

산업폐열구동 하이브리드 히트펌프 시스템

(Hybrid Heat Pump System by using Industrial Waste Heat)

박성룡 / 총무이사

한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부 (srpark@kier.re.kr)

서론

요즘 산업 및 에너지와 관련된 최대의 화두는 “저탄소, 녹색성장”이라고 할 수 있다. 현 정부에서도 범부처적으로 이와 관련된 정책 및 기술개발 등이 동시 다발적으로 수립되고 추진되고 있으며, 진행될 예정이다. 저탄소 녹색성장에 기여할 중요한 핵심기술중 하나로 히트펌프기술을 들 수 있다. 히트펌프 기술은 단일기술로는 CO₂ 절감량이 매우 크며, 사용 열원이 대기열원(공기열, 지열, 수열 등) 및 미활용 에너지열원(하천수, 하수처리수, 폐수열원 등)에 이르기까지 모두 재생 가능한 에너지를 사용하고 있어서 이미 일본, 미국 등은 풍력, 태양열과 같이 히트펌프를 재생에너지로 구분하고 있는 상황이며, 특히 일본의 경우는 자국의 이산화탄소 발생량의 10%를 히트펌프로 절감하겠다는 목표를 세우고 추진 중에 있다. 최근에는 유럽의회도 지난 2008년 12월에 SET-Plan 2020 계획을 법안으로 통과시켜 히트펌프를 재생에너지로 간주하기에 이르렀고, 2020년까지 20%까지 CO₂ 절감과 20%의 재생에너지사용을 늘리려는 계획에 히트펌프가 큰 기여를 해 줄 것으로 여겨지고 있다.

히트펌프는 사용가능한 열을 온도가 낮은 곳에서 높은 곳으로 끌어올리는 장치로, 지금까지는 사용하지 못하던 대기열원 및 미활용에너지원인 대기, 강, 지열, 배열을 난방 등에 이용할 수 있게 되었고, 또

한 실내의 열을 밖으로 빼냄으로써 냉방도 가능하게 되었다. 히트펌프 시스템을 구성하고 있는 장치는 작동유체인 냉매를 압축시키는 압축기, 증발기, 응축기 등으로 구성된다. 보통 압축기를 구동시키기 위한 최저의 구동전력의 3배 ~ 6배까지 정도의 열 에너지를 얻을 수 있어 난방의 대표적인 기기인 보일러와 비교할 때에도 에너지 절약효과가 있고 또한 연소시 생성물이 나오지 않는 깨끗한 장치로서의 이점도 갖추고 있기 때문에 히트펌프는 매우 효율적인 기기이면서, 국가가 추진하고자하는 저탄소에 적합한 기기로 냉방, 난방 급탕 등에 이용되어 왔다(그림 1 참조).

히트펌프는 또한 냉매, 구동원, 열원 등의 조합을 통하여서도 다양하면서도 효율적인 시스템의 적용 및 활용이 가능하여 가정용, 상업용, 산업용에 이르기 까지 넓으며, 지역냉난방분야에서는 축열장치와 연계하여 중소규모의 빌딩에 도입하는 것도 가능하다.

작동냉매에 있어서는 지금까지 CFC(크로로플루오르 카본), HCFC(하이드로 크로로플루오르 카본) 등이었지만, 오존층을 보호하기 위해 2020년부터는 사실상 사용이 금지될 예정이고, 현재 사용중에 있는 HFC(하이드로플루오르 카본)도 오존층파괴 효과는 없지만 지구온난화의 원인이 되기 때문에 암모니아, 프로판 부탄 등 자연냉매에 대한 대책이 필요하다. 이와 함께 고효율, 고온, 용량의 다양화 그리고 제작



