

염색폐수를 이용한 고온수 히트펌프 시스템 타당성 연구

김 정 열, 정 동 열, 박 승 상, 백 중 현[†]

한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

The Study of Validity on the High Temperature Heat Pump System using Dyeing Wastewater

Jeong-Yeol Kim, Dong-Yeol Chung, Shung Sang Park, Jong-Hyeon Peck[†]

Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 331-825, Korea

ABSTRACT: The purposes of this work were suggested and validated the methods of heat recovery from dyeing wastewater exhausted in Sihwa and Banwol dyeing industrial park. We analyzed the present conditions of heat supplies and demands. So it was made a selection of the system combined heat exchanger for waste heat recovery and the high temperature heat pump. We decided the specifications of the heat recovery facilities. After this, economical assessment is performed to this system. The payback periods are within 4 years, 20 years and 5 years in case of K company, S company and A company. In addition, when they are produced the heat of same capacity, quantities of pollutants from used fuels were calculated.

Key words: Heat exchanger (열교환기), Heat pump(히트펌프), Dyeing wastewater(염색폐수), Heat recovery facility(열회수 장치), Initial investment cost(초기투자비)

1. 서 론

화석연료의 지속적 사용에 따른 에너지 자원의 고갈과 CO₂ 배출 및 지구 온난화 등의 환경문제는 국내외적으로 크게 이슈화되고 있다. 특히 세계시장의 불안정한 유가는 국내 총 에너지 사용량의 97% 이상을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경제 및 산업에 매우 큰 영향을 주고 있으며, 이는 시급히 해결해야 할 중요한 과제이다.

우리나라의 총에너지소비량은 219.6 백만TOE로 제조업부문에서의 총 에너지소비량은 86.8백

만TOE(2004년 기준)이며, 이 중 제품생산에 직접적으로 사용하는 에너지소비량 중 5%에 해당하는 2.2 백만TOE가 폐열로 버려지는 상황이다.⁽¹⁾ 이와 같이 국가 총에너지소비량 중 약 1%에 해당하는 에너지가 낭비되고 있으며, 이를 효과적으로 회수하여 이용하기 위한 여러 가지 기술들이 제안 및 도입되고 있다. 하지만 여기에는 기술적인 측면뿐만 아니라, 경제적인 측면에서도 타당성이 있어야하기 때문에 적용에 한계가 있다.

한편 폐열발생원에 따라 폐열의 형태와 질, 양 등이 아주 다양하기 때문에 각각의 폐열원의 조건에 따라 적합한 폐열회수 이용기술의 선택이 매우 중요하다. 산업분야에서 배출하고 있는 중·고온 폐수열에 대한 열회수는 비교적 구조가

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8343; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: pjh6240@kitech.re.kr

간단한 폐열회수 열교환기를 사용하여 회수할 수 있지만, 50℃ 이하의 저온폐수열에 대한 열회수는 기계적인 구동장치, 즉 히트펌프를 이용하여야 가능하다.

히트펌프는 저온의 열원으로부터 열을 흡수하여 고온으로 승온시키는 장치로, 공기열, 지열 및 하천수열 등의 미활용에너지를 이용하여 난방 및 급탕 등이 가능하게 한다. 히트펌프시스템 중 지열 및 공기열 등을 이용한 방식은 기술적 발전과 함께 정책적 지원을 통하여 보급이 활성화 되었으나, 기술적 문제와 경제성으로 인해 저온의 폐수열에서 80~90℃의 고온수를 생산하는 대용량 히트펌프의 적용 및 보급은 미미하였다. 하지만 최근 히트펌프에 대한 기술의 발전으로 저온폐열을 이용하여 고온수를 생산하는 것이 가능하게 되었으며, 이러한 열회수기술의 진전은 저온의 미활용에너지를 적극적으로 활용할 기회가 되고 있다.

Lee 등⁽²⁾은 대구지역의 하수처리장에 설치된 100RT급 2단압축 히트펌프시스템(하수처리수 열원)을 적용하였다. R-134a를 이용한 이 시스템은

하절기 및 동절기에 각각 5℃ 및 50℃의 냉수 및 온수를 생산할 수 있다고 보고하였다. 또한 Park 등⁽³⁾은 산업분야에서 발생하는 폐열을 이용한 가스엔진구동 히트펌프의 적용 타당성 및 경제성에 대해 고찰하였다.

