

산업폐수 열원이용 GHP 기술

대구염색산업단지 염색폐수의 특성과, 이를 열원으로 이용하는 GHP 시스템에 대해 소개하고자 한다.

박성룡

한국에너지기술연구원 미활용에너지연구팀 (srpark@kier.re.kr)

개요

우리 나라의 에너지소비량은 연간 240억불(2000년 기준) 이상으로 이중 약 97% 를 수입에너지에 의존하고 있는 실정이며, 산업화의 확산에 의한 에너지고갈 및 온실가스 규제 등 국제적인 환경보호 노력으로 인하여 에너지 절약에 대한 관심이 날로 증가하고 있다. 에너지는 주택의 난방으로부터 교통 및 모든 산업 분야에서 사용되고 있으며, 이 중에서도 염색산업은 공정특성상 다량의 증기와 고온수가 필요한 에너지 다소비 산업으로서, 에너지 절약을 위한 노력이 절실히 요구되는 산업이다. 특히, 국내 최대 규모의 염색단지인 대구염색산업단지내에는 약 115개 업체가 입주해 있으며, 이 중 2차단지 입주업체에서는 자체 보일러에서 생산한 증기를 이용하여 직염, 날염, 사염 등을 생산하고 있는데, 제조원가중 에너지비용이 매우 크므로 에너지절감 방안에 대한 관심이 매우 높은 실정이다. 한편, 염색가공은 정련, 감량 등의 처리공정을 통해 조업, 생산되는데, 이 공정과정에서 다량의 폐수가 발생되고 있으며, 배출된 폐수는 각 공장의 저류조에 집수되어 공동폐수처리장으로 방류된다. 염색가공공정은 각 업종마다 처리공정이 다르고 각 공정에 따라서 폐수의 양, 수질 및 수온이 다르게 배출되고 있으나 저류조에서의 폐수배출온도는 연평균 약 40℃ 정도이며, 폐수배출량도 연간 2.9×10^7 톤으로서 공장에서 폐수방류시의 발생하는 폐열량은 대구광역시의 공업용수의 평균온도인 약 18℃ 를 기준으로 할 경우 약 64,540TOE/년이므로 막대한 양이 버려지고 있다. 이상과 같이 염색가공공정은 에너지 다소비형이며, 염색조업을 수행하는 과정에서 저온의 폐수가 다량으로 발생하고 있지만, 대부분의 업체에서 폐수가 갖는 열에너지는 미활용되고 있을 뿐더러,

방류시 폐수온도가 40℃를 초과할 때에는 업체에서 부과금을 지불해야 하므로, 공동폐수처리장으로 방류하기 전에 강제 냉각시키고 있는 실정이다.

따라서, 염색업체 별로 열펌프와 같은 열회수장치를 설치하여 발생하는 저온폐수열을 회수하여 공정용 온수나 급수가열 등으로 활용하면, 연료사용량을 절약함과 동시에 강제 냉각비용 또는 고온부과금 부담도 없애고 이산화탄소 배출량 감소로 환경보전에도 기여할 수 있다.

본 고에서는 염색단지 입주 업체들의 특성을 고려하여 대전력의 수전설비를 필요로 하지 않으며, 증기 및 고온수 제조에 엔진 배열을 활용할 수 있는 염색폐수 열원 GHP 시스템을 적용하는 경우의 시스템의 연구개발을 중심으로 시스템의 구성 및 성능, 경제성, 그리고 확대보급방안 등을 중심으로 기술하고자 한다. 현재 제작된 GHP시스템은 예비 성능실험을 완료한 후, 대구염색산업단지 현장에 설치중이며 성능평가를 앞두고 있다.

