원으로 구동하게 되면 열원온도(약 25°C)와 목표 온도(120°C)의 차이가 크기 때문에 효율이 제법 낮다. 따라서 50~60°C 또는 그 이상의 폐열원을 이용하는 것이 필수적이고 열원의 온도 및 양이 증가할수록 적은 압축일로 많은 스팀을 생산할 수 있다.

해외 개발 시스템의 특징

2012년, 일본의 고베제강(KOBELCO)과 일본전력 중앙연구소(CRIEPI)가 공동 개발한 ‘스팀 생산 히트펌프(SGH)’가 120°C, 165°C의 증기 생산을 목표로 최초로 상용화된 바 있다. CRIEPI는 일본의 전력공사와 같은 기관으로, 해당 연구에 도쿄전력, 추부전력, 간사이전력이 참가하였다. SGH 모델은 도쿄, 나고야, 오사카 3개 지구에서 시범 운영한 결과, 기존 가스보일러 대비 에너지 소비량의 59.9%를 절감, 이산화탄소 생성량의 73.4%를 감축, 운전비용의 55.1%를 절감한 바 있다.



그림 4 스팀히트펌프 시스템 사례 : (a) 일본 KOBELCO ; (b) 프랑스 EDF

현재 일본 내 미쯔비시(MHI), 마예카와(Mayekawa), 후지(Fuji) 등도 시제품을 선보인 바 있다. 한편으로 일본 경제산업성 산하의 신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)에서도, 2010~2014년 스팀히트펌프 연구과제를 진행한 바 있다.

같은 해, 프랑스의 전력공사(EDF) 또한 주도적으로 ‘Very high temperature heat pump’라는 명칭의 시제품을 선보인 바 있다. Arkema, CIAT, Clauger(프랑스), Danfoss(덴마크) 등의 회사가 참여한 프로젝트로, 일본의 SGH 모델의 타겟 온도와 달리 140℃의 스팀을 만드는 것을 목표로 하고 있다.

국내 연구개발 동향

현재 국내에서는 스팀히트펌프 관련 연구과제들이 다양하게 진행되고 있다. ‘건물용/산업용 열에너지 네트워크 적용 단위 시스템 개발’과 ‘산업공정용 120℃ 이상 스팀공급이 가능한 300kW급 고온토출형 히트펌프 개발’을 말하며, 정부출연연구소는 압축기와 열교환기 등 구성요소에 대한 연구를, 기업에서는 실증 연구를, 대학에서는 해석 연구 및 실험 연구를 진행하고 있다.

한국에너지기술연구원은 고온고압 시스템을 위한



그림 5 국내 대학에 설치된 스팀히트펌프 실험장치

압축기, 오일, 열교환기의 신뢰성 설계를 연구하고 있다. 최근엔 내부열교환기가 적용된 시스템의 성능 개선을 연구한 바 있다. 한국기계연구원은 고온에서 2상 냉매와 2상 물 사이의 열전달 특성연구와, 스팀 저장 탱크의 기본 설계를 연구하고 있다. 한국생산기술연구원의 경우, 사이클의 해석연구를 통해 주요 변수의 영향을 확인하고 있다. 참여 기업들은 다양한 실증 시스템을 제작하여 기본 연구 결과를 토대로 응용 방안을 모색하고 있다.

국내 대학의 경우 스팀히트펌프 사이클에 대한 해석을 진행하고 있다. 고온부 열원과 저온부 열원의 온도 차이가 크고, R245fa 냉매의 포화증기곡선 특성상 많은 과열도를 필요로 하는 스팀히트펌프 사이클을 보완하기 위하여, 캐스케이드 사이클, 증기인젝션 사

