

도시 미활용 에너지 이용 열펌프시스템 개발

신현준 / 한국건설기술연구원 수석연구원

1. 서론

생활수준의 향상에 따라 쾌적한 환경에 대한 욕구가 증대되면서 환경오염에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 석탄·석유 등과 같은 화석 에너지의 유효이용과 일상생활에서 배출되는 각종 도시 未活用 에너지를 回收하여 재활용하기 위한 신기술 개발이 선진국을 중심으로 활발하게 추진되면서 廢熱의 회수, 이용 기술은 그동안 많은 발전을 이룩하여 왔다. 특히, 도시화로 인한 주거밀도가 높아지고 대규모화되면서 이들로부터 배출되는 廢水가 증가함에 따라 이들의 유효이용에 대한 관심이 증대되고 있다. 에너지자원의 개발에 있어 종래에는 경제성에 중점을 두었으나 오늘날에는 환경보호 측면이 강조되면서 자연에너지를 중심으로 한 각종 청정에너지의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 그러나 이러한 기술이 실용화 되기까지는 현재 사용되고 있는 화석에너지를 주에너지원으로 계속 사용하는 것이 불가피할 것으로 예상되기 때문에 이들 자원의 사용량을 최대한 줄일 수 있는 기술개발이 절실히 요구되고 있다.

이와 같은 관점에서 주거단지, 상업지역 등 각종 근린생활시설로부터 배출되는 生活廢水에 보유되어 있는 廢熱(이하 "廢水熱"이라 함)은 양적으로나 질적으로 熱펌프의 熱源으로서 높은 이용 잠재력을 지니고 있을 뿐만 아니라, 이를 이용하는데 필요한 熱펌프 기술 및 이에 관련된 기술도 이미 상당한 수준에 이르고 있어 廢水熱을 熱源으로 하는 열공급시스템의 실용화는 미래 에너지수요에 능동적으로 대처할 수 있는 새로운 에너지자원으로서의 가치가 매우 높을 것으로 생각된다. 따라서 폐수열을 개발하고 그 시운전결과를 제시하여 각종 도시 미활용에너지의 적극적인 활용방안을 모색하도록 하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 廢水熱의 利用 現況

2.1 國內現況

목욕탕이나 실내수영장 등과 같이 에너지 사용량이 많은 특정 시설에서 배출되는 廢水의 온도는 다른 生活廢水熱에 비하여 비교적 높기 때문에 에너지자원으로써의 경제성이 높아 이를 회수하여 이용할 수 있는 폐수열 열교환기

를 설치하도록 법적으로 규정하여 시행하고 있다. 즉, 이들 시설과 같이 대량으로 에너지를 소비하면서 비교적 고온의 廢水熱이 발생하는 건물들을 대상으로 에너지절약을 효과적으로 유도하기 위해 건축법 시행령으로 廢水熱 回收 裝置를 설치할 것을 명시하고 있다.

그러나, 이들 시설에 이러한 장치를 설치함으로써 얻은 에너지절약의 효과에 대해서는 아직까지 정확히 분석된 자료가 없을 뿐만 아니라 사후관리의 취약성 때문에 이러한 제도의 시행 효과에 대해서는 실제로 많은 의문이 제기되고 있으며, 더우기 본 연구에서 대상으로 하고 있는 廢水熱과 같은 저온의 도시미활용에너지에 대해서는 에너지자원으로서의 특성분석, 활용 결과 등에 관한 연구결과가 발표된 것이 없다.

겨울철의 평균온도가 약 10℃전후로 비교적 낮고, 오염이 심하여 熱源으로서의 사용에 많은 제약을 받아 현재까지도 거의 이용되고 있지 않는 이들 熱源은 관련산업기술의 향상에 따라 충분한 경제성이 있다는 것이 선진국의 연구결과를 통해 입증되고 있으며, 우리나라에서도 에너지의 효율적인 이용을 통한 자원확보 측면에서 적극적인 회수 이용방안이 검토되어야 한다.