산업폐수의 특성

전술한 바와 같이, 본 연구의 목적은 대구염색산업단지 염색폐수의 폐열을 이용한 GHP 시스템의 개발에 있기 때문에 폐열원인 염색폐수의 배출량 및 폐수의 온도는 본 연구에서 폐열회수를 위해 적용하고자 하는 열펌프를 이용한 폐열회수시스템의 적용가능성, 적정 규모의 도출 및 시스템 구성 방안을 마련하기 위해 가장 먼저 검토해야 할 사항이다. 이를 위하여 대구염색산업단지의 각 입주업체에서 배출되는 폐수의 계절별 평균 배출량과 온도를 조사하고, 이를 기초로 하여 폐수배출량 및 온도분포를 분석하였으며, 또한 염색업체의 생산품목을 폴리에스테르, 나일론, 교

직물, 사염 및 나염 등으로 분류하여 각 업종별로 계절별 평균 폐수배출량과 폐수온도를 분석하였다.

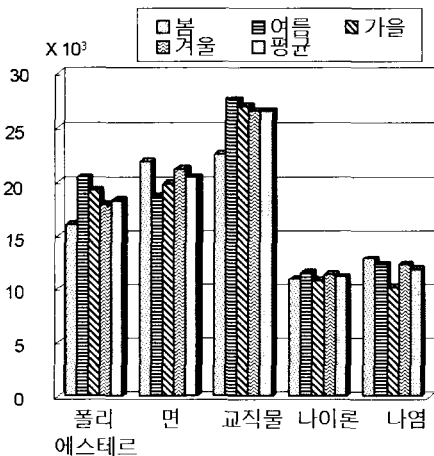
그림 1과 그림 2에 각각 2차단지 입주업체의 생산품목별, 계절별 평균 폐수배출량과 폐수온도를 나타내었다. 동일한 생산품목의 경우 계절별 평균 폐수배출량에서 큰 차이가 나타나지 않지만 생산품목별로는 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 교직물>면~폴리>날염~나일론의 순으로 폐수 배출량이 많았다. 각 생산품목에 따른 폐수온도를 살펴보면, 면과 나일론 염색업체의 폐수온도가 높았으며, 폴리에스테르, 교직물, 날염 업체의 폐수온도가 약간 낮게 나타났다. 특히, 면 염색업체는 계절별 평균폐수온도가 50℃ 이상으로 가장 높게 나타났다. 폐수온도에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 예상되는 염색온도를 품목별로 살펴보면 폴리에스테르가 130℃ 정도, 나일론이 90~95℃, 면이 40~50℃로 폴리에스테르의 염색온도가 가장 높고 면의 염색온도가 가장 낮다. 그럼에도 불구하고 면과 나일론 염색업체의 폐수온도가 높은 것은 염색온도의 영향 외의 다음과 같은 요인 때문이다. 상기 폐수의 온도는 냉각탑을 거친 후의 폐수의 온도로서 냉각탑의 용량, 성능에 의해서 폐수의 온도가 다를 수 있다. 또한, 폴리에스테르 관련 대부분의 업체에서는 염색폐수의 열을 회수하고 있는데 반해 나일론과 면의 경우는 폐열을 회수하지 않고 있다. 특히, 각 업체에서 배출되는 폐수는 생물학적 폐수처리설비가 갖춰진 공동폐수장에서 처리되는데 폐수의 온도가 너무 높을 경우 오염물질 제거율이 낮아 폐수온도에 따라 가중치를 정해 부과금이 산정되기 때문에 전술한 바와 같이 각 업체에서는 폐수온도를 낮추기 위한 노력

을 많이 하고 있다.

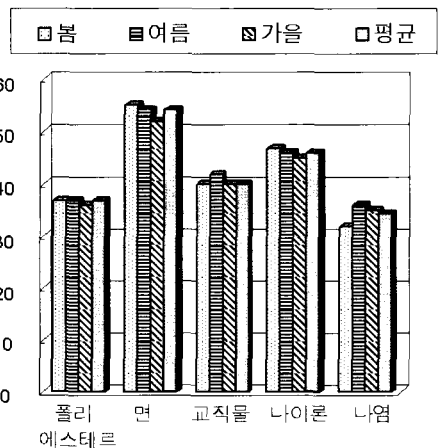
즉, 실제 GHP 폐열회수시스템의 열원으로서 사용되는 냉각탑 이전의 폐수온도는 그림 2에 명시된 온도에 비하여 다소 높을 것으로 판단된다.