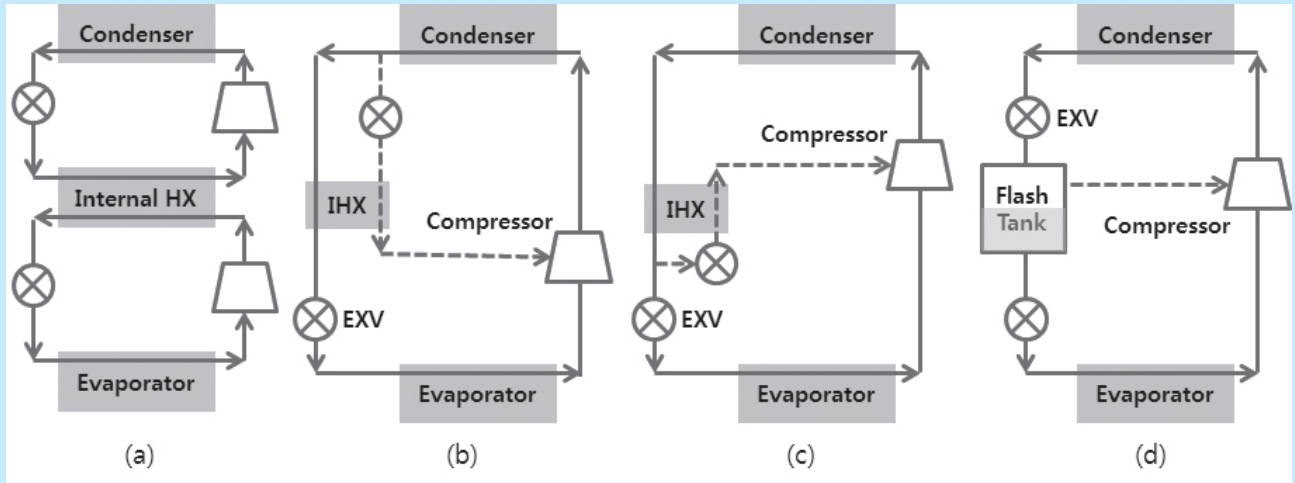


그림 6 성능 향상을 위한 다양한 스팀히트펌프 : (a) 캐스케이드 사이클 ; (b) 증기인젝션 사이클 ; (c) 후단팽창 증기인젝션 사이클 ; (d) 플래시탱크 증기인젝션 사이클

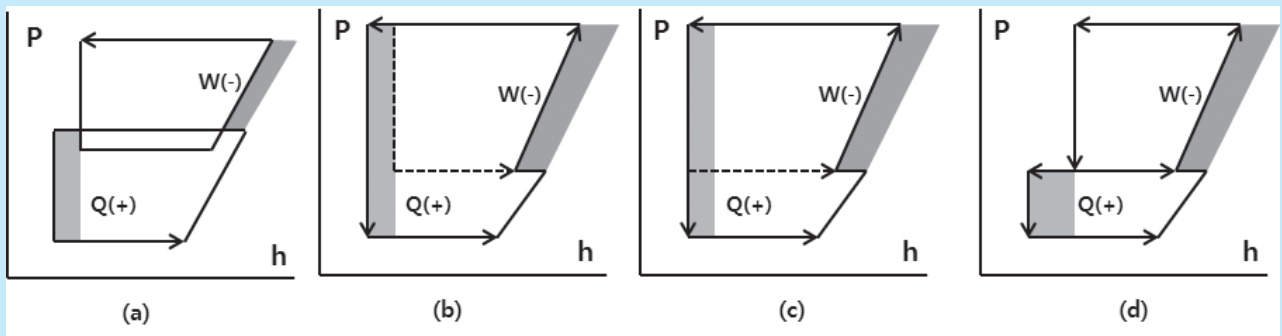


그림 7 압력-엔탈피 선도에 나타난 다양한 스팀히트펌프 : (a) 캐스케이드 사이클 ; (b) 증기인젝션 사이클 ; (c) 후단팽창 증기인젝션 사이클 ; (d) 플래시탱크 증기인젝션 사이클

이클 등을 제시하고 해석 연구를 진행하고 있으며, 스팀히트펌프 실험장치를 구축하여 성능을 실험하고 있다.

스팀히트펌프 시스템의 성능 향상

(1) 기본 스팀히트펌프 사이클의 개선

기존에 상용화된 모델의 경우 기본 히트펌프 사이클에 증기인젝션과, 재열기가 더해진 형태이다. 증기인젝션 사이클이란, 응축기를 통과한 일부 냉매 흐름을 증발기를 거치지 않고 압축기로 되돌리는 사이클

을 뜻한다. 이를 통해 압축 과정을 2단으로 나누어, 사이클의 효율(성능계수)을 높이고 열용량을 증대시키는 효과를 얻을 수 있다. 종류로는 내부열교환기를 이용한 증기인젝션, 플래시탱크를 둔 증기인젝션 등이 있다. 팽창밸브를 내부열교환기의 전단과 후단에 놓는 것 또한 다른 성능 특성을 보여준다.

