

염색폐열을 이용한 히트펌프 적용 사례

박수영 | 삼성에버랜드(주) E&A사업부 신재생에너지T/F 수석, sy747.park@samsung.com

산업단지의 염색 폐수열을 히트펌프로 회수하여 고온의 온수를 생산함으로써 인근의 산업시설에 저비용으로 열을 공급하는 기술과 적용사례를 소개하고자 한다.

머리말

미활용에너지는 자연에 존재하는 해수, 하천수, 지열을 비롯하여, 도시기반에서 발생하는 하수열, 산업플랜트의 냉각배열, 연도배열 등 다양한 형태로 존재하지만, 대부분 효율적으로 활용되지 못하고 자연계로 버려지고 있으며 지구온난화에 영향을 미치고 있다. 그동안 국내에서도 미활용 에너지에 대한 활용을 위한 각계의 지속적인 노력이 이루어져 왔으며, 대용량 수열원 히트펌프를 이용한 미활용에너지 활용기술의 적용이 활발히 추진되고 있다.

최근 시화 산업단지공단의 염색폐수열을 활용하여 히트펌프로 고온의 온수를 생산하여 산업단지내 열공급 네트워크를 구성하여, 에너지절감과 환경개선 효과를 기대할 수 있는 사례를 소개하며, 향후 국내에서 미활용에너지 이용에 대한 인식이 더욱 확산되고, 대용량 히트펌프 기술이 더욱 폭넓게 보급되기를 기대한다.

대용량 히트펌프 기술 소개

히트펌프의 원리

히트펌프는 냉동기의 구동원리와 유사하나, 냉동기가 증발기(Evaporator) 측의 냉열을 주로 이

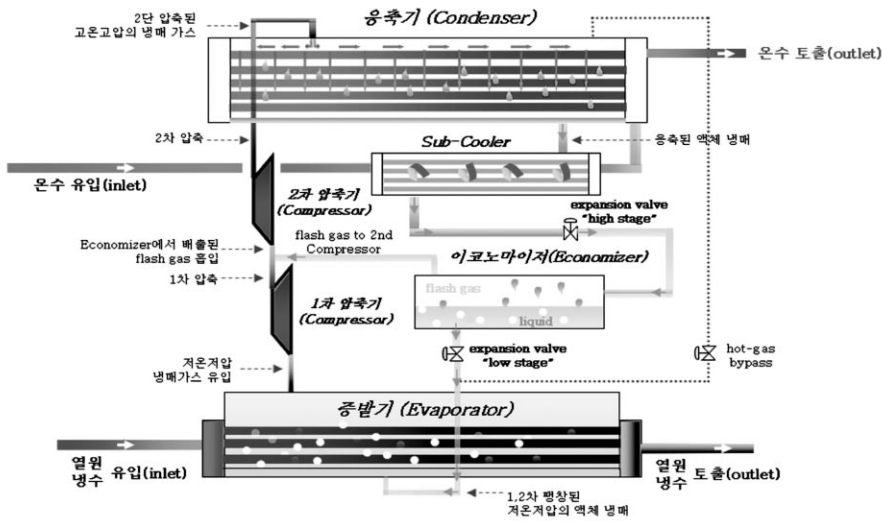
용하는 것에 반하여 히트펌프는 응축기(Condenser) 측의 고온 열을 주로 이용하는 기술로서, 경우에 따라서는 냉열과 온열을 동시에 활용 가능하다.

그림 1은 고온의 온수를 생산할 수 있는 2단압축 대용량 히트펌프의 구성 및 작동원리를 잘 나타내고 있다. 증발기에서는 낮은 온도의 미활용 열원수가 열교환을 통해 흡수되어 냉매를 저온에서 증발하게 만들고, 증발된 저온저압의 냉매가스는 압축기(Compressor)의 회전압축을 통해 높은 엔탈피(Enthalpy)를 가진 고온고압의 냉매가스로 변하게 된다. 이때 압축기는 형식에 따라 단단압축방식(single-stage compressor), 2단 압축방식(2-stage compressor) 또는 이들의 조합 운전을 통하여 최적화된 운전을 하도록 구성된다. 응축기로 보내진 고온 냉매가스는 온수와의 열교환 과정을 통해 액화되며, 이때 고온의 온수(60 ~ 90℃)를 생산하여 활용하게 된다.