염색가공 공정 및 시스템

염색폐수열이용 GHP 시스템을 적용할 시범 대상 업체는 대구염색단지의 염색종류와 생산품목에 범용성이 있어야 하며, 더불어 에너지 사용량이 많은 품목을 생산하는 업체가 바람직하다. 또한, 폐열원인 폐수의 특성으로는 투자비와 향후 보급효과를 고려하여 폐수배출량이 전체 염색업체중 중간 정도이고, 해당 폐수량의 분포가 많은 업체가 좋다. 이상과 같은 선정기준을 바탕으로 2차단지 입주업체중 가장 많은 업체에서 생산하는 염색품목인 교직물을 생산하고, 기존 설비와의 연계성도 좋으며, 업체의 대표가 폐열회수 및 에너지절약에 높은 관심을 갖고 있는 업체로서 우림산업을 시범 대상업체로 선정하였다. 우림산업의 주요 생산품목은 N/P MICRO직물, C/N, N/C교직물, TENCEL 가공직물 등이며, 열설비는 증기보일러, 열매체보일러, 초저욕비 염색기(air flow), 로터리 염색기, 정련기, 텐터 건조기 등으로 구성되어 있다. 조업시간은 1일 24시간으로 연간 325일을 가동하고 있으며, 보일러의 사용연료는 LNG로서 연간 총연료사용량은 3,574천Nm³(1999년도)이고 이것을 에너지량으로 나타내면 3,753 TOE에 해당된다. 주요 제품의 생산은 원료→표백→염색→건조→제품의 과정을 거치고, 주로 노동연관



[그림 1] 생산품목별, 계절별 평균 폐수배출량 (Ton/month)



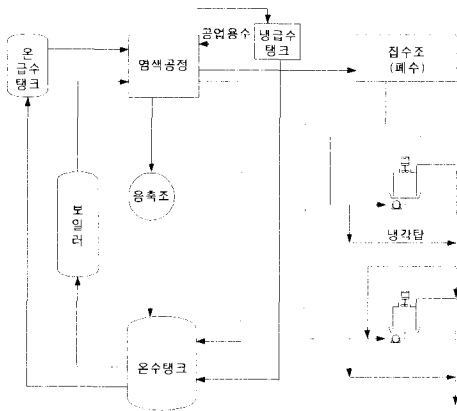
[그림 2] 생산품목별, 계절별 평균 폐수의 온도(°C)



보일러(8 ton/h)에 의해서 증기를 생산하여 염색기와 정련기로 공급하고 있다.

GHP 시스템 설치 이전의 염색가공공정의 온수 및 폐수의 흐름을 살펴보면, 그림 3에 나타난 바와 같이 공업용수가 정수기를 거쳐서 염색공정으로 공급될 수 있도록 냉급수탱크(50톤)가 옥상에 설치되어 있고, 염색 및 수세공정 중의 냉각을 위해 열교환기를 통과한 후 가열된 공업용수(약 55℃)가 지하 1층에 있는 온수탱크(1,000톤 용량)로 모이게 된다. 정련 및 수세과정에서 증기의 응축수가 응축수탱크(4톤)에 저장되어 다시 온수탱크로 이송되게 되어 있으며, 지하의 온수탱크에 모인 온수는 4층에 있는 온급수탱크(45톤)로 퍼올려서 중력으로 인한 자연낙하로 염색가공공정에 공급할 수 있도록 되어 있다. 이때 각 공정에서 사용되고 버려지는 폐수는 지하 1층의 집수조탱크에 모이게 되고, 집수조탱크에 모인 폐수는 하수처리장으로 버려지게 된다. 이 때, 하절기에는 40℃ 이상의 폐수를 배출하면 온도초과 부과금을 부담하게 되므로, 옥상에 설치되어 있는 오픈 채널을 거쳐서 직렬로 연결되어 있는 2기의 냉각탑(200RT)으로 보내어 40℃ 이하로 냉각시켜서 배출하고 있다. 또한, 증기보일러의 급수는 온급수탱크의 온수를 사용하고 있다.