2.2 外國現況

廢水熱을 냉·난방에너지로 이용하기 위한 시도는 스웨덴, 노르웨이 등 유럽에서 처음으로 시작되었으나, 본격적으로 관심을 갖기 시작한 것은 제1·2차 석유파동을 겪으면서 부터이다. 이 시점을 기점으로 하여 에너지절약에 대한 중요성이 높아져 저온·저밀도 에너지의 이용을 위해 熱펌프에 대한 연구가 활발하게 진행되었고 그 결과 각종 관련기기의 성능이 크게 향상되어 종래에 등한시되어오던 이들 저온廢水熱의 유효이용의 가능성이 한층 높아지게 되었다.

그후, 특히 부존자원이 절대적으로 부족한 일본에서 활발한 연구가 진행되어 많은 곳에서

실용화된 예가 속속 발표되고 있다. 일본에서는 이들 生活廢水의 廢熱 뿐만아니라 각종 도시에 존재하는 거의 모든 저온·저밀도의 未活用에너지를 대상으로 효과적인 이용 기술개발을 촉진하기 위해 정부차원에서 각종 금융, 세제 지원 제도를 만들어 운영하고 있다.

일본에서 하수처리수를 熱펌프의 熱源으로 하여 실제로 이용한 최초의 시설로는 東京都下水道局에서 설치한 시설을 들 수 있으며, 그후 東京·橫濱·名古屋·大阪 등 각 지방의 하수처리장에서도 하수처리수를 熱펌프의 熱源으로 하는 熱펌프시스템을 설치하여 처리장내에 위치한 건물의 냉·난방 및 급탕에 이용하는 소규모 시설이 활발하게 보급되었다.

또한 대규모 지역냉난방에 응용한 대표적인 사례로서는 동경 근교의 幕張 High-tech Business 지구의 열공급 설비를 들 수 있으며, 이 곳에서는 필요한 냉·난방에너지의 70~80%를 廢水熱로 충당하도록 계획되어져 있다. 그밖에 현재 건설중인 많은 신도시에서도 廢水熱을 비롯한 각종 都市 未活用에너지를 熱源으로 하는 시스템이 주열원공급장치로 사용되어 수요 열량의 대부분을 충당하도록 계획 또는 건설중에 있고, 에너지사정이 일본과 비슷한 우리의 현실에 비추어 볼 때 주목할 일이다.

유럽지역 특히 북부유럽에서도 인구가 밀집되어 있는 대도시의 주거지역에 廢水熱이 냉난방열원으로서 널리 이용되고 있다. 이들 지역에서는 이미 오래전부터 이러한 열공급시설이 도시지역에서는 극히 제한적으로 이용되어 왔으나 관련기술의 발달과 함께 廢水熱의 경제성이 높아지고, 환경오염을 줄일 수 있는 냉난방 시스템이라는 인식이 확산되면서 최근에 활발한 이용을 보이고 있다.

특히 스웨덴, 노르웨이 등은 하수열을 이용한 지역냉난방 열공급시설이 활발하게 건설되어

도시단위로 대규모의 시스템이 가동되고 있으며, 그 중에서 오슬로의 Sandvika Plant는 하수열을 이용한 지역 냉난방시스템의 가장 대표적인 형태로 알려져 있다.

3. 廢水熱源의 熱特性 調査

3.1 調査概要

도시형廢水는 주거단지, 병원, 호텔, 사무소용 건물 등에서 배출되는 것으로 제한하여 공장 등 산업시설에서 배출되는 産業廢水와 구별되며, 도시형廢水 중에서 아파트단지, 단독주택 등의 주거단지로부터 배출되는 廢水를 生活廢水로 칭하여 다른 시설로부터 배출되는 도시형廢水와 구별된다. 본연구에서 대상으로 하고 있는 주거단지로부터 배출되는 生活廢水熱은 광범위하게 분포되어 있기 때문에 회수에 상당한 어려움이 있다. 따라서 회수 가능한 에너지량을 산정하기 어려우므로 실제로 관련시설을 설치할 때에는 해당지역에 대한 廢水배출량, 廢水특성 등을 조사하여 설계에 필요한 자료를 작성하여야 한다. 이러한 관점에서 415세대로 구성된 아파트단지에서 배출되는 폐수열의 열특성 및 폐수 배출량을 파악할 수 있는 자료로 활용하기 위하여 '93년 12월부터 시작하여 '94년 9월까지를 측정기간으로 하여 폐수온도를 실측하였으며, 廢水의 양은 실측이 곤란하므로 각 세대에 공급된 급수·급탕량을 관리사무소에 비치된 자료를 이용하여 산출하였다.

