

염색폐수 열회수시스템 적용기술 분석

장기창* · 박성룡* · 이상남* · 라호상* · 박준택* · 함성원** · 박영태**

*한국에너지기술연구원 미활용에너지연구팀, **경일대학교 화학공학과

An Analysis of the Application Technology of Heat Recovery System from Dyeing Wastewater

Ki-Chang Chang*, Seong-Yrong Park*, Sang-Nam Lee*, Ho-Sang Ra*,
Jun-Taek Park*, Sung-Won Ham** and Young-Tae Park**

*Unutilized Energy Research Team, KIER, **Department of Chemical Engineering, Kyungil University

요 약

염색가공공정은 에너지 다소비형이며, 염색조업을 수행하는 과정에서 약 40°C 정도의 열원폐수를 다량으로 방출하고 있지만 이를 회수할 수 있는 기술개발이 이루어지지 않아서 아직 미활용되고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 열원폐수의 열을 회수하여 이용할 수 있는 방안을 마련하기 위하여 먼저 염색공정의 특성을 고찰하고, 직물별, 공정별 에너지원단위를 조사한 결과 상대적으로 에너지원단위가 높은 T/C, T/R 교직물 업체나 폴리에스테르 염색업체에서 폐수열을 회수하여 이용하기에 적합한 것을 알 수 있다. 그리고 염색업체별, 계절별 폐수의 배출량과 온도를 조사한 결과 각 업체당 평균 폐수배출량은 20,470톤/월이고, 평균폐수온도는 41.0°C로 나타났다. 또한, 배관 침적, 폐쇄 등으로 폐열회수시스템의 안정적 운전이나 열교환기의 성능에 악영향을 끼칠 수 있는 SS의 경우 폴리에스테르 염색폐수가 가장 낮아 폴리에스테르 염색폐수가 폐열회수에 가장 유리할 것으로 판단되었다. 염색공장에서 기존에 사용하고 있는 시스템과 폐수열이용 시스템의 에너지단가를 비교해보면 폐열회수시스템에서 압축식 열펌프를 적용하면 에너지단가는 22.50원이 되어 매우 경제적이며, 증기생산을 위한 보일러 연료로 LNG를 사용하는 업체에 압축식 폐열회수시스템을 적용할 경우가 투자비 회수기간이 2.09년으로 경제성이 매우 우수한 것으로 나타나 열펌프시스템의 적용기술을 보급할 수 있는 기반을 마련하였다.

Abstract — A great deal of energy is necessary with emission of lots of wastewater in dyeing and finishing process, but heat recovery from wastewater is not introduced since its technology is not developed yet. In order to obtain the method utilizing hot water produced by heat source, that is, dyeing wastewater it was investigated the characteristics of dyeing and finishing process and energy basic unit. Energy basic unit of polyester/cotton (T/C), polyester/rayon (T/R) and polyester dyeing process are higher than that of the other process. The average quantity of wastewater for each dyeing company is 20,470 ton/month, the average temperature of wastewater is about 41°C. Because the SS solution of wastewater in polyester dyeing process is lower than that of the other process, the effect of corrosion in heat recovery system is low. Since the energy price for 1000 kcal produced by vapor compression heat pump is presumed to be 22.50 won, it is found to be very economic heat recovery system, and its payback is 2.09 years for the factory with LNG boiler.

1. 서 론

우리나라의 에너지소비량은 연간 240억불 이상으로 이중 약 97%를 수입에너지에 의존하고 있어 에너지 고가의 시대를 맞이하여 에너지절약에 적극적인 대응은 무

역수지 개선은 물론이고 고에너지 산업의 경쟁력 향상에 크게 기여할 수 있다. 염색산업은 공정특성상 다량의 증기와 고온수가 필요한 에너지 다소비 산업으로 원가절감에 의한 경쟁력 향상을 위해서는 에너지사용량 절감을 위한 노력이 절실히 요구되는 산업이다. 염색가공

공정은 정련, 감량 등 처리공정을 통해 조업, 생산하고 있는데 이 공정과정에서 다량의 폐수가 발생되고 있으며, 배출된 폐수는 각 공장의 저류조에 집수되어 공동 폐수처리장으로 방류된다. 염색가공공정은 각 업종마다 처리공정이 다르고 각 공정에 따라서 폐수의 양, 수질 및 수온이 다르게 배출되고 있으나 저류조에서의 폐수 배출온도는 연평균 약 40°C 정도이며, 대구염색산업단지 경우 폐수배출량도 연간 2.9×10^7 톤으로서 막대한 양이 버려지고 있는 실정이다^{[11][2]}.

염색가공공정은 에너지 다소비형이며, 염색조업을 수행하는 과정에서 상온보다 약 20°C 이상 높은 폐수가 다량으로 발생하고 있지만 대부분의 업체에서 폐수가 갖는 열에너지는 미활용되고 있고, 방류시 폐수온도가 40°C를 초과할 때에는 업체에서 부과금을 지불해야 하는 실정^[12]이므로 공동폐수처리장으로 방류하기 전에 강제 냉각시키고 있다. 따라서 염색업체별로 열펌프(Heat Pump) 등과 같은 열회수장치를 설치하여 발생하는 저온폐수열을 회수하여 공정용 온수나 급수기열 등으로 활용하면 연료사용량을 절약하고 강제 냉각비용 또는 고온부과금 부담도 없게 되며, 이산화탄소 배출량 감소로 환경보전에도 기여할 수 있다.

산업체에서 배출하고 있는 고온의 폐수열에 대한 열회수는 구조가 간단한 폐열회수 열교환기를 사용하여 회수할 수가 있지만 50°C 이하의 폐수에 대한 열회수는 기계적인 구동장치, 즉 열펌프시스템을 이용하여야만 가능하다. 그러나 세계적으로 그동안 산업체에 적용할 열펌프시스템의 보급이 매우 부진한 이유는 원유가격의 하락으로 생산제품의 가격에서 에너지의 경제성에 대한 중요성을 감소시켰고, CO₂ 배출계수가 높은 저급의 유류를 사용하여 전기료에 비해 화석연료의 가격이 매우 낮게 책정되었다. 따라서 전기구동 열펌프의 관리수익성을 의미하는 COP는 매우 높아졌다. 또 하나의 보급장애는 수백kW인 크기에 있어서나 산업공정의 특별한 수요를 위해서나 모두 각각의 적용목적에 대해 일반적으로 설계 및 실행된 시설과 장치의 비규격화에 있다. 이것은 설계자와 설치자의 경험에 따라 신뢰성문제를 발생시킬 수도 있고, 더우기 무엇보다도 산업체에서 수용가능한 투자비의 단기회수기간을 고려하면 통상적으로 설치비용을 높게 하는 결과를 가져오게 된다는 것이다^[3].