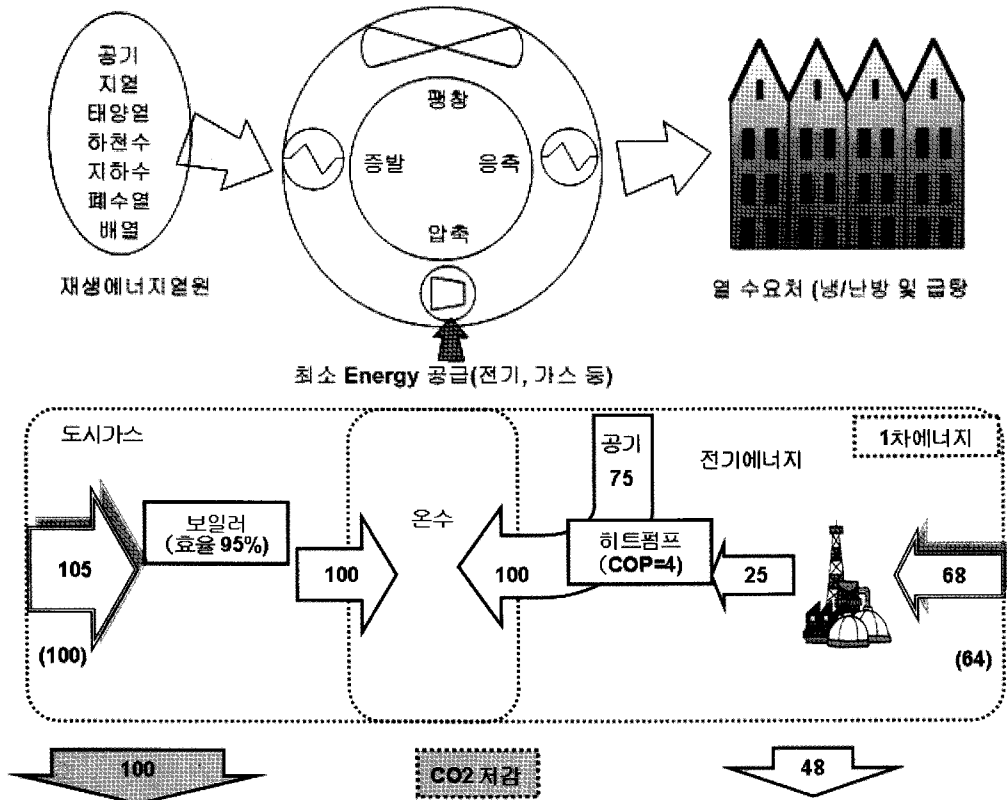
비용의 절감 등에 대한 연구가 폭넓게 진행되어야 하겠고, 가정용과 업무용 그리고 산업용 등에 폭 넓게 활용하기 위하여 에너지절약형 열공급원의 다양화와 축열장치를 연계한 시스템화, 저 운영비용도 지속적인 개발과제라고 할 수 있다.

산업체에서 버려지는 열원인 산업용 배열 또는 폐수열원의 경우, 하천수, 해수, 하수처리수 등과 같이 계절에 따라 대기와의 온도차가 분명하게 나타나며 (여름철에는 대기온도보다 낮고 겨울철에는 대기온도보다 높음) 대기에 비해 온도의 계절변동이 적어, 수온과 대기의 온도차(temperature difference)를 이용하여 급탕용 열원을 생산할 때의 열원(heat source)으로 활용될 뿐만 아니라 냉방용 熱媒를 생산할 때의 열침(heat sink)으로도 활용할 수 있는 특징을 지니고 있어 연중 높은 운전이 가능하고 에너지의 소비량을 절감할 수 있는 특징을 지니고 있다.

따라서 열수요처의 근방에 사용가능한 열원이 존재할 경우, 수열원식 히트펌프의 열원으로 이용하면 지역열공급사업용 열원 외에도 공장, 사업장의 열원, 자가소비용 냉난방열원, 급탕용 열원, 온실재배, 산업용 열원, 도로용설용 열원 등 다양한 용도로 그 활용이 기대되고 있다. 본고에서는 산업체에서의 버려지는 열원을 활용하여 고효율, 고온 수열을 얻을 수 있는 하이브리드 시스템의 특징 및 기술개발의 방향 등에 대하여 알아보려고 한다.