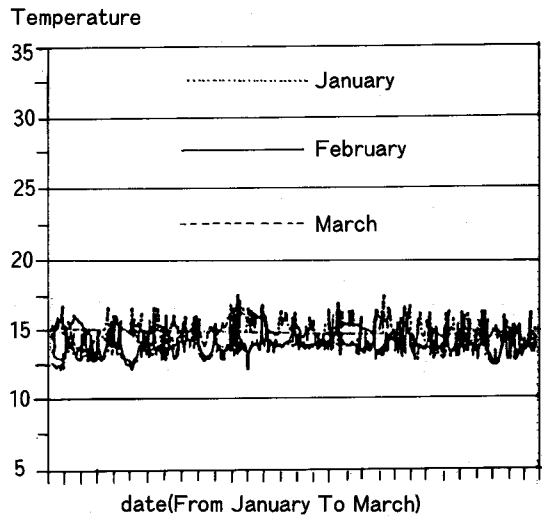
3.2 調査結果 및 分析

3.2.1 廢水 온도특성

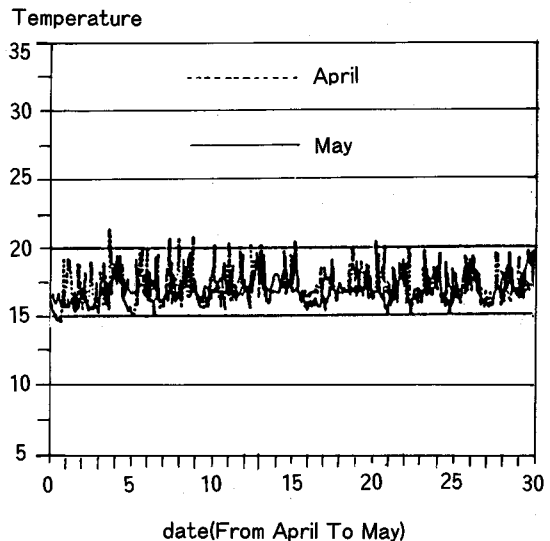
'94.1~'94.8월까지 측정된 월별 廢水의 온도 분포를 [그림 1] [그림 2] [그림 3]에 표시하였다.

이들 그림에서 대체적으로 할 수 있는 바와 같이 1월, 2월의 중간기에는 15℃~17.5℃, 4월 및 5월의 중간기에는 15℃~20℃, 냉방기인 6월, 7월 및 8월에는 20℃~28℃의 온도분포를 보이고 있으며 각 기간별로 온도편차도 약 5℃ 정도를 보

<그림 1. 폐수열 온도 분포(1, 2, 3월)>



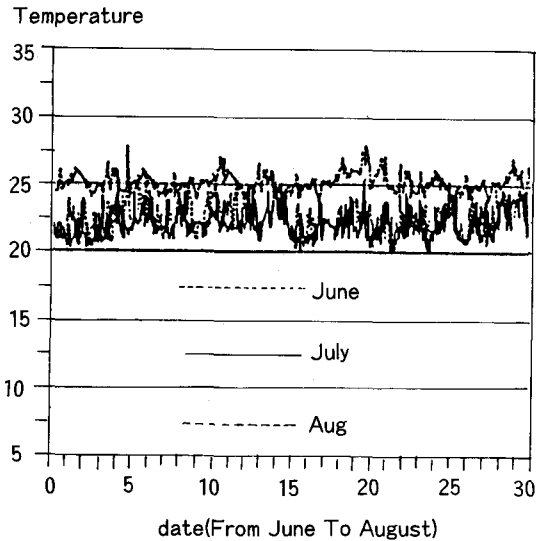
<그림 2. 폐수열 온도 분포(4, 5월)>



이고 있다.