이와 같은 장애에도 불구하고 최근의 적용사례를 보면 단지 에너지절약용이 산업용 열펌프를 선택하는 주요 이유가 아니라는 것을 알 수 있게 된다. 즉, 그것은 공정의 제어를 좋게 할 수 있고, 배출물의 오염감소, 폐열의 온도저감, 또는 냉각수이용의 절감 등이 가능하기 때문에 에너지절약이라는 주목적으로서가 아니라 부가적인 경제적 이득이 명백히 발생하므로 열펌프에 대한

적용가능성이 높아지고 있다^[4]. 또한, 최근에는 세계시장의 유가가 매우 불안정하게 움직이고 있고 고유가시대에 접어들고 있어서 에너지의 절약이 매우 시급한 문제이며, 온실가스저감에 대한 국제적인 관심이 높아지기 때문에 산업체에서도 CO₂ 배출계수가 낮은 고급의 천연가스를 사용하는 경우가 늘고 있어서 에너지의 비용을 줄이기 위해 버려지고 있는 폐열회수이용에 많은 관심을 가지고 있다.

염색산업단지에서도 염색폐수열을 회수하여 이용하고자 많은 노력을 기울여오고 있지만 염색폐수의 특성상 폐열회수시스템의 내구성과 성능을 확보할 수 있는 기술개발이 아직까지 이루어져 있지 않아서 대부분의 업체에서는 염색폐수열을 대기중으로 방출하고 있는 실정이다. 염색폐수열을 회수하여 유용하게 이용하기 위해서는 염색폐수열을 직접 회수할 수 있는 열교환기의 재질 선정과 고품질물체 및 열교환기 세정장치가 필요하고, 40°C 정도의 저온폐수를 이용해서 60°C 정도의 온수를 생산할 수 있는 열펌프시스템의 적용기술을 확보하여 보급할 수 있는 기반을 마련할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 염색폐수열을 회수할 수 있는 시스템의 적용기술을 분석하기 위해서 염색공장에서 배출되고 있는 폐수의 온도와 유량 등에 대한 조사와 이를 회수하기 위한 시스템, 즉 열펌프의 적용에 따른 경제성을 분석하여 보급에 대한 타당성을 고찰하고자 하였다.

2. 염색가공공정 분석 및 열원단위 선정

염색가공공정별 에너지원단위 선정은 에너지 관점에서 각 공정의 비중 및 염색가공공정의 에너지 소비형태를 파악하는데 중요한 역할을 한다. 직물의 종류에 따라 염색가공공정의 구성 및 각 단위공정에서의 에너지 소비형태도 다르기 때문에 염색직물별 공정에 대한 분석과 직물별, 공정별 열원단위를 살펴보면 다음과 같다^{[5][6][7]}.

2-1. 폴리에스테르 염색가공공정

폴리에스테르 염색가공공정중에 에너지사용 및 폐수 발생은 주로 Rotary Washer에 의한 정련 및 수세공정, 연속감량 공정 및 염색가공공정이다. 정련은 40~50°C의 온수를 증기로 가열하여 110°C에서 수행하고, 정련이 완료된 후에 정련수의 열은 냉각수로 회수하여 에너지효율을 높이도록 구성되어 있다. 회수되는 냉각수의 온도는 40~50°C 정도이며, 냉각에 의해 정련수의 온도가 60~80°C로 낮아지면 온수(또는 냉수)를 Overflow시켜 수세를 하고, 수세수의 온도가 40°C 이하로 내려가면 마지막 온수로 수세를 하게 된다. 정련과 수세가 완료된 직물은 탈수, 해포·연포 및 pre-setting을 거친 후 감

량을 실시한다.

감량에 필요한 열은 주로 열매체유에 의한 공기의 간접가열에 의해 공급되고, 일부 증기를 공급하여 연속감량기의 온도를 130°C로 유지한다. 감량과정에서 사용되는 NaOH를 씻어내기 위해 감량 후에는 수세를 실시하게 되는데 직물의 진행방향에 대해 향류로 수세수를 공급하며 1차수세수는 주로 온수를, 2차수세수는 온수 또는 냉수를 사용하고 수세수는 전량 폐수로 방출된다. 감량을 마친 직물은 고속염색기에서 염색이 되는데 염색수가 증기에 의해 단계적으로 가열되는데 보통 130°C까지 가열한다. 염색이 완료된 후에는 염색수의 현열을 회수하기 위해 냉각수를 투입하게 되는데 염색수가 약 60~80°C가 될 때까지 냉각시킨다. 냉각이 완료된 후에는 온수(또는 냉수)를 Overflow시키며 직물을 수세한다. Overflow가 완료되면 냉수로 최종 수세를 하고 최종 수세수는 전량 폐수로 배출된다. Overflow를 실시하지 않을 경우에는 온수세를 하고 난 후 냉수세를 실시한다.

2-2. Nylon 염색가공공정

Nylon의 염색이 폴리에스테르의 염색과 다른 점은 감량공정이 없다는 것이다. Nylon의 경우도 에너지를 주로 사용하고 폐수가 발생되는 공정은 정련과 염색, 수세공정이다. Nylon의 정련은 Rotary Washer대신 연속정련기를 사용하는데 정련수는 직물 yard당 약 0.875~1.125 kg(80,000 yds/일 생산량에 대해 약 70~90톤/일의 용수 사용)이 소요된다. 정련수의 약 50%는 냉수를 70~80°C로 가열하여 사용하고 50% 정도는 온수를 사용한다. 정련 후의 수세수는 전량 폐수로 배출된다. Nylon의 염색은 Jigger에서 수행되는데 염색수의 온도는 90~95°C로 가열되고, 염색 후에는 열회수를 하지 않아 폐수는 비교적 고온인 70~80°C로 방류되고 냉수세는 1~2회 실시한다.

2-3. 교직물(T/C, T/R) 염색가공공정

Polyester/Cotton(T/C)와 Polyester/Rayon(T/R) 교직물의 염색가공공정을 살펴보면 호발이 끝난 직물은 수세 및 실케트를 거쳐 정련표백, 염색 및 수세과정을 거치게 되는데, 특히 염색과정은 먼저 폴리에스테르 염색 후 면 또는 레이온의 염색을 하는 2단계 염색으로 진행된다. 먼저 수세 및 실케트는 연속수세기나 염색기에서 이루어지는데 두 공정에서는 40~50°C의 온수를 사용하고 사용된 온수는 전량 폐수로 배출된다. 특히, 실케트는 고농도 NaOH를 이용하여 수행된다. 수세와 실케트가 완료되면 연속정련기나 Rapid 염색기에서 정련표백이 이루어지는데 연속정련기를 사용할 경우에는 약 1.25~1.875 kg/yd, Rapid 염색기를 사용할 경우에는 약 1.33~

1.67 kg/yd의 정련수가 소요된다. 정련수는 온수 또는 용수를 증기로 80~90°C로 가열하여 사용하며, 정련 후에 정련수는 열을 회수하지 않고 70~80°C의 폐수로 배출된다.

염색은 먼저 폴리에스테르에 대해 실시되는데 염색과정은 폴리에스테르와 동일하다. 즉, 염색수는 공업용수를 증기를 사용하여 130°C까지 가열하고 염색이 완료된 후에는 염색수의 현열을 회수하기 위해 냉각수를 투입하게 되는데 염색수가 약 60~80°C가 될 때까지 냉각시킨다. 냉각이 완료된 후에는 온수(또는 냉수)를 Overflow시키며 직물을 수세한다. Overflow가 완료되면 냉수로 최종 수세를 하고 최종 수세수는 전량 폐수로 배출된다. Overflow를 실시하지 않을 경우에는 온수세를 하고 난 후 냉수세를 실시한다.