본 연구에서는 시화 및 반월염색단지에서 발생하는 50℃ 미만의 염색폐수를 이용하여 저온 미활용에너지에 대한 이용방안을 도출하고자 하며, 구체적인 적용시스템에 대한 타당성 검토를 하고자 한다.

2. 에너지 공급처와 수요처의 현황 및 기대효과

2.1 에너지 공급처

시화염색단지는 32개의 염색관련 업체가 입주하여 운영되고 있으며, 발생하는 염색폐수는 시화염색사업협동조합의 공동 폐수처리장에서 처리되고 있다. 염색폐수 처리용량은 40,000 m³/day (최대 45,000 m³/day)으로 Table 1에 2007년 11

Table 1 Monthly flow rate and temperature of dyeing wastewater in Sihwa and Banwol

	Sihwa			Banwol		
	Flow rate (m ³ /day)	Temperature (°C)		Flow rate (m ³ /day)	Temperature (°C)	
		Indraft of dyeing wastewater	Effluent tank		Indraft of dyeing wastewater	Effluent tank
January	15,107	37.18	25.90	69,363	35.7	32.0
February	13,619	35.96	24.44	70,155	35.9	31.8
March	15,861	38.23	27.28	71,606	37.7	34.8
April	18,042	39.98	29.76	72,753	39.5	37.1
May	17,810	41.87	30.89	69,260	41.1	38.9
June	17,508	43.20	33.16	71,692	43.8	41.0
July	18,019	41.89	35.44	73,768	44.6	42.1
August	13,639	41.39	35.16	67,075	44.4	41.9
September	15,387	40.13	34.67	70,920	44.3	41.3
October	12,446	40.69	33.98	70,434	42.8	40.0
November	17,916	40.56	31.85	73,755	39.8	36.9
December	17,165	37.86	27.75	67,967	37.5	33.7
Average	16,050	39.91	30.86	70,729	40.6	38.1

월에서 2008년 10월까지 1년간 유입되는 월별 염색폐수량과 각 처리과정에서의 온도를 나타내었다. 평균 39.91℃(하절기:41~43℃, 동절기:35~37℃)의 염색폐수는 평균 16,050 m³/day으로 유입되고 있으며, 각 처리과정(냉각과정 포함)을 거친 염색폐수는 평균 30.86℃의 온도로 배출된다.

71개의 염색관련 업체가 입주하여 운영되고 있는 반월염색단지에서 배출된 염색폐수는 처리규모가 100,000 m³/day인 반월염색사업협동조합의 공동 폐수처리장에서 처리되고 있으며, 처리량 및 각 처리과정에서의 온도를 Table 1에 나타내었다. 반월염색단지의 경우 시화염색단지에 보다 약 4~5배의 염색폐수가 발생(70,729 m³/day)하고 있으며, 폐수처리장에 유입되는 평균온도는 40.6℃(하절기:43~44℃, 동절기:37~40℃)이다. 처리과정을 거친 염색폐수는 38.1℃의 온도로 배출된다.

이상에서 두 곳의 염색단지에서 발생하는 염색폐수의 발생량 및 온도에 대한 현황을 살펴보았다. 섬유 및 염색업체에서 대량으로 배출되고 있는 염색폐수의 열회수를 통하여 산업공정에 재이용할 경우 다음과 같은 경제적 이득 및 환경개선 효과를 기대할 수 있다.

- 경제적 측면

- 폭기조 유입수 온도 저하에 따른 생물학적 처리 시 제거효율 증대.
- 화학적(산화반응시설) 처리 시 폐수처리 약품 절감.
- 슬러지 발생량 감소.
- 염색단지 입주업체 경쟁력 강화.

- 환경적 측면

- 슬러지 발생량 감소에 따른 해양투기 배출량

감소.

- 냉각시설 미가동에 따른 악취 민원 발생 억제.