히트펌프의 열원으로 사용가능한 산업폐열량

산업분야에 사용되는 총 에너지 수요의 약 5 ~ 10%까지 산업분야에서는 폐열회수가 가능하며, 특히 저탄소 녹색성장과 발맞추어 기존 시스템에서의



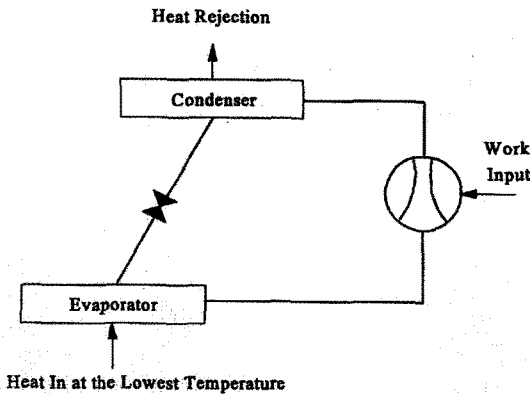
[그림 1] 히트펌프의 개념도 및 보일러대비 이산화탄소 저감량

CO₂ 발생량을 축소하거나 억제하여야 할 필요성이 강력히 요구되고 있다. 이러한 폐열의 효과적 이용을 통한 에너지 절약 및 환경문제 개선은 기술적 측면과 경제적 측면에서 매우 중요하다고 할 것이다.

국가 총에너지소비량(219.6백만 TOE(2004년 기준)) 중 제조업부문 총 에너지소비량은 86.8백만 TOE이며, 이 중 제품생산에 직접적으로 사용되는 에너지량 중 약 5%(20℃의 공업용수를 스팀으로 만들어 제품생산에 사용하고, 평균 50℃의 폐수를 방류)에 해당하는 2.2백만 TOE의 폐열이 발생하나, 거의 모두 버려지는 상황이다. 즉, 국가 전체에너지사용량의 약 1%가 폐열로 버려지고 있는데, 하이브리드 기술은 이러한 폐열을 이용하여 기존의 기술로는 불가능했던 공정용 고온수(90℃ 이상)를 제조할 수 있는 기술이라고 할 수 있다. 또한, 기존의 에너지 공급방식에 비해 위와 같이 집단으로 에너지를 공급하게 되면 에너지 절약(30%), CO₂ 배출량 감소(30%), 대기오염물질 배출량 감소(40%) 등의 효과가 있으므로, 에너지 절약적인 히트펌프의 고효율화 및 고온수 제조에 대한 요구가 더욱 증대되고 있다고 할 수 있다.