폴리에스테르의 염색 후에는 면이나 레이온의 염색이 이루어지는데 염색수인 공업용수는 증기를 이용하여 60~80°C로 가열하여 사용하고 염색 후에 폐열은 회수하지 않고 그대로 폐수로 배출된다. 2차염색 후에는 소핑과정이 필요한데 소핑수로는 온수사용도 가능하고 온수나 공업용수를 증기로 80°C 정도 가열하여 사용한다.

2-4. 교직물(N/C) 염색가공공정

교직물 중에서도 면과 나일론의 교직물(Nylon/Cotton, N/C)은 폴리에스테르 교직물인 T/C, T/R 교직물과는 염색가공공정에 차이가 있다. 정련, 수세 후 염색은 먼저 상온에서 면을 염색한 후 이어서 수세를 거친 후 Nylon을 염색한다.

정련 후 수세는 Nylon의 정련 후 염색과 마찬가지로 연속수세기에서 진행된다. 수세수는 증기를 이용하여 70~80°C로 가열하게 되는데 온수와 공업용수가 약 절반씩 사용된다. 염색은 먼저 면에 대해 염색하게 되는데 상온에서 염색하기 때문에 에너지는 소요되지 않는다. 면의 염색 후 수세는 약 50~60°C의 온수를 사용하고, Nylon 염색은 90~95°C에서 이루어지는데 염색수는 공업용수를 증기로 가열하여 사용한다.

2-5. 직물별, 공정별 열원단위 산정 및 비교

직물별, 공정별 특징을 고려하여 산정된 각 공정별 용수, 온수의 사용량 및 열원단위는 Table 1에 정리하였다. 정련 및 수세과정에서는 폴리에스테르가 가장 많은 열량이 소요되는데, 이는 폴리에스테르가 다른 직물에 비해 수세온도가 높을 뿐만 아니라 수세 수량도 많기 때문이다. 염색과정에서 소용되는 열량은 T/C, T/R 교직물이 가장 많은 것으로 산정되었는데, 이는 이들 교직물이 염색온도가 가장 높은 폴리에스테르 염색과 더불어 면과 레이온에 대한 2차염색 및 소핑과정이 추가되기 때문이다. N/C 교직물의 경우는 면과 나일론에 대해

Table 1. Energy input unit depending on dyeing clothes and process.

직물	공정별 수량 및 소요열량						평균열원단위 (kcal/yard)	
	정련, 수세			염색				
	수량 (kg/yard)	공급열량 (kcal/yard)	회수열량 (kcal/yard)	수량 (kg/yard)	공급열량 (kcal/yard)	회수열량 (kcal/yard)		
Polyester	4	240~280	120~200	1.33~1.67	150.3~203.7	66.5~117	185.0	
Nylon	0.875~1.125	23.2~35.5	-	1.2~1.4	87.6~121.8	-	163.4	
교직물	T/C, T/R	1.33~1.67	40~83.5	-	1.33~1.67	150.3~203.7(1차) 57.2~120.2(2차) 39.9~66.8(3차)	66.5~117	289.1
	N/C	0.875~1.125	23.2~35.5	-	1.33~1.67	97.1~145.3	-	150.1

2차염색을 실시하지만 면의 염색은 상온에서 실시되고 나일론의 염색은 폴리에스테르에 비해 낮은 온도에서 염색이 이루어지기 때문에 폴리에스테르 염색에 비해 작은 열량이 소요된다. 그러나 폴리에스테르의 염색 후에는 염색수의 열량을 일부 회수하기 때문에 회수열량을 고려하면 폴리에스테르 염색에 비해 N/C교직물의 염색이 더 많은 열량이 소요되는 것으로 파악되었다.

정련, 수세과정 및 염색과정에서 소요되는 모든 열량을 고려하면 T/C, T/R 교직물>폴리에스테르>Nylon>N/C 교직물의 순으로 평균소요열량이 높은 것으로 파악되었다. 그러나 폴리에스테르 염색과정에는 정련, 수세 후 감량과정에서 열매체유에 의해 공기를 가열하여 감량을 하고, 또한 이 과정에서 증기가 직접 사용되는 것을 고려하면 실제 폴리에스테르의 염색과정에서 소요되는 총열량은 Table 1에 정리된 것보다 높을 것이다. 감량과정에서 소요되는 열량은 직접 공업용수나 온수가열에 사용되는 것이 아니기 때문에 본 조사에서는 제외하였다.

표에 정리된 직물별 열원단위는 각 공정에 대한 표준 방식 또는 일반적으로 적용되는 공정 특성에 기초하여 산정된 열원단위이기 때문에 업체별로 동일직물이라 하더라도 실제 운전조건의 차이에 따라 열원단위는 다소 차이가 있을 수가 있다. 열원단위 산정결과 상대적으로 에너지 사용량이 많은 T/C, T/R 교직물 업체나 폴리에스테르 염색업체가 폐수열회수 대상업체로서 타당한 것으로 판단된다.

3. 염색공장 배출 폐수의 특성

3-1. 업체별, 계절별 폐수배출량 및 온도

폐열원인 염색폐수의 배출량 및 폐수의 온도는 폐열 회수를 위해 적용하고자 하는 열펌프를 이용한 폐열회수시스템의 적용가능성, 적정 규모의 도출 및 시스템 구성 방안을 마련하기 위해 가장 먼저 검토되어야 할 사

항이다. 따라서 염색업체에서 배출되는 폐수의 계절별 평균 배출량과 온도를 조사하고 이를 기초로 하여 폐수배출량 및 온도분포를 분석하였으며, 또한 염색업체의 생산품목을 폴리에스테르, 나일론, 교직물, 사염 및 나염 등으로 분류하여 각 업종별로 계절별 평균 폐수배출량과 폐수온도를 분석하였다.

3-1-1. 폐수배출량

Fig. 1은 염색업체의 월별 폐수배출량 분포를 나타낸 것으로서 20개 입주업체중 20,000톤/월 이하, 20,000~30,000톤/월 및 30,000톤/월 이상의 업체가 각각 8개(40.0%), 9개(45%) 및 3개(15%)로 나타났다. 10,000톤/월 이하의 폐수를 배출하는 소형업체의 비율도 20%이며, 40,000톤/월 이상의 폐수를 배출하는 대형업체는 없는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 2는 염색업체의 생산품목별, 계절별 평균 폐수배출량을 보여주고 있다. 동일한 생산품목의 경우 계절별 평균 폐수배출량에서 큰 차이가 없지만 생산품목별로는 큰 차이가 나타남을 알 수 있으며, 교직물>면>폴리에스테르>나염>나일론의 순으로 폐수 배출량이 많았다.

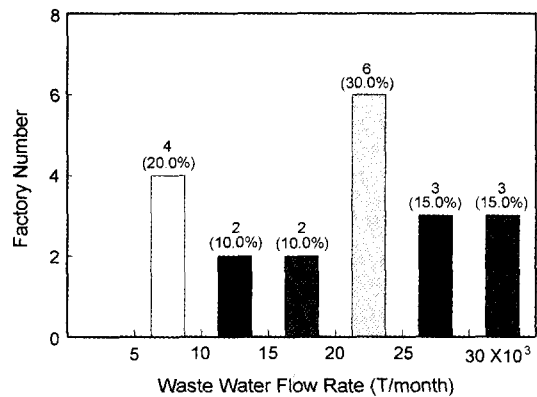


Fig. 1. Distribution of waste water quantities generated in dyeing factory.