2.2 에너지 수요처

시화산업공단 내에 위치한 K사는 2008년 현재 20,800 kW의 전기생산설비로 전력을 생산하고 있으며, 285 ton/hr의 증기생산설비로 60여개 업체에 2,400~3,000 ton/day의 증기(170℃)를 공급하고 있다. 한편, 공단 내 소각업체들로부터 폐열을 증기형태로 회수하여 사용하고 있으나, 사용연료가 벙커-C유로 고유가에 의한 에너지 비용에 많은 부담을 앓고 있는 실정이다.

76.95 MW의 전기생산설비와 1,120 ton/hr의 증기생산설비를 갖춘 S사에서는 유연탄을 사용연료로 하며, 반월공업단지 내에 200℃의 스팀을 공급하고 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 계절에 따른 최대유량과 최소유량의 차이가 많은 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 운전 및 경제성을 확보하기 위한 적절한 열회수 설비를 선정하는데 있어 고려해야할 중요한 사항이다.

A사의 경우 온수의 공급온도는 90~120℃, 회수온도는 50~75℃이며, 온수 공급량은 하절기 480 ton/hr, 동절기 3,100 ton/hr 및 간절기 1,500~2,000 ton/hr이다. A사는 K사와 S사와는 달리 열공급처가 안산지역의 공동주택이다. 산업분야의 경우 1년내내 비교적 안정적인 열공급과 수요가 이루어지지만, 공동주택의 경우 계절에 따라 큰 차이를 보인다. 난방이 이루어지는 동절기의 경우 최대 열수요가 발생하게 되어 공급량이 하절기에 비해 4~5배 정도 높은 것을 Table 2에서 확인할 수 있다. 이로 인해 하절기 및 간절기 일부기간에는 인근의 소각열(증기)을 공급받아 운

Table 2 Maximum and minimum of flow rate of steam in season

	K company		S company		A company	
	Minimum (m ³ /day)	Maximum (m ³ /day)	Minimum (m ³ /day)	Maximum (m ³ /day)	Minimum (m ³ /day)	Maximum (m ³ /day)
Spring	2,601	3,079	8,875	17,536	14,937	44,798
Summer	2,011	2,335	4,880	13,314	13,625	16,751
Autumn	2,325	3,204	6,861	17,298	8,924	46,135
Winter	2,576	3,119	10,999	19,059	45,664	76,907

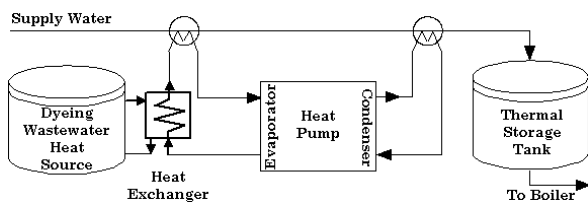
영하여도 충분한 실정이다.

3. 타당성 검토 및 결과

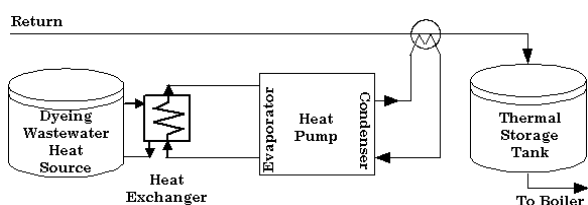
3.1 염색폐수열원회수 복합 시스템 선정

Fig. 1 (a)와 (b)은 염색폐수열원회수를 위한 복합 시스템의 개략도이다. Fig. 1 (a)는 K사 및 S사에 고려된 시스템으로 시수(5~7℃)를 폐수열교환기를 통하여 20℃로 승온시키고, 이후 히트펌프에서 80℃의 고온수로 2차로 승온시키게 된다. 반면 Fig. 1 (b)는 A사의 경우로 수요측에서 회수된 열원을 오직 히트펌프로만 80℃로 승온시키며, 생산된 고온수는 축열조에 저장되어 보일러로 공급된다.