이러한 廢水의 온도특성(온도수준, 배출온도의 안정성)은 熱펌프의 성능을 높임과 동시에 안정적인 성능을 확보할 수 있어 냉·난방열원으로 유효하게 이용할 수 있음을 보여주는 것이다. 이것은 熱펌프의 熱源으로 일반화된 공기

<그림 3. 폐수열 온도 분포(6, 7, 8월)>



에 비해 온도가 월등히 높고, 안정된 성능높은 냉·난방용 열펌프시스템 구성이 가능하다는 것을 의미한다.

3.2.2 급수 및 급탕사용량

시스템의 설치대상으로 선정된 단지의 廢水로부터 회수 가능한 열량을 추정하기 위해서는 廢水의 온도 뿐만아니라 廢水의 양을 조사하여야 하며, [표1]은 이를 위해 단지의 관리사무소에 비치된 자료를 인용하여 정리한 것이다. 이번 연구에서 대상으로 하고 있는 단지내의 배관은 전술한 바와 같이 오수와 배수가 분리·배출되고 있으며, 그 중에서 급탕으로 공급된 온수는 모두 배수관을 통하여 배출되고 급수의 경우는 화장실의 용수 및 기타용도에 사용된 것을 제외한 약 70%정도가 배수관으로 배출된다고 가정하여 熱源으로 이용되는 廢水의 2량을 산출하였다.

[표1]로부터 조사기간 동안에 조사 대상 아파트단지에서 사용한 급수 및 급탕량은 총 56,867(톤)으로 그 중에서 급수량의 70%와 급탕

<표 1> 급수 및 급탕량 (단위 : 톤)

구분	월				
	'93 12	'94 1	'94 2	'94 3	'94 4
급탕량	1,719	2,414	2,155	2,239	1,880
급수량	3,419	3,520	3,071	3,984	3,943
계	5,138	5,934	5,226	6,223	5,823

구분	월				합계
	'94 5	'94 6	'94 7	'94 8	
급탕량	1,576	1,285	1,113	708	15,089
급수량	5,266	5,567	5,866	7,142	41,778
계	6,842	6,852	6,979	7,850	56,867

량 전부가 배수관으로 배출된다고 하였을 때 배수관을 통한 배수량은 총 44,330(톤)정도가 된다. 이것을 냉방기와 난방기로 구분하여 하루 평균배출량을 근거로 평균활용가능량을 산출하면, 난방기는 평균 151(톤/일)과, 냉방기는 평균 175(톤/일)의 廢水를 熱源으로 이용할 수 있는 것이 많다.

4. 폐수열의 이용효과

4.1 열펌프시스템의 構成

이러한 열특성을 갖는 폐수열을 열원으로 하는 열펌프시스템의 경제성을 분석하기 위해 실험장치를 제작하였다. 압축기는 미국 Tecumseh Products Co. 제품으로 정격출력 7.5kw의 완전 밀폐형을 사용하였고, 廢水熱熱交換器인 증발기는 관내에 냉매가 가득차서 흐르는 만액식으로 하고 전열관은 나선형 코일(coil)로 하여 廢水槽에 완전히 침전되도록 설치하여 전열관의 내부에는 작동유체를 통과시키고 외부에는 폐수가 직접 접하도록 하였다. 전열관은 열원인 폐수인 오염물질 및 이물질의 함유에 따른 부식의 악영향을 피하기 위하여 돌기(fin)가 전혀 없는 일반 동관(KSD 5301)을 이용하였으며 내부식성을 향상시키기 위해 외부표면에 두께 0.05mm로 크롬(Cr)을 도금하였다. 증발기를 거쳐 나온 작동액의 증기만이 압축기로 흡입되도록 기액분리기를 설치하고 압축기 출구

에는 기름(Oil separator)을 설치하여 전열성능의 저하를 방지하도록 하고, 열원의 특성을 고려하여 일반구조의 열펌프 시스템의 성능을 향상시킬 수 있도록 다수의 細管을 이용한 2중 관식 熱交換器 형태로 되어 있는 특수한 구조로 설계하였고, 교축용 모세관(Capillarytube)을 감열식 팽창밸브와 병렬로 설치하여 각각에 대한 성능을 비교·분석하였다.