응축된 액체 냉매는 팽창밸브(Expansion valve)를 지나면서 팽창되어 초기의 저온저압의 액체냉매 상태로 돌아가게 되며, 냉매가 보유한 열을 최적으로 회수하기 위하여 Sub-Cooler와 Economizer 등을 적용함으로써 성적계수를 최대한 높일 수 있다.

히트펌프의 해외 개발진행 현황

북유럽의 대표적인 히트펌프 기업인 F社에서는 1870년대부터 대용량 압축기를 개발한 것을 시작으로, 1978년 이후 히트펌프용 터보 압축기 개발을 통하여 고온(최고 120℃)의 온수와 Steam

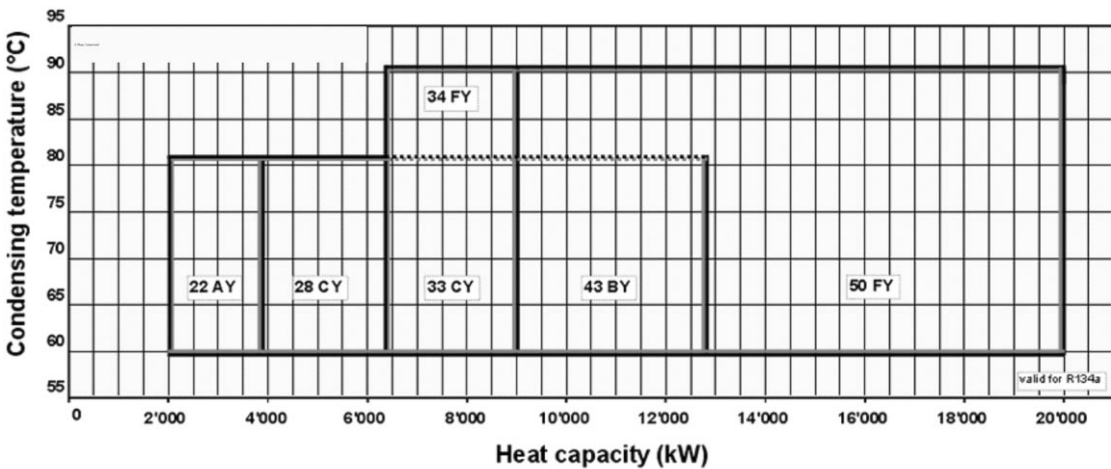


[그림 1] 2단압축 히트펌프의 구성 및 동작원리

까지 생산해낼 수 있는 히트펌프 기술을 개발하여 적용한바 있다. 최근에는 오존층파괴의 원인이 되고 있는 프레온가스 이용이 제한되어 대체 냉매(R-134a)를 적용하여 90℃ 이하의 온수를 발생시킬 수 있는 제품을 공급하고 있다. 또한, 지속적으로 고효율 임펠러를 개발하여 새로운 모델의 압축기가 제품화되고 있으며, 다른 대체냉매

를 이용하여 100 ~ 120℃의 고온 온수 생산이 가능한 새로운 모델의 개발도 진행되고 있다.