염색폐수의 경우 다른 열원에 비해 각종 화학적 처리가 수반되어 배출된 것으로 일반 열교환기를 사용하기에는 많은 제약과 위험성이 따른다. 따라서 염색폐수가 갖고 있는 부식특성과 스케일 형성은 열교환기 선정에 매우 중요하므로, 이에 대한 실험적 고찰로서 염색폐수가 철, SUS304, 구리, 알루미늄 및 폴리프로필렌(polypropylene, PE) 등과 같은 재료의 부식에 미치는 영향을 관찰하였다. Fig. 2에 시료의 설치 방법에 대한 사진과 일정 시일이 지난 후 부식 및 스케일이 발생한 시료의 사진을 나타내었다. 시화염색단지에 설치한 시료는 반월염색단지의 시료보



(a) Heat pump system for K company and S company



(b) Heat pump system for A company

Fig. 1 Schematic of high temperature heat pump system using dyeing wastewater.

다 상태가 양호하였으며, 이는 강한 스케일 및 슬러지를 형성하는 미생물활동 등에 의한 영향이 미미하였기 때문이라 판단된다. 특히 알루미늄 재료의 시료의 경우 강한 스케일이 형성되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 염색폐수의 성분과 알루미늄 표면사이에 특정한 상호관계가 있는 것으로 판단된다.

이상의 실험적 고찰을 통하여 일반적으로 사용되는 열교환기의 적용은 어려운 것으로 판단되며, 다단순환식 열교환기와 PE/ Teflon 관 열교



(a) Samples for corrosion and scaling test



(b) Samples of Sihwa and Banwol after 7 days



(c) Samples of Sihwa and Banwol after 74 days

Fig. 2 Pictures of samples of Sihwa and Banwol.

환기를 적용모델로 선정하였다. 이 중 우선적으로 대구지역 염색가공업체에서 사용되고 있는 단순환식 열교환기(2003년도 설치, 재질:SUS 316/304)에 대한 성능시험을 수행하였다. 성능시험의 결과, 10℃의 시수가 염색폐수(35℃ 이상)와 열교환하여 35℃까지 승온되는 것을 확인할 수 있으며, 이때, 2시간동안 258.1 Mcal의 열량을 염색폐수에서 회수하였다.

폐열회수열교환기를 통하여 얻어진 열량은 고온수 히트펌프의 증발기 열원으로 공급되고, 승온된 시수는 응축기에서 80℃의 고온수로 승온되어 보일러 공급용 축열조에 저장하게 된다. 한편, 국내에서는 고온수 히트펌프의 제작 기술을 갖추지 못하여, 기술력을 인정받은 국외의 F사의 제품을 선정하였다.

3.2 타당성 검토 및 결과

타당성 분석을 위해 에너지 수요처와 공급처의 현황을 바탕으로 폐열회수열교환기 및 히트펌프 장비선정을 위한 열평형(heat balance) 설계를 수행하였으며, Table 3과 4에 선정된 장비의 용량 및 초기투자비를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 배출되는 폐수열원은 매우 풍부하지만, 에너지 수요처에서 최소 및 최대 수요는 월별/계절별로 2~5배의 차이로 매우 크다. 따라서 적절한 장비선정이 어렵기 때문에 비교적 변동폭이 적은 시화지역을 기준으로 장비를 선정하여 적용하였다.

Table 5는 염색폐수 열원을 이용한 고온수 히

Table 3 Specification of heat pump

		Summer (July)	Winter (February)
Evaporator	Inlet temp. [°C]	36.8	29.3
	Outlet temp. [°C]	24.5	16.1
	Flow rate [m ³ /hr]	240	240
	Cooling capacity [Gcal/hr]	2.94	3.30
Condenser	Inlet temp. [°C]	38.8	40.9
	Outlet temp. [°C]	80.0	80.9
	Flow rate [m ³ /hr]	92	112
	Heating capacity [Gcal/hr]	3.70	4.40
Compressor	Power [kW]	956	1,246
	COP	4.5	3.8

트펌프 시스템에 대한 타당성 결과를 나타낸 표이다. 동일한 장비로 각 에너지 수요처에서의 연간 운전패턴을 고려하였을 때, 생산된 열량, 연료비 및 전기료를 비교하였다. 이때, 연료비는 B-C유, 유연탄 및 저유황중유를 적용하였으며, 보일러 효율은 85%로 하였다. 또한 전기료는 산업용 전력(병)-고압 A-선택 1-계약전력 1,000 kW를