응축기는 Shell & Tube형으로 하고 전열관은 동관을 사용하였고, 전열관의 내면에는 난류유동을 형성하여 열전달율을 향상시키도록 하기 위하여 선형 교반기(mixing element)를 삽입하였다.

4.2 性能實驗裝置 및 方法

熱펌프 시스템의 구조는 응축기로부터 응축열을 회수·저장하기 위한 축열조(0.8m³)를 설치하고, 증발기에 일정한 조건의 熱源을 공급하기 위한 열원공급장치를 설치하여 15℃ 및 20℃의 온수를 공급하였다. 축열조내의 물은 직접 응축기내를 순환하면서 응축열을 회수하도록 하였으며, 열원공급장치는 증발기에서 빼앗긴 열량을 보충하기 위한 전기 Heater(9kw) 및 냉동기(3RT)를 갖춘 수조(Water Bath)와 여기에서 만들어진 열원수를 저장하는 용량 0.5m³인 2개의 열원수 저장탱크로 구성되어 있다.

한편, 熱펌프의 성능을 파악하기 위한 자료를 수집하기 위하여 압축기 입출구의 압력·온도, 증발기 입출구의 온도, 팽창밸브의 입출구 압력, 응축기 입출구의 온도 및 축열조의 온도를 측정하였으며, 시스템의 보호를 위한 과부하 보호장치를 압축기에 설치하였다.

온도는 미국의 OMEGA Engineering Inc.에서 제작한 직경 약 0.12mm(AWG. 36)인 T-type의 열전대(Termocouple)를 사용하였으며, 압력은 미국의 Setra System Inc.에서 제작한 Turbine Flowmeter(FLSC-28)를 사용하였다.

이들 센서(Sensor)로 부터 자료를 받는 Data Logger는 Datascan 7000(제작:영국 Measurement System Ltd.)과 A/D, D/A Converter를 사용하였다.

熱펌프의 냉·난방 능력과 성적계수는 압축기, 熱交換器의 성능 뿐만아니라 熱源 등 시스템의 운전조건에 의해 많은 영향을 받기 때문에 증발기에 공급하는 熱源의 공급온도와 응축기의 응축수 출구온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하는 것이 좋으며, 축열조 熱펌프에서는 축열조내의 물을 난방에 필요한 일정한 온도이상으로 올릴 수 있어야 한다.

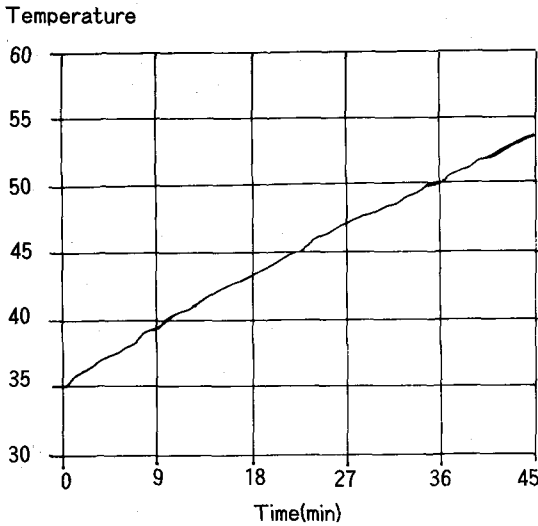
본 실험에서는 熱펌프시스템을 제작하여 실제 현장에 적용하기 때문에 증발기에 공급하는 열원의 온도만을 일정하게 유지시키는 간이적인 방법을 사용하였다. 따라서 熱源의 온도와 비슷한 조건으로하기 위해 증발기에 공급하는 熱源의 온도는 15℃를 유지하도록 하고, 초기온도는 각각 35℃, 40℃인 축열조내의 물을 응축기에 계속 순환시켜 축열조의 온도가 약 50℃에 달할 때까지 소비된 적력량을 Energy Analyzer로서 측정하여 성적계수를 구하였다.

4.3 實驗結果 및 分析

[그림 4]는 온도 15℃인 熱源을 40[l/min]의 유량으로 증발기에 공급하고 축열조내의 초기온도가 35℃인 상태에서 특수하게 제작한 모세관을 사용하여 熱펌프시스템을 운전하였을 경우의 축열조내 온도변화를 나타낸것이다.