히트펌프는 설계조건에 따라 적합한 형식과 모델의 압축기를 선정하고 있으며, 그림 2는 터보 압축기의 Capacity Range를 나타내고 있다, 현재 단위 기기당 가장 큰 용량은 20,000 kW이며, 북유럽에서는 실제로 30년 가까이 지역난방



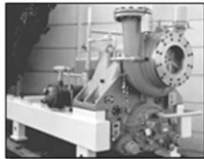
[그림 2] 대용량 히트펌프의 압축기의 Capacity Range



Uniturbo® 22



Uniturbo® 23



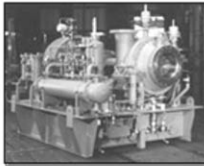
Uniturbo® 28/33



Uniturbo® 43



Uniturbo® 34



Uniturbo® 50



[그림 3] 대용량 히트펌프의 압축기 다양한 모델 및 임펠러

플랜트용으로 적용되어 운전되고 있다. 공급온도는 모델에 따라 60℃부터 90℃까지 승온이 가능하고 각각의 COP는 조건에 따라 다르지만 보통 3.0 ~ 6.0 범위에서 설계되고 있다.

F社의 가장 핵심적인 기술력은 냉매를 고온·고압으로 압축하는 Compressor를 설계 제작하는데 있으며, 그림 3과 같이 다양한 모델의 Compressor를 조합하여 열공급 특성을 고려한 맞춤형 설계를 통하여 높은 효율과 성능을 보장하게 된다. 특히 Compressor의 핵심이 되는 임펠러는 스테인리스 스틸 블록을 일체형으로 정밀하게 밀링 가공하여 내구성과 효율을 극대화하는 것이 특징이다.

미활용에너지를 이용한 히트펌프 해외 적용사례

하수열 이용 히트펌프 적용사례

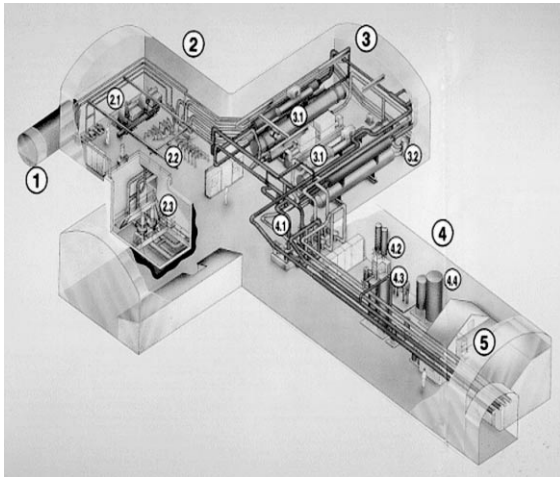
노르웨이 수도 오슬로의 인접지역에 위치한 Sandvika Plant는 도시를 흐르는 하수열원을 이용한 히트펌프 시스템으로, 안정적이고 저렴한 에너지 비용으로 지역 냉난방을 공급하고 있다. 이 플랜트는 생하수를 이용하여 냉/난방을 복합적으로 공급하도록 설계된 히트펌프 플랜트 중 가장 최초의 플랜트이다. 시의 재개발 계획에 의해 1989년에 히트펌프 Plant가 설치되어,

Sandvika 지역의 50만 m² 연면적의 업무용, 상업용 및 주거시설을 대상으로 20년이 넘게 냉난방 열원을 공급하고 있다.

Sandvika Heat-pump Plant의 구성은 그림 4 및 표 1 나타나 있으며, 처리되지 않은 도심의 생하수를 여과기와 침전조에 의해 오염물질을 제거하고 직접 히트펌프의 Heat Source로 활용하고 있다. 특히 증발기(Evaporator)는 동절기/하절기의 설계 용도에 따라 그 열원을 각기 달리 활용할 수 있도록 2 set로 제작, 설치된 것이 매우 특징적이다. 즉, 동절기에는 난방부하만을 공급하도록 설계됨으로써 생(生)하수를 증발기 열원으로 취수하며, 하절기에는 난방과 냉방을 동시에 공급해야 하므로 냉수를 증발기 열원으로 취하도록 한 것이다.