GHP 시스템 구성 요소의 용량 결정 및 설계를 위하여, 시스템의 시범 적용업체인 우림산업의 계절별 폐수유량과 온도를 조사하였다. 폐수로 배출되는 양은 공업용수의 약 90%이며, 공업용수의 사용량은 약 32,475 톤/월이고, 폐수의 배출량은 약 29,228 톤/월이므로 하절기에 다소 사용량이 많으나 전체적



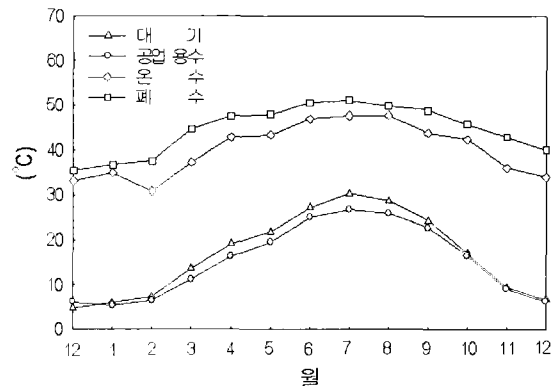
[그림 3] GHP 시스템 설치 이전의 염색가공공정의 온수 및 폐수의 흐름

으로 볼 때 연중 거의 일정하다고 볼 수 있다.

그림 4에 온수와 폐수, 그리고 공업용수의 월별 평균 측정 온도를 대기온도와 비교하여 나타내었다. 1년을 계절별로 동절기(12, 1, 2, 3월), 춘추절기(4, 5, 10, 11월) 및 하절기(6, 7, 8, 9월)로 분류하면 공업용수의 온도는 동절기에 약 6~10℃, 춘추절기에는 15~20℃ 그리고 하절기에는 25~30℃의 분포를 나타내고 연평균 약 18℃ 정도이며, 집수조에 모인 폐수의 온도는 40~50℃로서 계절별로 약간의 차이는 있으나 공업용수의 온도 변화에 비하면 변화폭이 크지 않다. 즉, 폐수의 유량과 온도가 연중 크지 않은 범위 이내에서 변화하므로, 열원으로서 매우 우수한 특성을 갖는다고 할 수 있다.

GHP 시스템 구성

이상에서 설명한 폐수의 열을 회수하기 위하여, 그림 5에 나타난 바와 같이 전처리 필터, 유로전환밸브(flow-diverter valve), 폐열회수 열교환기 등으로 구성된 GHP 열펌프 시스템을 구성하였다. 염색 공정의 특성상 가능한 한 높은 온도의 온수를 제조하는 것이 바람직하므로, 가능한한 냉매의 응축온도를 높이는 것이 좋다. 다만 기존의 공조용으로 많이 사용되는 냉매인 R-22로서는 응축압력이 너무 높아서 시스템의 안전상 문제가 발생할 수 있으므로, 본 연구에서는 고온에서도 비교적 응축압력이 낮고 R22보다 환경친화적인 R-134a를 열펌프의 작동유체로 사용하였다. 염색폐수는 열교환기 재질에 부식을 일으키는 성분과 오염을 일으키는 성분을 다량 함유하고 있으므로, 폐수를 열펌프의 증발기로 직접 유입시



[그림 4] 온수와 폐수, 그리고 공업용수의 월별 평균 측정 온도

키면 증발기의 재질과 내구성에 문제가 발생하므로, 폐열회수 열교환기를 별도로 설치하여 순환수를 이용하여 간접적으로 폐수열을 열펌프의 증발기로 전달시킬 수 있도록 하였다. 전처리 필터는 염색폐수의 고형물질 및 이물질을 걸러내기 위한 여과장치로서, 기본적으로 스크린(SUS316, 100mesh)을 사용하며, 걸러진 고형물 제거방식은 여과기의 입구측과 출구측의 압력차이를 센서가 감지하여 설정값 이상이 되면 전자밸브를 자동으로 개방하여 외부로 배출시키는 자동 역세척 여과방식이다. 이와 같은 사이클을 반복적으로 수행하여 후단에 설치된 열교환기 세정장치의 성능저하 방지를 위한 보조역할을 할 수 있도록 하였다.