하이브리드(압축/흡수) 히트펌프의 종류 및 특성

지금까지 히트펌프 시스템은 목적에 따라 50℃ 정도까지의 온수 생산만이 가능하였으나, 다양한 형태

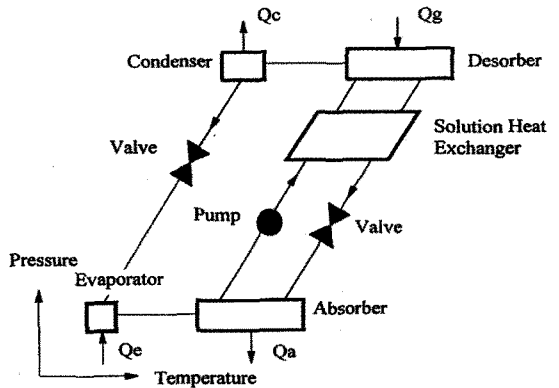


[그림 2] 압축식 히트펌프

로 분포하고 있는 산업폐열을 효율적으로 회수이용하기 위해서는 고온의 열원이 필요한바, 압축식과 흡수식의 사이클을 조합하여 폐열을 구동열원으로 활용하여 저온 냉열 및 기존 기술로는 불가능 했던 고온 온열(90℃)을 제조할 수 있는 시스템이라고 할 수 있다. 기존의 히트펌프 기술 중 가장 널리 활용되는 순수냉매 이용 증기압축식 사이클은 온도구배를 지닌 열원과 냉매가 열교환을 하여 응축이나 증발이 일어날 때 냉매와 열원의 온도구배가 잘 맞지 않음으로 인해 필연적으로 성능이 저하되며 흡수식 사이클에 비해 용량조절이 수월하지 않다는 단점이 있고, 흡수식 사이클의 경우, 증기압축식 사이클에 비해 성능계수가 낮다는 단점이 있다.

하이브리드 사이클은 증기압축식과 흡수식 사이클의 단점들을 보완하고자 개발된 사이클로, 이 사이클은 보통 용액순환부를 가진 증기압축식 사이클(vapor compression cycle with solution circuit) 또는 압축/흡수(compression/absorption) 사이클이라고 불리며 두 개념을 혼합하였다고 하여 하이브리드(hybrid) 사이클로 불리기도 한다.

하이브리드 사이클은 증기압축식과(그림 2) 흡수식 사이클(그림 3)의 장점만을 취한 것으로, 암모니아-물을 사용하는 하이브리드 히트펌프시스템은 그림 4에서와 같은 구성요소들로 구성된다. 사이클을 구동하는 데 필요한 에너지는 증기 압축식 사이클에서와 같이 냉매증기를 기계적으로 압축시키는 일의 형태로 제공되는 반면 냉·난방효과는 업소버



[그림 3] 단일 효율 흡수식 히트펌프

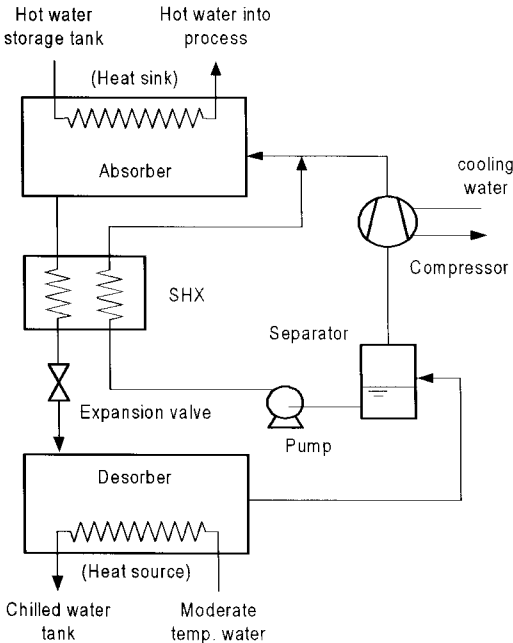


(absorber)나 디소버(desorber)에서 냉매증기와 흡수제의 혼합물로부터 얻을 수 있어 성능이 매우 우수하다. 하이브리드 사이클은 낮은 압력비로 넓은 온도 구간에 걸쳐 사용 가능하며 업소버와 디소버에서 작동유체의 온도구배를 이용함으로써 성능계수(COP)를 향상할 수 있어 에너지를 절약할 수 있는 가능성이 있는 것으로 조사되어 최근 기후변화 문제

와 맞물려 높은 효율의 하이브리드 사이클에 대한 연구가 유럽의 몇몇 국가를 중심으로 다시 진행되고 있는 상황이다. 이러한 하이브리드 사이클은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