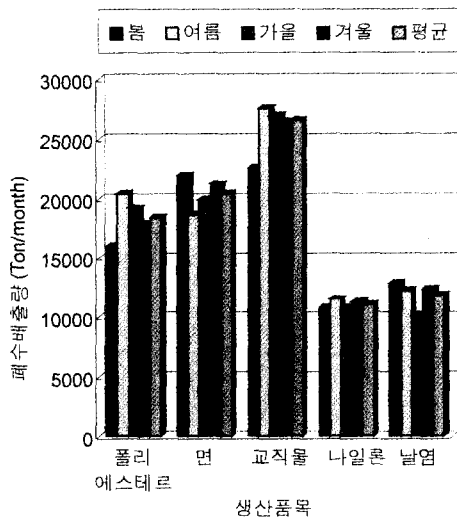


Fig. 2. Average waste water quantities depending on products and season.

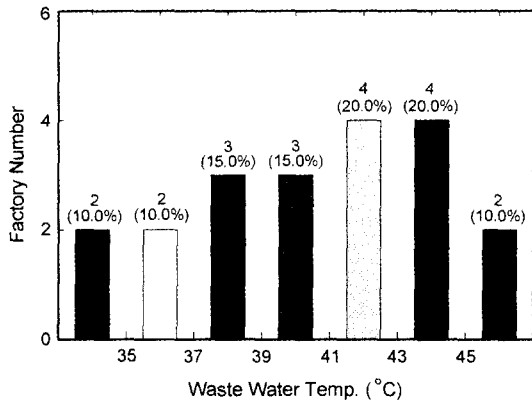


Fig. 3. Distribution of waste water temperature generated in dyeing factory.

3-1-2. 폐수온도

Fig. 3은 염색업체의 연평균 폐수온도의 분포를 나타내었다. 온도범위 33~47°C에 대해 2°C로 구간을 설정하여 폐수온도분포를 살펴본 결과 39~41°C를 중심으로 종모양의 분포도를 보이고 있으나 큰 차이는 나타나고 있지 않다. 또한, Fig. 4는 생산품목별로 구분하여 생산품목별, 계절별 평균폐수온도를 나타내었다. 여름철의 폐수온도가 가장 높고 겨울철의 폐수온도가 가장 낮게 나타났는데, 이는 계절에 따른 외기 온도의 차이에 따른 현상이다. 생산품목별로는 면과 나일론 염색업체의 폐수온도가 높았으며, 폴리에스테르, 교직물, 날염 업체의 폐수온도가 약간 낮게 나타났다. 특히, 면 염색업체는 제

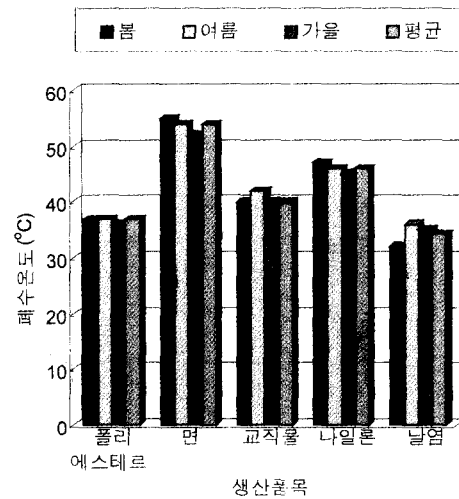


Fig. 4. Average waste water temperature depending on products and season.

질별 평균폐수온도가 50°C 이상으로 가장 높게 나타났다.

폐수온도에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 예상되는 염색온도를 품목별로 살펴보면 폴리에스테르가 130°C 정도, 나일론이 90~95°C, 면이 40~50°C로 폴리에스테르의 염색온도가 가장 높고 면의 염색온도가 가장 낮음에도 불구하고 오히려 면과 나일론 염색업체의 폐수온도가 높은 것은 염색온도의 영향 외의 다른 요인의 영향이 크기 때문으로 판단된다. 폴리에스테르의 염색온도가 가장 높기는 하나 대부분의 업체에서 염색폐수의 열을 회수하고 있는데 반해 나일론과 면의 경우는 폐열을 회수하지 않고 있어 비록 염색온도가 차이가 있다더라도 실제 폐수의 온도는 다를 수가 있다. 특히 염색 후 수세과정에서도 수세수를 Overflow시킬 때 사용하는 Overflow 수량의 차이에 의해서도 생산품목에 상관없이 업체별로 폐수의 온도 차이가 있을 수 있다.

3-2. 업종별 폐수 성상

염색폐수의 수질은 폐열회수시스템을 구성하는 열교환기 전단에 폐수처리장치 설치 필요 유·무 및 기계류, 배관류, 펌프류의 재질을 선정하는 기준을 확보하기 위해 검토되어야 한다. 고려된 폐수수질 항목은 알칼리도, COD, BOD 및 SS로 이들 항목은 각 업체의 폐수처리 부담금을 부과하기 위해 관리공단에서 측정하는 항목이다.

Fig. 5는 알칼리도를 보여주고 있으며, 면의 염색폐수가 1,286 mg/l로 가장 높고, 이어서 폴리에스테르와 교직물의 염색폐수의 알칼리도가 각각 788, 562 mg/l로 나타났다. 나일론과 날염 염색폐수의 알칼리도는 각각 309,

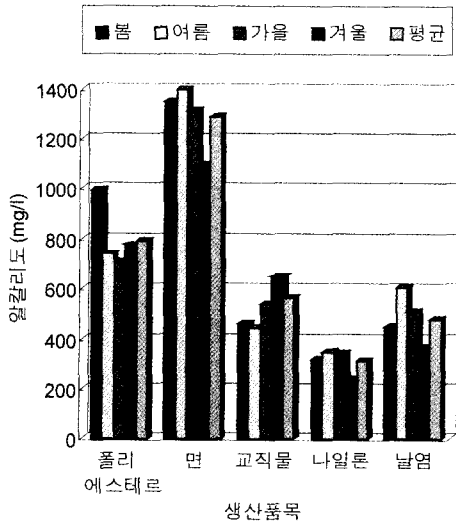


Fig. 5. Alkalinity of waste water depending on products and season.

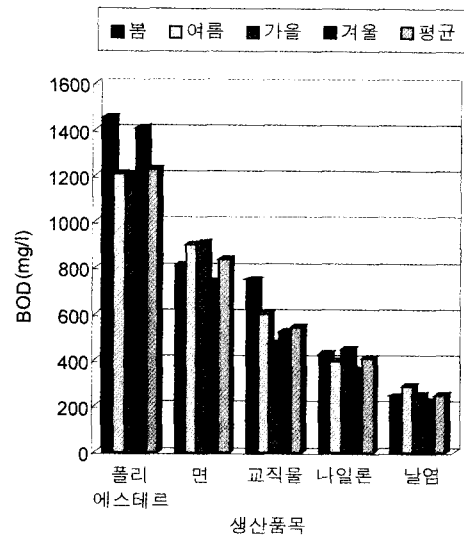


Fig. 7. BOD of waste water depending on products and season.