해수열 이용 히트펌프 적용사례

스웨덴의 수도인 스톡홀름의 북쪽 해안에 위치한 Värtan Plant는 1984년 ~ 1986년에 설치 운영되기 시작한 세계 최대 규모의 해수 히트펌프 열생산 플랜트로서, 6기의 히트펌프로 180 MW의 온수를 생산 공급하고 있으며, 열원인 해수의 동절기 최저온도 2.5℃에서 열을 흡수하여 2단 압축을 통해 80℃의 온수를 생산한다. Värtan Plant의 대규모 히트펌프를 통해 스톡홀름 전체 지역의 난방열량 중 약 2 ~ 3% 이상을 감당하고



1. 하수 터널
2. 필터 스테이션
 - 2.1 기계적 필터
 - 2.2 침전 설비
 - 2.3 폐수 이송 펌프
3. 에너지 생산실
 - 3.1 히트펌프 / 냉동기
 - 3.2 전환 밸브
4. 보조 기계실
5. Control Room

[그림 4] Sandvika Heat Pump Plant

<표 1> Sandvika Plant 히트펌프 적용사양 및 특징

구 분	내 용	비 고
설치 년도	1989년	
사용 열원	미처리 생(生)하수	
공급형태 및 용량	(동절기) 난방 14MW 공급 (하절기) 냉방 9.5MW 공급 (춘추절) 냉난방 동시 공급	2기 적용
공급 온도	(난방) 57℃ → 78℃ / (냉방) 8℃ → 4℃	
공급 범위	(난방) 인근 10 km 이내, 56개 건물 (냉방) 인근 4 km 이내, 18개 건물	
COP(성적계수)	난방 3.1 / 냉난방 5.22	
적용 냉매	초기 R500 → '93년 R134a 교체	
누계 운전시간	150,000시간	

있으며, 적용된 기술 Data는 표 2와 같다.

Värtan Plant는 180 MW의 열생산에 필요한 열원을 해수의 경우 동절기 수온이 약 2.5℃로 매우 낮기 때문에 적은 온도차(Δt=2℃)로 많은 해수를 취수하고 있다. 여름철에는 표층의 온수를 취수하는 한편 동절기에는 약 15 m 깊이의 3℃의 일정한 수온을 열원으로 취하는 방법으로 COP의 유지를 하고 있으며, 특수하게 제작된

Falling Film형의 증발기(Plate-Tube 열교환기)가 적용 되었다(그림 5 참조).

연도 배기열 이용 히트펌프 적용사례

스웨덴의 소도시 Malmö에 위치한 소각발전 Plant로서, 지역의 쓰레기 소각 후 연도로 배출되는 배기가스 폐열을 2기의 히트펌프를 통해 효과적으로 재이용함으로써, 환경 및 에너지감축의

<표 2> Värtan Plant 히트펌프 적용사양 및 특징

구 분	내 용	비 고
설치 년도	1984 ~ 1986년	
사용 열원	해수	직접 활용
열원 온도	2.5℃ → 0.5℃	
공급 온도	50℃ → 80℃	
공급 용량	180 MW(약 155 Gcal/h)	
대 수	6기	
적용 냉매	초기 R22 → R134a	교체 중
누계 운전시간	약 180,000시간	

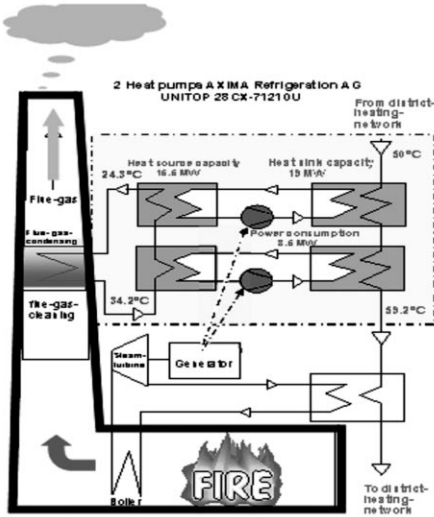


[그림-5] Värtan 해수 히트펌프 Plant의 위치 및 펌프 기계실

효과를 거두고 있다. Plant의 소각열원은 음식을 포함한 각종 쓰레기로써 배출되는 가스 내에 각종 Dust를 정제하기 위한 Flue Gas Cleaning System이 설치되어 있으며, 이 때 배기가스의 정제에 사용하고 온도가 상승된 정제수를 히트펌프의 열원으로 활용토록 설계되었다(그림 6 참조).