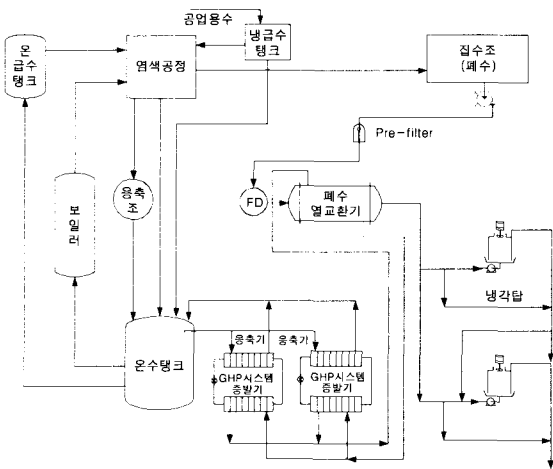
폐열회수 열교환기에서 가장 먼저 고려할 사항은 폐수의 특성에 따른 열교환기의 재질 선정이다. 이를 위하여 샘플을 채취하여 성분을 분석하였으며, 이에 대한 분석결과 열교환기 재질로서는 니켈이나 티타늄 등이 내식성에 있어서 유리하나 저급의 폐수열을 회수하는데 있어서 고가의 재질을 사용하기에는 경제적인 면에서 불리한 점이 많아, SUS316을 열교환기의 재질로 선정하였다. SUS316은 동관에 비해 내식성이 우수하므로, 부식을 일으키는 원인이 되는 열교환기 튜브내의 스케일이 생성되지 않도록 세정을 잘 하면 장기간 사용에도 큰 문제점이 없을 것으로 사료된다. 또한, 염색폐수에는 이물질 등을 다량 함유하고 있으므로 단기간 사용에도 쉽게 열교환기 표면에 오염물질이 부착되어 열교환기의 성능이 급격하게 떨어질 수 있다. 따라서, 이를 막기 위하여 브러

쉬형 자동 관 세척 장치가 적용된 원통-관형 열교환기로 하였다. 즉, 열교환기의 관 내에 염색폐수가 흐르고 원통측에는 순환수가 흐르도록 하였다. 이 때 염색폐수의 유동은 브러쉬가 왕복운동할 수 있도록 하기 위하여 유속이 최소 1.3m 이상이 되도록 하였다. 전처리 필터를 통과하여 큰 이물질이 제거된 염색폐수는 폐열회수 열교환기로 들어가는데, 이때 열교환기 튜브내에 삽입된 브러시가 튜브내벽에 스케일형성 방지를 위해 회전 왕복운동을 하도록 공급되는 열원수의 방향을 제어해주는 유로전환밸브를 통과하여 열교환기의 튜브내로 공급된다.

오염된 염색폐수가 관 내부로 장시간 흐르면 관 내벽이 오염되므로, 미리 결정된 일정 시간 간격마다 (일반적으로 8시간) 한번씩 유로전환밸브가 작동하여 오염된 열원수의 흐름 방향을 바꾸어 줌으로써, 열교환기 입구와 출구가 순간적으로 바뀌면서 열교환기 튜브의 양단에 설치되어 있는 catch basket 내부의 브러쉬가 관 내벽으로 통과하여 오염된 물질을 열교환기 밖으로 밀어낸다. 이와 같은 과정을 반복적으로 수행하여 폐열회수 열교환기의 오염을 최소화할 수 있도록 하였다.

압축기 및 열교환기 등의 용량은 각 계절의 온수조와 폐수조의 온도조건에 따라 표 1과 같이 압축기 요구 동력은 25 HP 이내, 염색폐수 회수열량(증발열량)은 약 80 kW 내외로 결정하였다. 압축기는 개방형 왕복동 압축기로 하였으며, 마그네틱 클러치(magnet clutch)를 통하여 엔진의 동력을 전달받을 수 있도록 하였다. 압축기 구동을 위하여, 운전 효율 및 수명 등을 고려하여 약 1800~2000 RPM에서 압축기 요구동력을 만족시킬 수 있는 LNG 엔진을 설치하였으며, 이는 LPG 엔진을 기본으로 하여 LNG 연료 공급시스템을 갖추고, 엔진의 배기 가스 폐열을 이용하여 온수를 제조할 수 있도록 제작된 연속최대출력 50 PS(@2000 RPM)의 V6 3.0 liter급 엔진이다.