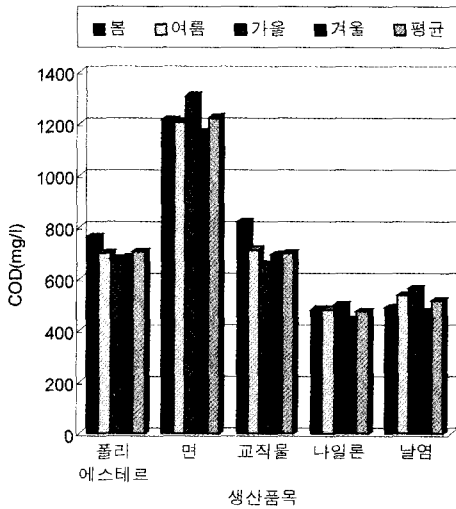


Fig. 6. COD of waste water depending on products and season.

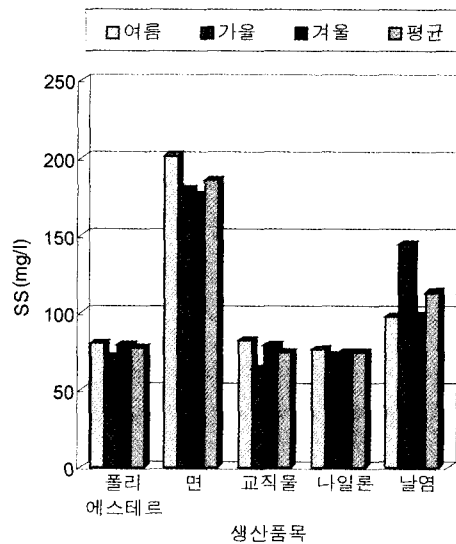


Fig. 8. SS of waste water depending on products and season.

481 mg/l로 낮게 나타났다. Fig. 6은 COD를 보여 주는 것으로 폴리에스테르와 교직물의 염색폐수의 COD가 각각 782, 562 mg/l로 비교적 낮은 값을 보였다. Fig. 7은 BOD를 보여주는 것으로 폴리에스테르 염색폐수의 BOD가 1,228 mg/l로 가장 높게 나타났으며, 나머지 품목은 교직물, 나일론, 날염 염색폐수의 순으로 BOD가 높았다. 폐수중의 SS는 열교환기나 배관에 침적물로 쌓여 부식을 일으키거나 열교환기의 경우 열전달 효율을 저하시키는 원인이 될 수 있기 때문에 폐수 성상으로 가

장 중요하게 고려되어야 할 항목으로 판단된다. Fig. 8은 SS를 보여 주는 것으로 폴리에스테르의 염색폐수가 다른 품목에 비해 낮은 값을 보이고 있으며, SS의 경우는 다른 수질항목과는 달리 날염 염색폐수가 다른 품목에 비해 높은 값을 보이고 있다.

이상과 같이 살펴본 염색폐수의 성상을 요약하면 수질항목별로는 특히 배관 침적, 폐쇄 등으로 폐열회수시

시스템의 안정적 운전이나 열교환기의 성능에 악영향을 끼칠 수 있는 SS의 경우 폴리에스테르 염색폐수가 가장 낮아 폴리에스테르 염색폐수가 폐열회수에 가장 유리할 것으로 판단된다. 그러나 폐열회수시스템에 폐수처리설비 설치의 필요성이나 적절한 재질 선정을 위해서는 여기에서 검토된 수질항목인 알칼리도, COD, BOD, SS 외에도 부식을 유발시키는 원인물질인 황산이온, 염산이온 및 이들 성분들의 함량에 간접적인 지표인 전도도 등에 대한 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 염색폐수열이용 시스템 경제성 분석

4-1. 열펌프에 의한 온수재가열 시스템의 구성

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 압축식 및 흡수식 열펌프를 이용한 온수재가열 시스템의 개략도를 나타내고 있다. 약 40°C의 염색폐수에서 폐열회수 열교환기로부터 열을 회수한 후 약 30°C 정도의 폐수로 배출하고, 이 열을 열원으로 하여 압축식 열펌프에 의한 온수재가열 시스템은 회수된 열로 50°C의 온수를 60°C로 가열($\Delta T=10^\circ\text{C}$)하며, 흡수식 열펌프를 이용한 온수재가열 시스템은 회수된 열로 50°C의 온수를 70°C로 가열($\Delta T=20^\circ\text{C}$)하는 것으로 시스템을 구성하였다.

폐수는 먼저 폐열회수 열교환기의 막힘과 전열면의 오

염을 방지하기 위하여 섬유층 제거장치 및 열교환기 세정장치로 폐열회수 열교환기의 성능 및 내구성을 향상시키고, 1차로 폐열회수 열교환기와 열펌프의 증발기를 흐르는 순환수로 열을 회수한 것이 열펌프의 열원으로 되어 증발기에서 냉매가 열을 흡수하여 증발하고 압축에 의해 고온의 증기로 만들어서 응축기로 전달시켜 냉매의 응축과정에서 발생하는 잠열을 이용하여 온수를 가열하는 것이다. 따라서 압축식 열펌프시스템은 스크류압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 구성되며 압축기의 구동은 전기모터를 사용하게 되고, 흡수식 열펌프시스템은 증발기, 흡수기, 응축기 및 재생기로 구성되어 증기가 구동열원으로 사용된다.

4-2. 열펌프에 의한 온수재가열 시스템의 경제성 분석

염색폐수열이용 시스템의 경제성 평가를 위해 폐수발생량이 약 1,000톤/일 정도의 업에서 폐열을 이용하여 온수를 생산할 수 있는 시스템을 모델로 하여 평가하였다. 이때 열펌프시스템의 기본모델은 열회수용량이 417,000 kcal/h로서 압축식 열펌프시스템에서는 온수가열량이 504,000 kcal/h(압축기용량 150 HP)이며, 흡수식 열펌프시스템에서는 온수가열량이 1,112,000 kcal/h이다. Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이 구성되는 압축식 및 흡수식 열펌프를 이용한 온수재가열 시스템의 투자비는 각