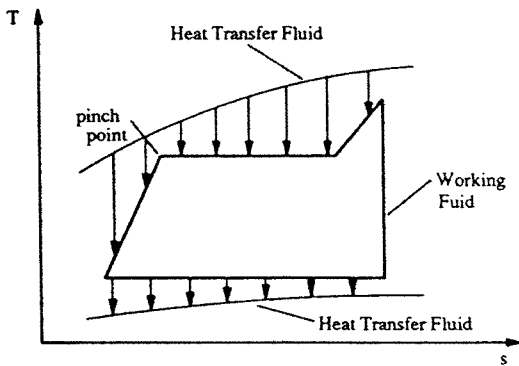
- (1) 낮은 압력비로 넓은 온도 구간에 걸쳐 사용 가능하다.
- (2) 업소버와 디소버에서 작동유체의 온도구배를 이용함으로써 성능계수(COP)가 높다.
- (3) 작동유체의 농도변화를 통한 용량조절 가능하다.

하이브리드시스템의 작동원리를 좀 더 자세히 알아보면 우선, 발생기(desorber)에서는 팽창밸브(expansion valve)를 통과하여 저온, 저압이 된 암모니아-물 혼합물 중 주로 증기압(vapor pressure)이 높은 암모니아가 30 ~ 50℃의 중저온 열원으로부터 증발하게 되며, 기액 분리기(separator) 내에서 용액과 증기로 분리된다. 이렇게 분리된 용액은 펌프를 통해 압축되어 고압의 용액이 되며, 증기는 압축기를 통해 압축된다. 다음, 압축된 증기와 고압 용액이 흡수기(absorber) 입구에서 만나고 흡수과정이 발생한다. 흡수기(absorber)에서 증기의 흡수가 일어나는 동안 발생하는 흡수열은 90 ~ 100℃의 고온을 생산하게 된다. 다음, 농용액은 팽창밸브를 통해 압력이 낮아지고 발생기로 다시 돌아가는 과정을 이루게 된다. 또한 용액 열교환기에서는 온도가 높은 농용액과 온도가 낮은 희용액 사이에 열교환이 이루어진다.