Malmö Plant에 적용된 2기의 히트펌프는 각각 저온부 히트펌프 및 고온부 히트펌프로 나누어 담당하도록 함으로써, COP성능을 극대화하도록 설계 적용하였다. 즉, 고온부 히트펌프는 고

온부(34.2℃)의 정제수를 증발기 열원으로 하여 고온(59.2℃)의 온수를 생산토록 하고, 저온부의 히트펌프는 1차로 강하된 저온부(29.3℃)의 정제수를 증발기 열원으로 하여 중온(54.6℃)의 온수를 생산토록 함으로써 2대 히트펌프에 대하여 승온폭(Temperature Lift)을 30℃ 이내로 유지하여 5.43의 COP를 실현하도록 하였다(표 3 참조). Malmö Plant의 적용 Concept은 스웨덴의 다른 지역인 Umea 소각발전 플랜트 등에도 적용되었다.



[그림-6] Malmö 소각발전 Plant 히트펌프 개념도

시화 염색폐수열 이용 열공급 사례 소개

사업 추진 배경

한국산업단지 공단의 경기EIP사업단에서 반월, 시화 산업단지에 대한 생태산업단지 구축을 위한 연구과제의 수행을 통해 성공적으로 사업화까지 추진된 사업이다. 연구과제의 주관은 한국생산기술연구원이며, 참여기업은 시화염색사업 협동조합과 KG에너지, 지자체 행정기관으로는 시흥시가 참여하였다.

2008년 5월부터 반월, 시화 EIP연구과제로 신청, 재생에너지 네트워크 구축계획이 수립되었으며, 1차 연구시행기간 중 열원 및 수요조사, 참여사의 운영현황 및 열평형도 분석, 폐열교환기와 히트펌프의 기술검증 등 추진 타당성 검토가 진행된다. 2010년도에 산업단지공단과 시화염색조합, KG에너지, 시흥시가 본 사업에 참여하는 양해각서를 체결한 후 본격적인 사업의 실행 계획이 진행되었으며, 2010년 5월 ESCO 성과보증 사업으로 추진되어 2011년 11월 준공 및 상업운전을 예정하고 있다.

미활용에너지원인 염색폐수열을 제공하게 되는

<표 3> Malmö Plant 적용 히트펌프 사양 및 특징

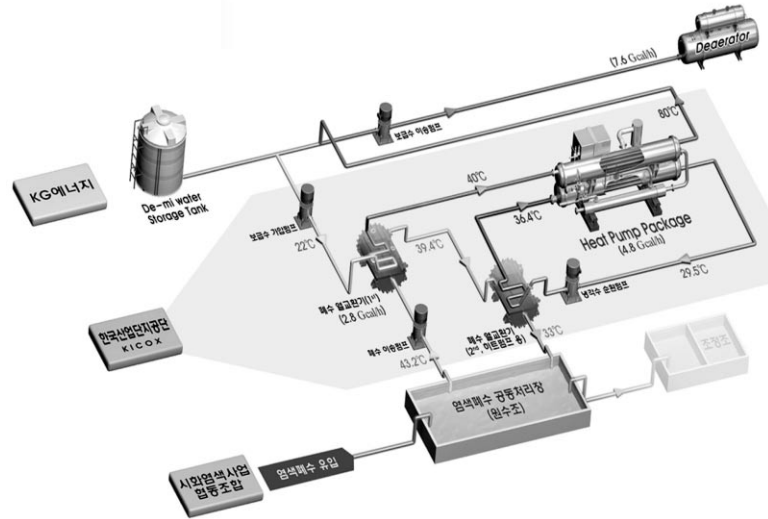
구분	내용	비고
설치 년도	2002년	
사용 열원	배기가스 교환열	Flue Gas Cleaning 水
열원 온도	34.2°C → 24.3°C	
공급 온도	50°C → 59.2°C(→70°C)	
공급 용량	19MW	
대 수	2기	
COP	난방 5.43	