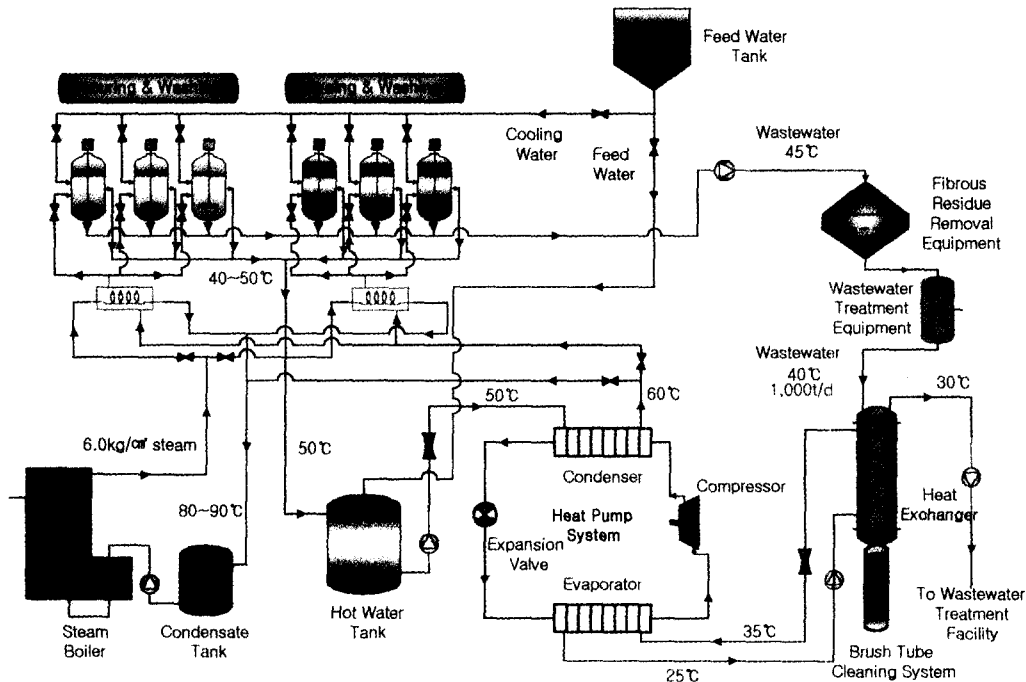


Fig. 9. Schematic diagram of hot water making system by vapor compression heat pump.

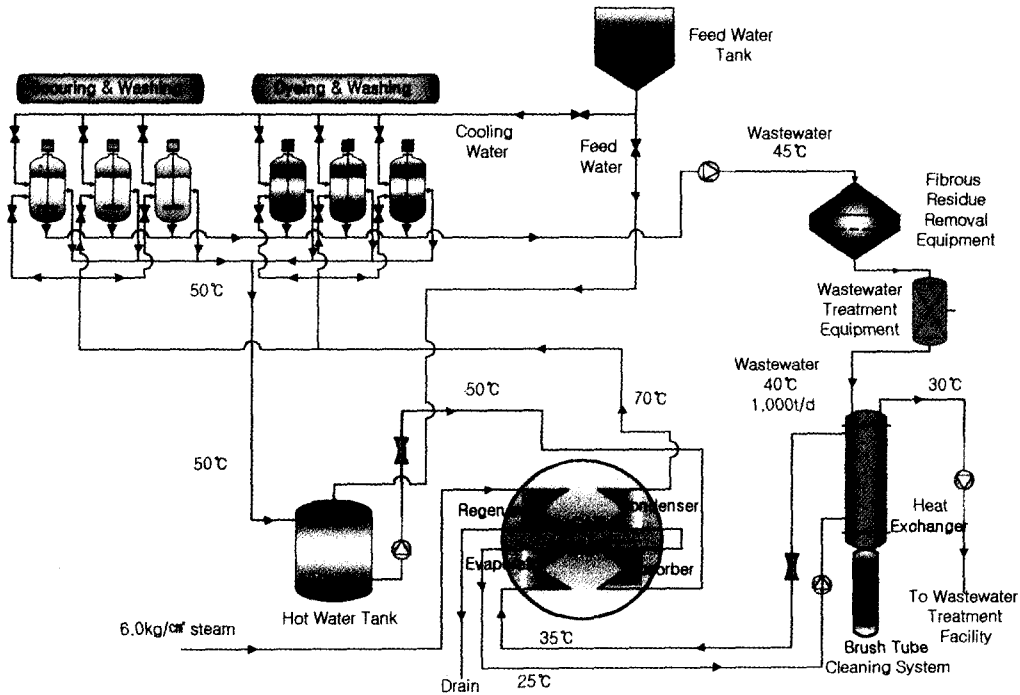


Fig. 10. Schematic diagram of hot water making system by absorption heat pump.

각 186,000천원 및 221,900천원으로 산정되었다. 주요 구성은 열펌프시스템을 비롯하여 폐열회수 열교환기, 열교환기 세정설비, 섬유층 제거장치, 각종 펌프 및 탱크로 이루어졌으며, 투자비에는 자동제어시스템을 포함한 전기공사비 및 배관공사비가 고려되었지만 시설투자에 따른 간접비는 제외시켰다.

기본조건으로 폐수유량은 1,000톤/일, 공장가동일수를 27일/월로 하였고, 열회수에 의한 에너지 절감비용을 산정하기 위하여 증기의 압력은 6 kg/cm²으로 하였으며, 2차단지 입주업체에서 증기 생산을 위해 가동중인 보일러의 열효율은 82%로 하였고, 흡수식 열펌프의 경우는 구동용 증기를 생산하기 위하여 1.5톤 용량의 증기보일러를 추가로 설치하는 것으로 하였다. 폐열회수시스템의 열펌프는 압축식의 경우 성적계수(COP)를 5.5, 전동기 효율은 95%로 설정하였고, 흡수식 열펌프의 경우는 성적계수(COP)를 1.6, 구동열원인 증기의 압력을 6 kg/cm² (658 kcal/kg)로 설정하였다. 그리고 현재 염색산업단계에 자체적으로 공급하는 증기보일러의 사용연료를 BC유와 LNG를 비교하여 경제성을 평가하였다.

5-2-1. 기본조건

- 염색폐수유량 : 1,000 T/d (41.7 T/h) -- 24시간 가동
- 폐수온도 : 40°C -> 30°C (dT=10°C)
- 폐수회수열량 :

$1000 \times 1000 \times 10 = 10 \text{ Gcal/일} = 270 \text{ Gcal/월}$

- 공장가동일수 : 연 325일(27일/월)
 - 매월 2일 휴무, 신정, 설날, 하계휴가, 추석 등 휴무를 고려함.
 - 전력요금
 - 적용기준 : 산업용 '병'(1,000 kW 이상), 선택 II, 고압A 기준
 - 전력기본요금 : 4,920원/kW, 전력량요금(년평균) : 47.40원/kWh (부가세 별도)
 - 보일러효율 : 82%
 - BC유(중유)
 - 발열량 : 9,900 kcal/l
 - 가격 : 326.97원/l(0.5%, 부가세 별도)
 - 도시가스(LNG)
 - 발열량 : 10,500 kcal/Nm³
 - 가격 : 353.85원/Nm³(산업용 기준, 부가세 별도)
 - 할인율 : 연 8.5%
 - 고정비율(FCR)
- 5-2-2. 폐열회수시스템
- 1) 압축식 열펌프
 - 온수온도 : 50°C -> 60°C (dT=10°C)
 - 열펌프 COP ≃ 5.5
 - 전동기 효율 ≃ 95%

- 온수가열량 : 504,000 kcal/h = 0.766 T/h(steam)
- 온수유량=50.4 T/h=1,210 T/d
- 압축기소비동력=91,720 kcal/h=106.6 kW= 151.3 HP
- 시스템 가격(시설공사비 포함) : 186,000천원
- 시스템 내구년수 :
 - 압축식 열펌프시스템 : 15년
 - 폐열회수기(STS-316L) : 7년
 - Cleaning System : 10년
 - 배관 및 부대설비 : 15년

2) 흡수식 열펌프

- 온수온도 : 50°C -> 70°C (dT=20°C)
- 열펌프 COP = 1.6
- 구동증기압력 = 6.0 kg/cm²G (h_g=658 kcal/kg)
- 온수가열량 : 1,112,000 kcal/h
- 온수유량=55.6 T/h=1,334 T/d
- 흡수식 열펌프시스템 효율=131.2%
- 시스템 가격(시설공사비 포함) : 221,900천원
- 구동용 증기보일러(1.5톤) 설치비 : 24,970천원
- 시스템 내구년수 :
 - 흡수식 열펌프시스템 : 15년
 - 폐열회수기(STS-316L) : 7년
 - Cleaning System : 10년
 - 배관 및 부대설비 : 15년
 - 증기보일러 : 10년