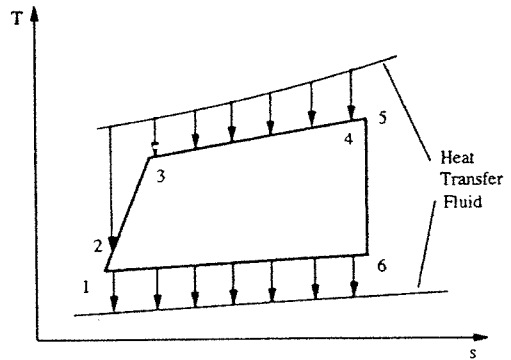


[그림 4] 압축/흡수 하이브리드 히트펌프의 개념도

압축/흡수 하이브리드 히트펌프는 원리적으로 열

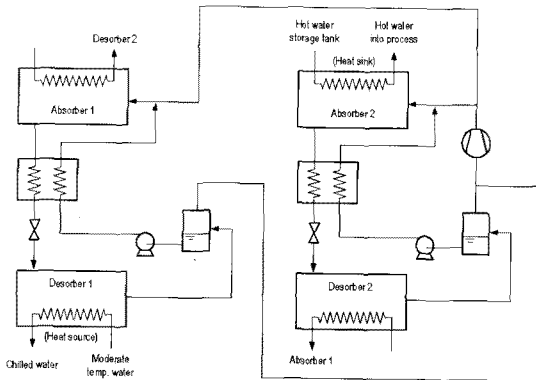


a) 순수냉매의 상변화를 이용한 열전달 과정

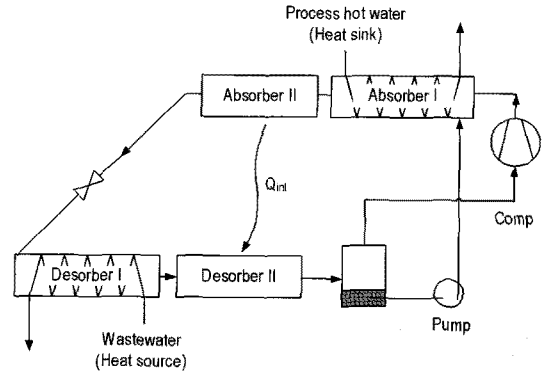


b) 혼합물의 상변화를 이용한 열전달과정

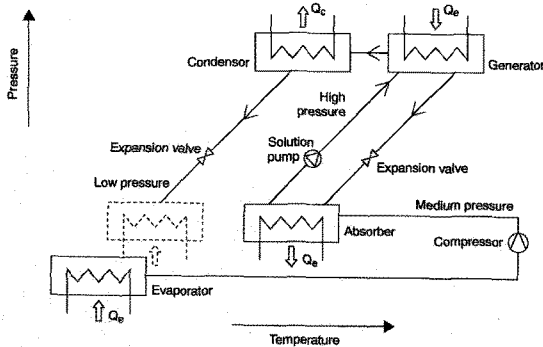
[그림 5] 순수 냉매 및 혼합물의 상변화를 이용한 열전달 과정 비교



[그림 6] 2 개의 용액회로를 갖는 압축/흡수 히트펌프 개념도



[그림 7] DAHX(Desorber-Absorber Heat eXchange) 사이클의 개념도



[그림 8] 저온 획득형 흡수/압축 하이브리드 사이클

원(heat source) 및 열침(heat sink)의 온도구배(temperature glide)가 큰 경우에 응용하면 좋다. 이는 일반적인 현열 열원 및 열침과 냉매가 열교환을 수행하는 Process에서의 비가역성과 관계되며, 이를 그림 5에 나타내었다.

하이브리드 시스템은 여러 가지 구성하는 방법에 따라 달라 질 수가 있는데, 그림 6은 그림 4의 압축/흡수 하이브리드 히트펌프에 용액회로(solution circuit)를 하나 더 추가하여 저온 흡수기에서의 발열을 저온 발생기에 사용토록 함으로써, 승온 폭을 높일 수 있도록 구성한 것이다.

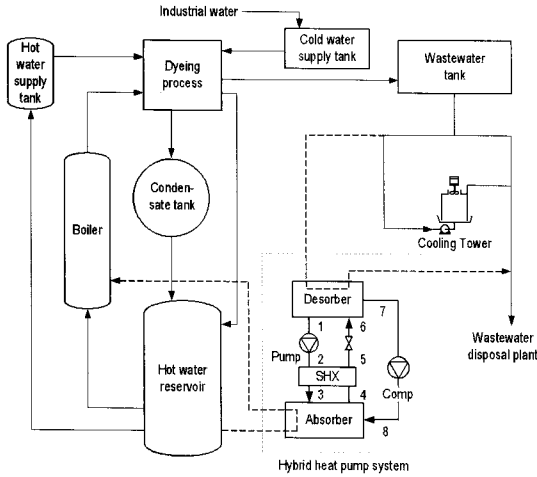
그림 7은 발생기-흡수기 사이의 온도중첩 구간에서 내부열교환을 시킴으로서, 하나의 용액펌프를 사용하면서도 그림 6과 같은 2단 사이클의 효과를 갖도

록 한 것으로서 DAHX(Desorber-Absorber Heat eXchange) 사이클이라 부른다. 이 사이클이 구현되면 시스템의 압력비가 감소하여 성능향상의 요인도 있으나, 내부 열교환에 따른 유량 증가가 수반되므로 응용분야에 맞는 최적 설계가 필요하다. 그림 8은 저온 획득형 흡수/압축 하이브리드 사이클의 개념도를 나타낸다. 이는 흡수식 사이클을 기본으로 하여 보다 저온을 얻을 수 있도록 압축기를 추가하여 구성한 것이 특징이다.