Table 4 Initial investment cost for heat pump system

		Specification	Cost (Million Won)
Heat pump system	Heat pump & erection	4.4 Gcal/hr	3,860
	Closed cooling pump	100 HP × 2 ea.	50
	Hot water boosting pump	15 HP × 2 ea.	16
	Construction	Piping, electronic, automatic control & building	2,400
	Etc.		574
Waste heat exchanger		3,000 ton/h × 2 ea.(including pump)	630
Summery			7,530

1) Not including V.A.T

2) 1 Europe = 1,900 Won

Table 5 Result of validity on the high temperature heat pump system using dyeing wastewater and quantities of pollutant

	Heat recovery [Gcal]	Fuel cost [MWon]	Electronic charge [MWon]	Saving cost [MWon]	Payback period [Year]	SO ₂ (kg)	NO ₂ (kg)	Dust (kg)	CO ₂ (kg)
K company	36,043	3,341	762	2,578	3.2	21,744	25,772	6,821	13,385,194
S company	37,086	1,189	783	406	20.4	29,748	22,146	214,850	15,204,737
A company	21,541	2,005	482	1,523	5.4	13,051	15,469	1,786	8,232,042

적용하여 히트펌프가 1년동안 지속적으로 운전하였을 때, 전기요금을 계산하였다.

K사의 경우, 비교적 비싼 B-C유의 사용으로 인해 초기투자비 회수기간이 3.2년으로 짧지만, S사의 경우 사용연료(유연탄)의 저렴한 가격으로 인하여 초기투자비 회수기간이 20년 이상으로 나타났다. 한편, A사의 경우는 하절기 및 간절기 일부기간동안 인근의 쓰레기 소각장에서 발생하는 폐열(증기)을 이용하기 때문에 타 에너지 수요처에 비해 생산하는 열량이 적으며, 초기투자비 회수기간은 5.4년이 소요되는 것을 확인할 수 있다. 또한 사용연료에 따른 오염물질 배출 현황(연료별 EPA 오염물질 배출계수 참조)을 살펴보면, 유연탄을 사용하는 S사의 경우 K사 및 A사에 비해 많은 양을 배출하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 평가는 현재의 상황을 고려하여 수행되었기 때문에 사업주체 및 현장 상황 변화에 따른 변수로 인해 약간의 차이를 나타낼 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

시화 및 반월염색단지에서 발생하는 50℃ 미만의 염색폐수를 이용한 저온 미활용에너지에 대한 이용방안 및 구체적인 적용시스템에 대한 타당성 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 반월산업단지에서 배출되는 염색폐수는 평균온도 40.8℃이며, 배출량은 70,729 m³/day이다. 이는 시화산업단지(39.91℃, 16050 m³/day)에 비해 4~5배이며, 두 지역 모두 현재기준으로 폐열

량은 매우 풍부한 것으로 판단된다.

(2) 초기투자비 회수기간은 비교적 사용연료가 비싼 K사의 경우 3.2년, A사의 경우 5.4년이었으며, 가장 저렴한 연료를 사용하는 S사의 경우 20.4년이었다.

(3) 생산열량에 따라 차이가 있지만, 연간 최소 1,000 ton에서 최대 1,300 ton의 CO₂가 저감될 것으로 추정된다.

시화 및 반월산업단지 내에서 에너지 공급처 및 수요처에 대한 고온수 히트펌프 시스템 적용은 미활용에너지 이용에 따른 운전비 절약 및 탄소배출 저감 등의 경제적 이득 및 환경효과가 있을 것으로 판단되며, 향후 지속적인 정책적 지원과 함께 기술개발 등을 통한 미활용에너지 보급 활성화를 기대한다.

후 기

본 연구는 생태산업단지구축사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, S. -R., 2009, Hybrid heat pump system by using industrial waste heat, Magazine of the SAREK. Vol. 38, No. 2, pp. 8-13.
2. Lee, Y. -S., 2009, Heat pump system for sewage water as heat source, Magazine of the SAREK. Vol. 38, No. 2, pp. 14-17.
3. Park, S. -R. 2003, GHP technology using heat source of industrial wastewater, Magazine of the SAREK, Vol. 32, No. 3.