시화염색조합은 32개 염색관련기업의 폐수를 1일 1만6천톤 정도를 처리하고 있으며, 평균 온도 38°C 정도로 배출하고 있다. 염색조합의 경우 높은 온도의 폐수를 생물학적 처리를 하기 위하여 폐수 온도를 낮춰야 하는데 이때 냉각탑을 가동하면 염색폐수의 비산에 의해 주변의 민원 우려와 냉각탑 및 순환펌프의 동력 비용이 증가하는 애로 사항이 있었다. 또한 열 수요처가 되는 인근의 KG에너지는 시화산업단지 공단의 60개 업체에 시간당 400여 톤의 스팀을 공급하고 있는데, 최근 고유가로 인한 연료비 상승으로 보다 경제적인 열원의 확보와 온실가스 감축에 대한 필요성과 관심이 높은 상황이었다(그림 7 참조).

이러한 열 공급처인 염색조합폐수처리장과 열수급처인 KG에너지의 애로사항을 동시에 해결하는 방안으로, 염색폐수의 보유열을 회수하여 히트펌프 및 폐수 열교환기를 통해 재생에너지를 공급하는 네트워크를 구축하는 목적으로 추진되었다. 이를 통하여 염색조합측의 폐수 수온강하를 통해 폐수처리의 효율개선 및 냉각 효과가 기대되며, KG에너지의 경우 기존 연료사용에 비해 저렴한 저가 대체 열원의 확보가 가능할 것으로 기대된다.

사업 개요

그림 8은 히트펌프를 이용한 재생에너지 공급 시스템 구성도이다. 시화염색조합 폐수 원수조에서 펌프로 염색폐수를 취수하여 1차 폐열회수 열교

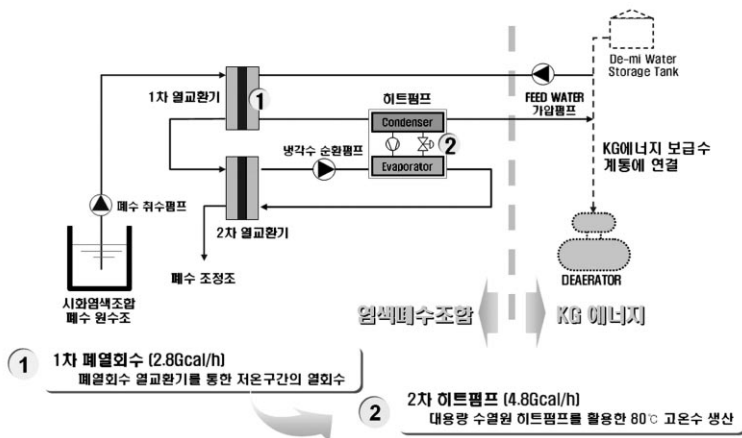


[그림 7] 시화 염색폐수열 히트펌프 시스템 계통도

환기에서 2.8 Gcal/h의 열을 회수하게 되며 동절기 기준으로 36°C로 인입되어 5.8°C를 회수하고 30.2°C로 토출하여, 다시 2차 열교환기로 이송되어 히트펌프 증발기의 열원으로 공급된다. 이때 30.2°C로 인입되어 7.3°C를 회수하고 22.9°C로 폐수 조정조로 최종 방류하게 된다. 2차 열교환기에서 회수한 3.64 Gcal/h의 열원을 이용하여 히트펌프에서 약 4.8 Gcal/h 정도 생산하

게 되어 총 7.6 Gcal/h의 온수를 생산하여 열수 요처인 KG에너지로 공급하게 된다. KG에너지의 경우 보일러에 공급되는 보급수는 동절기 10°C, 하절기 20°C정도 되며, 전체량이 폐열회수 열교환기와 히트펌프로 보내져서 80°C까지 가열됨으로서 에너지절감 효과를 얻게 된다.