5-2-3. 경제성 분석

경제성 평가결과 압축식 및 흡수식 열펌프에 의한 폐수열이용 시스템을 설치할 경우의 에너지단가와 투자비 회수기간을 Table 3과 Table 4에 정리하였다. 증기생산을 위한 보일러의 연료로 BC유 또는 LNG를 사용하고 있는데, 이들 연료의 발열량 기준 연료비에 차이가 있기 때문에 사용연료에 따른 투자비 회수기간을 별도로 산정하였다. 폐열회수시스템 설치에 따라 회수되는 폐열량을 증기 및 연료의 열량당 가격으로 나누어 증기 및 연료의 절감액을 산정하였고, 비용으로 전기사용에 따른 전력요금과 운전에 필요한 연료사용비 그리고 투자비에 대한 할인율과 내구년수를 고려한 고정비를 적용하였다. 이에 대한 결과로 열량 1,000 kcal를 얻는데 필요한 에

Table 3. Energy price per 1,000 kcal in heat recovery system.

에너지생산	사용연료	에너지단가 (원 /1,000 kcal)
기존 시스템	BC 유	44.30
	LNG	45.21
폐열회수 시스템	압축식 전기	22.50
	흡수식 BC 유	31.06
	LNG	31.57

너지단가를 기존 시스템과 폐수열이용 시스템과의 비교를 위해 구하였고, 투자비 회수기간은 초기투자비를 비용절감액, 즉 증기 또는 연료절감액에서 전력요금과 고정비를 공제한 값으로 나누어서 계산하였다^{[8][9]}.

Table 3에 나타난 바와 같이 에너지단가를 비교해보면 기존 시스템의 사용연료가 BC유인 경우 1,000 kcal를 생산하는데에 44.30원이 소요되며, LNG를 사용하는 곳에서는 45.21원이 소요되게 된다. 이때 폐열회수시스템에서 압축식을 적용하면 에너지단가는 22.50원이 되고, 흡수식을 적용하여 구동연료로 BC유를 사용하면 31.06원, LNG를 사용하면 31.57원이 소요되어 폐열회수시스템의 경제성이 매우 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 4에서와 같이 폐열회수 방식과 연료의 종류에 따라 투자비 회수기간이 달라지는데 압축식의 경우는 연료로 BC유와 LNG를 사용할 경우 투자비 회수기간은 각각 2.18년과 2.09년으로 LNG를 연료로 사용하는 경우가 BC유를 연료로 사용하는 경우보다 경제성이 높다. 이는 연료에 관계없이 동일한 폐열회수방식이기 때문에 전력요금과 투자비에 따른 이차비용과 감가상각비는 동일하지만 LNG가 BC유에 비해 발열량 대비 연료비가 1.1 배 정도 비싸므로 열회수에 따른 연료비용 절감액이 크기 때문이다.

같은 이유로 흡수식 열펌프를 이용한 폐열회수시스템의 경우도 연료로 BC유와 LNG를 사용할 경우 투자비 회수기간은 각각 2.66년과 2.58년으로 LNG를 연료로 사용하는 경우가 BC유를 연료로 사용하는 경우보다 경제성이 우수하다. 동일한 연료에 대해 비교하면 BC유를 연

Table 4. Economic evaluation and payback in heat recovery system.

폐열회수 시스템	사용연료	경제성 평가항목				
		증기(연료)절감액(A) (천원/월)	전력요금(B) (천원/월)	월간 고정비용(C) (천원/월)	절감비용(A-B-C) (천원/월)	투자비 회수기간
압축식	BC 유	14,469	5,237	2,110	7,122	2.18 년
	LNG	14,764	5,237	2,110	7,417	2.09 년
흡수식	BC 유	11,972		1,4552,787	7,730	2.66 년
	LNG	12,216	1,455	2,787	7,974	2.58 년

료로 사용하는 업체는 압축식과 흡수식을 적용할 경우 투자비 회수기간이 각각 2.18년과 2.66년으로 압축식 폐열회수시스템의 투자비 회수기간이 흡수식보다 짧게 나타났다.

또한, LNG를 연료로 사용하는 업체도 압축식과 흡수식을 적용할 경우 투자비 회수기간은 각각 2.09년과 2.58년으로 압축식이 흡수식 폐열회수시스템에 비해 투자비 회수기간이 짧아 경제성이 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 연료의 종류에 관계없이 압축식과 흡수식의 전력요금과 초기투자비에 대한 고정비의 차이는 동일하지만 흡수식 열펌프를 구동하기 위한 증기를 생산하는데 있어서 사용연료인 LNG와 BC유의 가격이 다소 비싸므로 압축식 열펌프시스템을 적용하는 것이 유리하게 나타나고 있다.

따라서 폐수열회수시스템을 설치할 경우 에너지가격의 변화에 따른 투자비 회수기간을 살펴보았다. Fig. 11은 기존에 증기보일러의 연료로 BC유를 사용하고 있는 업체에서의 에너지 가격변화에 따른 투자비 회수기간을 나타낸 것이고, Fig. 12는 기존에 증기보일러의 연료로 LNG를 사용하고 있는 업체에서의 에너지 가격변화에 따른 투자비 회수기간을 나타낸 것이다. 에너지가격을 현재를 기준으로 20% 및 10% 하락과 10% 및 20% 상승시의 변화를 나타낸 것인데 연료로 BC유와 LNG의 가격차가 크지 않기 때문에 투자회수기간은 크게 차이가 나지 않고 있다. 그러나 압축식과 흡수식을 비교해보면 에너지가격이 하락할수록 압축식의 투자회수기간이 짧게 나타나고 있으며, 연료로 LNG를 사용할 경우 에너지가격이 20% 하락하면 압축식의 경우 투자비 회수기간은 3.47년으로 길어지고, 흡수식의 경우도 3.72년으로 길어지게 된다. 또한, 에너지의 가격이 20% 상승하면 압

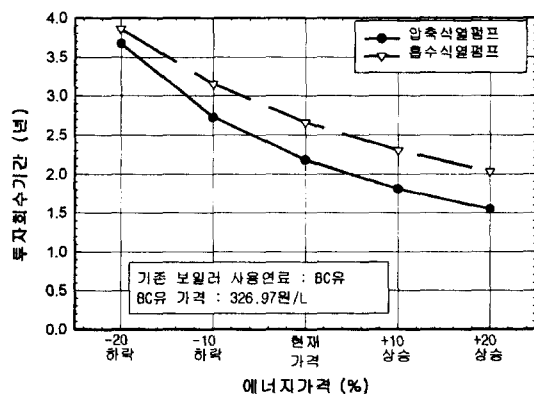


Fig. 11. Variation of payback depending on energy price in heat recovery system by contrast with BC oil boiler.