[그림 5]는 증발기에 공급하는 熱源의 조건을 위와 동일한 상태로 유지하면서 축열조내의 초기온도를 40℃로 하여 운전하였을 경우에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 팽창밸브를 사용한 경우이다. 이상과 같은 각각의 조건에서 용량 0.8m³인 축열조내의 물을 가열할 때 시스템이 소비한 소비전력량을 기준으로 한 성적계수를 살펴보면 다음과 같다.

<그림 4. 열펌프의 성능(열원 15°C, Capillary Tube)>



<그림 5. 열펌프의 성능(열원 15°C, Expansion Valve)>

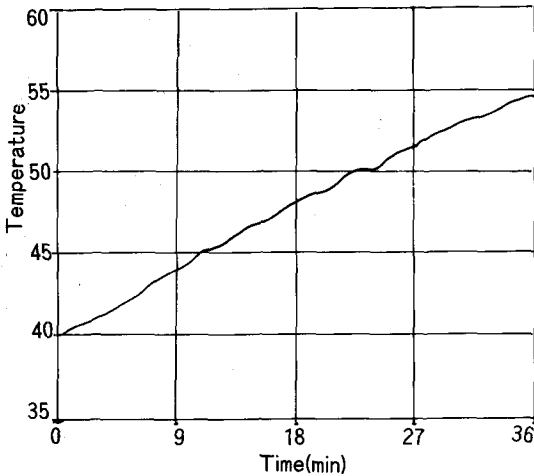


그림 4에서 초기온도 35°C로부터 53.5°C까지 가열하는데 걸린 시간은 약 45분이었으며, 이때의 소비전력은 5.1[kw]였다. 따라서 이것을 성적계수로 환산하면 3.6이다.

또한 그림 5에서 초기온도 40°C로부터 53°C까지 가열하는데 걸린시간은 약 35분으로 총 4.0[kw]의 전력을 소비하여 성적계수는 3.0이 되는 것으로 나타났다.

본 시스템의 경제성을 평가하기 위해 화석에

너지를 사용하는 석유보일러의 효율을 90%라 하고, 열펌프에서 소비되는 전기에너지의 효율을 1차원에너지 기준 35%(석유 화력발전 효율)로 할 때 열펌프가 보일러에 비해 경제성을 갖기 위해서는 COP > 2.6이 되어야 한다. 따라서 이러한 실험결과로 비추어 볼 때 폐수열원 열펌프시스템은 경제성이 높은 시스템으로 구성이 가능할 것으로 판단된다.

5. 結論

生活廢水熱을 熱源으로 하는 熱펌프시스템의 利用效果를 제시함으로써 각종 都市 未活用에너지의 重要性을 인식시키고 에너지절약을 극대화하여 세계적인 에너지환경에 대응할 수 있는 효과적인 방안을 모색하기 위한 궁극적인 목표를 달성하는데 필요한 기초기술의 기반을 마련하기 위해 제작한 시스템의 시험운전자료를 중심으로 분석한 결과 성능계수(난방시) 3~3.5인 비교적 경제성이 있는 시스템의 구성이 가능하다. 이것은 발전효율 35%, 보일러효율 90%를 한 경우를 기준으로 할 때 하여 충분히 경제성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

또한 시스템의 설계에 필요한 廢水熱源의 特性을 파악하기 위해 선정한 아파트단지에서 배출되는 廢水熱의 배출온도는 난방기 13°C~18°C, 냉방기 20°C~28°C의 온도분포를 갖고 있는 것으로 조사되어 열펌프시스템 설계시 기준온도로 사용할 수 있으며, 또한 廢水熱 熱交換器의 형태로 하여 설치비를 절감시키고, 유지·보수비를 절감시켜 경제성을 한층 더 높일 수 있다.

우리보다 먼저 폐수열을 열원으로 이용한 선진국에서 실시한 환경오염에 미치는 개선효과의 분석에 따르면 석유용 보일러에 비해 CO₂는 68%, NO_x는 75%의 감소효과와 약 30%의 에너지 절약효과를 나타내고 있어 이들 에너지에 대한 유효이용의 중요성을 짐작할 수 있다.