하이브리드시스템의 적용 예

하이브리드 시스템은 수요처의 다양한 요구에 적용시킬 수 있는 시스템으로, 산업폐열을 이용하여 90℃ 이상의 온열을 제조할 수 있는 시스템 개발은 향후 산업폐열의 활용에 기대가 크며, 이를 산업공정의 냉온열 공급과 CES의 지역열공급의 에너지원으로 발전시킬 수 있는 역량을 보유하고 있다. 그림 9는 하이브리드 시스템의 경제성을 보여 줄 수 있는 한 예제로서, 본 시스템을 염색공정에 적용하는 경우를 나타내고 있다. 50℃의 염색폐수를 이용하여 50℃의 공정수를 90℃로 가열하는 과정을 생각할 때, 약 4 수준의 성능계수를 나타내어 대단히 경제적인 시스템이라 할 수 있다.

하이브리드 사이클의 최적화 구성기술과 해석기술을 통한 핵심요소기기의 국산화 기술개발로 이와 유사한 산업분야 예를 들면 1) 사우나, 목욕탕, 샤워실



[그림 9] 하이브리드 시스템의 적용 예

의 폐온수 이용 급탕수 제조, 2) 냉방에서 얻어지는 폐열(냉각수열)이용 지역난방, 급탕, 3) 공장 잡폐수, 공정냉각수, 폐수를 이용하여 공정 세정/가열용 온수 공급, (4) 저온(50℃)의 폐온수 이용하여 흡수식 냉동기의 냉방 열원(90℃)으로 사용, (5) Air Compressor 냉각수, 화학공장 반응열을 이용하여 보일러 급수의 가열 등 예도 많은 파급효과를 가져올 수 있을 것으로 사료된다.

맺음말

본고에서는 산업폐열원을 이용하여 90℃ 이상을 생산할 수 있는 고온제조 하이브리드 히트펌프에 대하여 알아보았다. 막대한 양의 저온 산업 폐열을 열원으로 이용하여 고온(90℃ 이상)온열 및 냉열을 동시 생산함으로써, 상업/주거용 건물의 냉난방은 물론 병원 및 산업 공정용 온수 생산에도 응용이 가능한 하이브리드 시스템은 냉난방 분야 및 온수제조

분야에 사용이 가능하며, 화석연료를 사용하여 냉/반방 열원을 공급하는 시설에 보일러 대체기술로의 가능성이 매우 높아, 향후 세계적인 관심사인 이산화탄소 배출권 거래제도와 관련하여, 온실가스 배출 저감 기술로 배출권에서도 국제적인 우위를 확보할 수 있고, 온실가스배출을 줄임으로서 2008년부터 시행될 예정인 국제배출권거래제에 대비하고 새롭게 생성되는 범세계적시장을 선점하여 미래의 국가이익을 극대화할 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 하이브리드 시스템은 작동온도가 높아 고온 내부식 열/물질교환기 및 신 작동유체, 고온영역에서 동작하는 압축기에서의 오일 성능 저하와 각종 요소 기기들의 내 고온 신뢰성 부분에 대한 검증 등 많은 분야에서의 관련 연구가 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 박성룡 외, “히트펌프 하이브리드 산업폐열 이용기술개발”, KIER-A62425 보고서, 2007
2. Keith E. Herold, Reinhard Radermacher & Sanford A. Klein, “Absorption Chillers and Heat Pumps”, CRC Press, 1995
3. Serin R. Nordtvedt, “Experimental and theoretical study of a comp/absorption heat pump with NH₃-H₂O as working fluid”, Ph.D thesis of NTNU, 2005
4. IEA Heat Pump Programme, “Ab-Sorption Machines for Heating and Cooling in Future Energy Systems”, Annex 24, October 2000.
5. Zhou, Q., 1994, “Vapor Compression Cycle with a Solution Circuit and Desorber/Absorber Heat Exchanger”, Ph.D Thesis, University of Maryland. 