그림 6에 GHP 시스템의 엔진 배열 회수 시스템 개략도를 나타내었다. 전술한 바와 같이, 온수조의 물은 GHP 시스템의 응축기를 거쳐 승온된 후, HX-3



[그림 5] GHP 시스템 설치 이후의 염색가공공정의 온수 및 폐수의 흐름

<표 1> 계절에 따른 GHP 시스템의 설계 용량

월	온수조 온도 [°C]	폐수조 온도 [°C]	압축기 요구동력 [kW]	염색폐수 회수열량 [kW]	COP
12, 1, 2	32.9	37.2	14.5	66.5	5.59
3, 10, 11	40.1	46.2	17.2	85.2	5.95
4, 5, 9	45.2	49.3	18.6	87.3	5.68
6, 7, 8	47.7	50.6	18.6	85.3	5.57



을 지나면서 엔진에서 발생하는 폐열을 이용하여 다시 승온된다. 엔진 배기 가스의 온도는 온수에 비하여 온도가 매우 높으므로, 좋은 열원이 될 수 있다. 또한, 엔진의 배기 가스와 엔진 냉각수를 열교환 시키기 위하여, 열전달 성능을 만족시키면서도 압력 강하를 최소화 할 수 있도록 자체 설계한 열교환기 HX-1과 Shell & plate type 열교환기 HX-2를 사용하였다. 이외에도, 엔진 예열을 위한 밸브 제어기, 그리고 혹시라도 발생할지 모를 이상 운전 상태에 대비한 엔진 과열 방지용 안전 열교환기 HX-4 등을 사용하여 엔진 배열 회수 시스템을 제작하였다.

성능실험 및 기대효과

이상과 같이 제작된 열펌프 시스템 및 엔진 배열 회수 시스템을 대구염색산업단지 현장에 설치하기에 앞서 충분한 시운전과 성능 검증을 위하여 예비 실험을 수행하였다. 실험조건은 각 계절의 온수조와 폐수조의 온도조건에 기초하여 실제 대구염색산업단지 현장에 준하는 조건으로 하였으며, 이를 실험 결과와 함께 표 2에 나타내었다. 실험은 엔진 및 압축기 회전수 1800 RPM에서 수행되었으며, 실험 결과에 따르면 계절에 따라 다르긴 하나 염색폐열로부터 약 74~80 kW의 열량을 회수 할 수 있으며, 엔진배열로부터 약 45~50 kW의 열량을 회수 할 수 있어, 약 73 kW의 LNG 입력에 대하여 약 140 kW의 온수가 열량을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 이 때, 생산되는 온수의 온도는 약 45~60℃의 분포를 갖는데, 이는 처음 온수조에서 나온 온수가 염색폐열을 이용하여 약 7~8℃ 승온된 후, 엔진배열을 이용하여 약

4℃ 승온된 결과이다. 증발기 출구 순환수 온도가 하절기에도 약 35℃ 수준까지 강하함에 따라, 고온부과금 절감 측면에서도 매우 유리한 것으로 나타났다.