다른 방식으로는 캐스케이드 사이클이 있다. 캐스케이드 사이클이란, 다수의 히트펌프 사이클을 직렬로 두어, 한 사이클의 증발기가 곧 다른 사이클의 응축기와 열교환하도록 하는 것이다. 이 또한 압축일을 줄여주고, 열용량을 늘리는 효과를 얻을 수 있다. 하

지만 이와 같은 복합 사이클들은 증기를 생산하는 고온 범위에서의 연구는 아직 초기 단계에 있어, 해석 및 실험 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

(2) 스팀히트펌프에 사용되는 냉매의 선정

기존의 히트펌프 사이클은 공기열원을 이용하여 고온의 온수를 만들기 위해 HFC-134a 냉매 등을 사용해 왔으나, 스팀히트펌프는 120℃의 스팀을 만들기 위해 해당 온도범위에 적절한 HFC-245fa 냉매가 사용된다. HFC-245fa 냉매는 저온 영역에서 동력 발생을 위한 유기랭킨사이클(ORC)의 냉매로도 최근 주목받고 있다. 또한, HFC-245fa의 대체 냉매로서, 대기 중에서 분해가 쉬운 HFO-1234ze(Z)의 도입도 고려되고 있다.

(3) 스팀히트펌프 구성요소

해당 온도범위에서의 압축기와 열교환기 등 냉매 사이클의 구성요소들에 대한 연구는 세계적으로 초기 단계에 있어, 다양한 연구가 필요한 실정이다. 냉매 오일의 사용이 필수적인 스크류, 스크롤 등 용적형 압축기가 아닌 터보용 압축기가 주목받고 있으며, 스팀 저장탱크(Flash Tank, Phase Separator)에 대한 연구도 필요하다. 스팀히트펌프 시스템에서의 성능에 영향을 주는 주요 변수들로는 냉매량, 압축기 속도, 열원 온도 등이 제시된 바 있다.

장치가 바로 스팀히트펌프이다. 스팀히트펌프를 이용하면 기존의 보일러를 이용하는 것에 비교하여 열에너지의 이용 효율이 좋아지고, 시스템도 단순하게 만들 수 있다.

스팀히트펌프는 세계 몇 나라에서 선제적으로 제작하여 시장을 열어가고 있다. 우리나라의 경우에도 국책 연구과제를 통하여 고난도의 기술을 개발하고 있으며 산학연이 연계하여 시제품 개발 및 실증단계까지 연구를 진행하고 있다. 다양한 열원을 이용할 수도 있고, 생산되는 스팀의 온도도 필요에 따라 변화시킬 수 있는 유용한 기기의 개발이 요구되며, 이에 따른 냉매압축기의 개발이 제일 핵심적인 요소이다. 이러한 스팀히트펌프 기술이 완성되면, 주로 고온 영역에서의 고온수 제조, 스팀 제조 등에 다양하게 응용될 수 있으며, 더 나아가서는 거리가 떨어져 있는 공장, 단지, 지역 사이에서 서로 다른 온도의 열을 주고 받을 수 있는 열에너지네트워크의 구성이 가능할 뿐만 아니라, 이를 통해 열에너지를 보다 합리적으로 이용할 수 있는 시대가 도래할 것이다.

맺음말

산업공정에서 요구되는 열원으로서 스팀이 매우 좋고, 또한 공정에서 상대적으로 온도가 낮은 온수가 다량으로 배출되는 경우가 많다. 스팀이 좋은 이유는 스팀의 잠열이 크고, 스팀으로부터 열을 공급받는 상황에서 스팀의 (상변화) 온도가 거의 변하지 않기 때문에 온도의 안정성을 확보할 수 있기 때문이다. 이러한 미활용 온수를 이용하여 다시 스팀을 만들 수 있는