열원조건으로 연평균 약 36°C 이상 양질의 폐수 열원을 확보할 수 있으며, 염색폐수 특성상 열



[그림 8] 시화 염색폐수열 히트펌프 시스템 구성도



교환기에 대한 오염 및 부식에 대한 영향 평가는 한국생산기술연구원의 과제를 통하여 검증하여 활용상 문제가 없는 것으로 검토되었다. 설치 장소는 시화염색폐수 조합내의 유틸 부지를 검토한 결과 지하층의 펌프 기계실 상부에 히트펌프 기계실을 증축하여 설치하는 것으로 계획되었으며, 열수요처인 KG에너지가 1 km 인근에 위치하여 열공급 Net-Work 구축이 가능한 것으로 검토되어 본 사업을 추진할 수 있었다.

에너지 절감효과를 극대화하기 위하여 히트펌프에 폐수 열원을 인입하기 전에 1차열교환기를 두어 열회수 효과를 극대화하였으며, 히트펌프의 경우 COP 4.0 정도의 성능을 얻을 수 있는 고효율 제품을 적용하였다. 또한 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 염색폐수와 직접 접촉하는 열교환기의 경우 STS316 재질을 적용하였으며, 폐수 인입배관 계통은 스케일 형성을 고려하여 폴리에틸렌 계통의 배관재질을 선정하였다. 또한 유지관리 편리성을 고려하여 원격감시 시스템 및 첨단자동제어 시스템을 구축하고 장비의 효율적 관리를 위한 Lay-Out을 고려하였다(그림 9 참조).

사업 효과

경제적 효과로서 KG에너지의 주 연료원이 되고 있는 BC유를 연간 700만 리터, 연간 3,900 Toe

의 절감효과가 기대되며 기존 보급수 가열에 필요한 에너지의 60%가 절감되는 효과를 얻을 것으로 기대된다. 이를 온실가스 감축효과로 환산하며 연간 1만6천 ton CO₂ 감축효과를 얻을 수 있으며, 기존 열원대비 75%의 감축효과가 기대된다. 환경적인 효과로 B-C유를 연소과정이 없는 히트펌프와 열교환기를 적용함으로써 연소과정에서 생성되는 배출물을 저감하게 되고, 폐수 온도를 8℃ 정도 낮춤으로서 냉각탑 가동에 필요한 동력을 절감하고 염색폐수 처리 고도화에 기여할 것으로 기대된다.


맺음말

해외에서는 30년전부터 하수, 해수, 하천수, 냉각수, 산업폐열 등 다양한 미활용에너지의 배열을 대용량의 수열원 히트펌프를 이용하여 도시의 지역난방에 폭넓게 활용해 왔으며, 특히 환경에 대한 관심이 높고 난방부하가 큰 북유럽에 그 적용사례가 많이 있다.

일본의 경우에도 오래전부터 히트펌프 기술이 지역난방용 또는 건물공조용으로 적용되어 왔으나, 공급온도가 50℃ 이하로 낮아 국내에 기후조건에 적용하기 어려운 것이 현실이다.

국내 히트펌프 제작기술 수준이 최근 급격한 성장으로, 여러 실증사업을 통하여 신뢰성과 내구성, 효율측면에서 안정적인 성능을 입증하고 있다.

최근 에너지 비용절감 효과가 우수하고 온실가스 저감효과가 뛰어난 수열원 히트펌프에 대해 지역난방 열공급회사 및 지자체에서도 높은 관심을 갖고 대규모 사업이 진행하고 있으며, 정책적으로 신재생에너지로서의 범주로 포함되는 방안이 긍정적으로 검토되고 있는 것은 매우 다행스러운 일이다.

앞으로 히트펌프의 산업화에 있어서 해외 선진기술의 도입과 함께 국내 자체 기술개발이 빠르게 발전되어, 에너지절감과 온실가스 감축에 많은 기여를 할 수 있기를 기대한다. 



[그림 9] 시화 염색폐수열 히트펌프 열공급 시스템 조감도