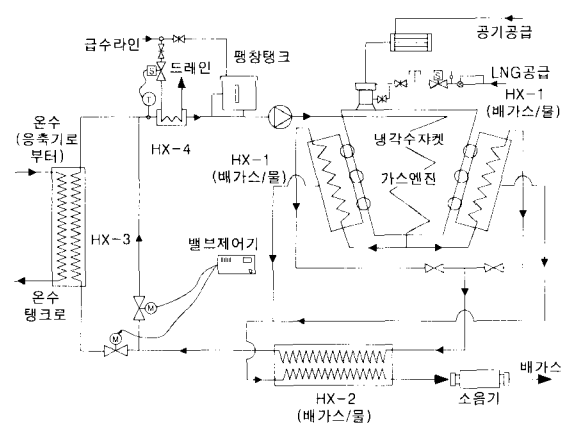
또한, 이상과 같은 염색 폐수열 이용 시스템의 설치효과를 경제적인 측면과 환경적인 측면에서 분석한 결과, 다음과 같은 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 초기투자비, 운전비용 및 보수유지비 등 모든 비용을 종합해서 현재가치로 환산하여 경제성을 평가하는 LCC(life cycle cost)에 의한 평가방법을 사용하여, 시설투자비에 대한 잔존가치율을 8.5%, 내용년수를 15년으로 보았을 때, 일반 보일러 방식에 대비한 염색폐수열이용 시스템의 경제성 분석 결과, 연간 운전비 절감액은 약 41,000 천원이며, 실제로 얻어지는 연간 절약비용은 연간 운전비 절감액에서 고정비 차액을 제외한 값인 연간 약 23,700 천원 수준일 것으로 기대된다. 또한, 환경적인 측면에서는 LNG 절약량을 에너지량으로 환산하여 연간 약 120 TOE를 절약할 수 있으므로, 사용연료인 LNG에 대한 탄소배출계수 0.637 TC/TOE를 적용하면, CO₂ 저감량은 연간 약 76 TC로 추정되어, 지구온난화 방지에도 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

맺음말

본 연구에서는 대구염색산업단지의 염색폐수를 열원으로 이용하여 염색 공정용 온수를 생산하는 GHP 시스템을 제작하기 위하여, 염색가공공정 및 염색폐수의 특성을 조사하였으며 시범 대상업체를 선정하

<표 2> 시스템 성능실험 조건 및 결과

월	12~2	3, 10, 11	4, 5, 9	6~8
증발기 입구 순환수 온도 [C]	30.9	38.9	43.0	45.0
증발기 출구 순환수 온도 [C]	21.8	29.0	33.2	35.3
응축기 입구 온수 온도[C]	33.1	38.9	43.9	48.0
응축기 출구 온수 온도 [C]	40.5	47.1	52.0	56.1
엔진배열 회수 후 온수 온도 [C]	44.8	51.0	55.8	60.0
염색폐열 회수열량 [kW]	73.72	80.42	79.65	78.76
응축기에서 온수가 얻은 열량 [kW]	86.19	95.31	94.93	94.91
엔진배열 회수열량 [kW]	50.30	46.02	44.67	45.88
총 온수 가열량 [kW]	136.49	141.33	139.60	140.79
LNG사용량 [kW]	71.96	71.87	72.76	73.99
LNG사용량 중 압축기 구동에 사용된 일량 [kW]	12.47	14.89	15.28	16.15
COPH	6.91	6.40	6.21	5.88
PER	1.90	1.97	1.92	1.90



[그림 6] GHP 시스템의 엔진 배열 회수 시스템 개략도

였다. 또한, GHP 시스템을 제작한 후, 실제 대구염색산업단지 현장에 준하는 조건으로 예비 성능 실험을 수행하여 약 45~60℃의 온수를 얻었다. 실험 결과 분석을 통하여 염색폐열로부터 약 74~80 kW의 열량을 회수 할 수 있으며, 엔진배열로부터 약 45~50 kW의 열량을 회수 할 수 있음을 알았다. 또한, 염색 폐수열 이용 시스템의 설치 효과를 분석한 결과, 온수가열에 필요한 에너지절감은 물론 폐수 냉각에 필요한 냉각탑 동력 절감의 경제적인 효과와 동시에 연간 약 76 TC의 CO₂ 저감 효과도 기대할 수

있을 것으로 사료된다. 다만, 시스템 제작을 위한 초기투자비용이 요구되므로, 확대 보급을 위해서는 초기투자비용 경감을 위하여 ESCO(에너지절약 전문기업)사업을 통해 추진토록 하거나, 에너지관리공단에서 지원하는 에너지이용합리화를 위한 자금지원을 이용할 수 있도록 하는 방안이 마련되어야 할 것이다. 아울러 본 폐열 회수 시스템을 중점적으로 보급할 능력있는 전문업체를 국가차원에서 지원, 육성하는 것이 바람직하다고 사료된다. ④