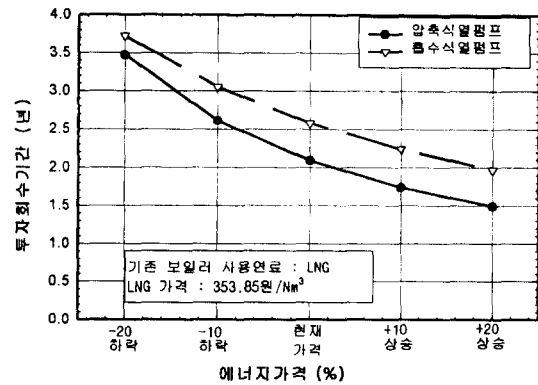


Fig. 12. Variation of payback depending on energy price in heat recovery system by contrast with LNG boiler.

축식의 경우 투자비 회수기간은 1.49년으로 낮아지게 되고, 흡수식의 경우는 1.97년으로 낮아지게 된다. 그러므로 에너지가격이 상승할수록 폐열회수시스템의 경제성은 좋아지게 된다.

6. 결 론

염색업체의 폐수열을 회수하기 위한 에너지 절약사업으로 열펌프를 이용한 폐수열이용 시스템의 기술적, 경제적인 적용 타당성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 에너지 관점에서 각 염색가공공정의 비중 및 에너지 소비형태를 파악하기 위하여 염색가공공정별로 열원 단위 산정을 하였으며, 직물의 종류에 따라 염색가공공정의 구성 및 각 단위공정에서의 에너지 소비형태도 다르기 때문에 본 연구에서는 염색직물별, 공정별로 열원 단위를 산정하였다. 염색직물은 폴리에스테르와 Nylon, 교직물로서 Polyester/ Cotton(T/C), Polyester/Rayon(T/R) 및 Nylon/Cotton(N/C)을 대상으로 하였다. 정련, 수세과정 및 염색과정에서 소요되는 모든 열량을 고려하면 T/C, T/R 교직물>폴리에스테르>Nylon >N/C 교직물의 순으로 평균소요열량이 높은 것으로 파악되었다. 따라서 상대적으로 에너지 사용량이 많은 T/C, T/R 교직물 업체나 폴리에스테르 염색업체가 폐수열회수 대상업체로서 타당한 것으로 판단된다.

2) 폐열원인 염색폐수의 배출량 및 폐수의 온도는 폐열회수를 위해 적용하고자 하는 열펌프를 이용한 폐열회수시스템의 적용가능성, 적정 규모의 도출 및 시스템 구성방안을 마련하기 위해 가장 먼저 검토되어야 할 사항이다. 염색업체에서 배출되는 폐수의 계절별 평균 배출량과 온도를 조사한 결과 각 업체당 평균 폐수배출량

은 20,470톤/월이고, 평균폐수온도는 41.0°C를 나타내고 있다.

3) 배관 침적, 폐쇄 등으로 폐열회수시스템의 안정적 운전이나 열교환기의 성능에 악영향을 끼칠 수 있는 SS의 경우 폴리에스테르 염색폐수가 가장 낮아 폴리에스테르 염색폐수가 폐열회수에 가장 유리할 것으로 판단된다. 그러나 폐열회수시스템에 폐수처리설비 설치의 필요성이나 적절한 재질 선정을 위해서는 본 연구에서 검토된 수질항목인 알칼리도, COD, BOD, SS 외에도 부식을 유발시키는 원인물질인 황산이온, 염산이온 및 이들 성분들의 함량에 간접적인 지표인 전도도 등에 대한 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4) 염색산업단지에서 기존에 사용하고 있는 시스템과 폐수열이용 시스템의 에너지단가를 비교해보면 기존 시스템의 사용연료가 BC유인 경우 1,000 kcal를 생산하는데에 44.30원이 소요되며, LNG를 사용하는 곳에서는 45.21원이 소요되게 된다. 이때 폐열회수시스템에서 압축식을 적용하면 에너지단가는 22.50원이 되고, 흡수식을 적용하여 구동연료로 BC유를 사용하면 31.06원, LNG를 사용하면 31.57원이 소요되어 폐열회수시스템의 경제성이 매우 높게 나타남을 알 수 있다.

5) 폐열회수 방식과 보일러 사용연료의 종류에 따라 투자비 회수기간이 달라지는데 압축식의 경우는 연료로 BC유와 LNG를 사용할 경우 투자비 회수기간은 각각 2.18년과 2.09년으로 LNG를 연료로 사용하는 경우가 BC유를 연료로 사용하는 경우 보다 경제성이 높다. 이는 연료에 관계없이 동일한 폐열회수방식이기 때문에 전력요금과 투자비에 따른 이자비용과 감가상각비는 동일하지만 LNG가 BC유에 비해 발열량 대비 연료비가 1.1배 정도 비싸므로 열회수에 따른 연료비용 절감액이 크기 때문이다.

6) 또한, 흡수식 열펌프를 이용한 폐열회수시스템의 경우도 연료로 BC유와 LNG를 사용할 경우 투자비 회수기간은 각각 2.66년과 2.58년으로 LNG를 연료로 사용하는 경우가 BC유를 연료로 사용하는 경우보다 경제성이 우수하다. 동일한 연료에 대해 비교하면 BC유를 연료로 사용하는 업체는 압축식과 흡수식을 적용할 경우

투자비 회수기간이 각각 2.18년과 2.66년으로 압축식 폐열회수시스템의 투자비 회수기간이 흡수식 보다 다소 짧게 나타났다. 그리고 LNG를 연료로 사용하는 업체도 압축식과 흡수식을 적용할 경우 투자비 회수기간은 각각 2.09년과 2.58년으로 압축식이 흡수식 폐열회수시스템에 비해 투자비 회수기간이 짧아 경제성이 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 연료의 종류에 관계 없이 압축식이 흡수식에 비해 유리하게 나타나고 있다.

7) 결론적으로 염색업체중 증기생산을 위한 보일러 연료로 LNG를 사용하는 업체에 압축식 폐열회수시스템을 적용할 경우가 투자비 회수기간이 2.09년으로 가장 짧아 경제성이 우수한 것으로 나타났다. 여기서 초기투자비는 직접비만을 고려한 것으로서 간접비를 포함시키면 이 보다도 투자비 회수기간이 좀더 길어질 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 벽산개발주식회사, “剩餘 廢熱利用 妥當性檢討(大邱染色工團)”, 에너지관리공단 (1995).
2. 박준택 외 10인, “미활용에너지 실태조사 및 이용방안 연구”, 대구광역시 (1998).
3. Lazzarin, R.M., “Heat Pumps in Industry-Equipment”, Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 14, No. 6, pp. 581-597 (1994).
4. 高田秋一, “工業用 ヒートポンプ”, 성에너지센터 (1984).
5. 박준택외 12인, “염색폐수열 이용사업 타당성 조사”, 대구광역시 (2000).
6. 大野 弘外, “染色加工プロセスのエネルギーに及ぼす消費水溫影響”, 纖維機械學會誌, 38(1), pp. 115-122 (1983).
7. 省エネルギー對策委員會編, 纖維工業における省エネルギー技術 (1981).
8. 신현준 외 7인, “도시 미활용에너지 이용 열펌프시스템 개발에 관한 최종보고서”, 통상 산업부 (1997).
9. 김진오, 경기도 미활용에너지 실태조사 및 이용방안 연구 (1998).