

저온 수처리장치 열교환기의 열전달 특성에 관한 연구 A Study on the Performance Prediction of Low Temperature Thermal Desorption System

이 춘 태
C. T. Lee

(접수일 : 2009년 7월 28일, 수정일 : 2009년 10월 9일, 채택확정 : 2009년 11월 9일)

Key Words : Heat Transfer(열전달), Heat Flow Rate(열유동율), Low Temperature Thermal Desorption(저온열탈착), Wastewater(폐수)

Abstract : Thermal desorption systems are designed to remove organic compounds from solid matrices such as soils, sludges and filter cakes without thermally destroying them. It is a separation technology, not a destruction technology. Since it is a thermal process, there is a common belief that temperature is the only significant parameter to be monitored. While it is true that better removal efficiencies are usually achieved at higher temperatures, other factors must be considered. Since the process is governed by mass transfer, heating time and the amount of mixing are also key parameters in optimizing removal efficiency. Thermal desorption have been successfully used for just about every organic contaminant found to date. It has also been used to remove mercury. In the present study, the numerical simulation has been performed to investigate the characteristics of heat transfer of LTTD(low temperature thermal desorption). The commercial software, AMESIM was applied for analyzing the heat transfer process in the LTTD.

1. 서 론

최근 산업의 발달에 따른 대량 생산, 유통 및 소비는 유해 폐기물의 대량 발생을 야기하게 되었으며 이로 인한 지하수 및 토양오염으로 많은 환경문제가 발생하게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 세계 각국은 다양한 환경규제^{1,2)}를 운영 중에 있으며, 여러 가지 방식의 지하수 및 토양 정화 기술이 국내외적으로 개발되어 상용화 되고 있다. 오염 매체의 정화 기술은 크게 물리/화학적 처리, 생물학적 처리 기술로 나눌 수 있으며 이러한 처리 기술은 처리 장소에 따라 현지내(In-situ)와 현지외(Ex-situ) 처리기술로 나눌 수 있다. 물리적 처리 기술 중 현지내 처리기술로는 토양증기추출법(SVE, soil vapor extraction), 공기주입확산법(air sparging)³⁾, 토양세척법(soil flushing)⁴⁾을 들 수 있고 현지외 처리기술로는 증기화를 적용한 공기혼입법(aeration),

증기휘발법(steam-induced volatilization), 열탈착법(thermal desorption)을 들 수 있으며, 세척기술^{5,6)}을 적용한 물세척법(water washing), 용제세척법(solvent washing) 등이 있다. 화학적 처리 기술은 오염물질을 화학적으로 변환시키거나 파괴하는 기술로 현지내 처리기술로는 현지내 화학적산화법(In-situ chemical oxidation), 현지내 화학적환원법(In-situ chemical reduction), 현지내 고형화 및 안정화법(In-situ solidification/ stabilization)이 있으며, 현지외 처리기술로는 화학적산화법(chemical oxidation), 화학적환원법(chemical reduction), 고형화 및 안정화법(solidification/ stabilization) 등이 있다. 다음으로 생물학적 처리기술로는 경작법(land farming), 생물학적통기법(bioventing), 생반응법(bioreactor) 등이 있다. 이러한 기술 중에서 생분해가 어렵거나 복원에 오랜 기간이 필요한 경우에는 이의 처리를 위하여 물 또는 세척제를 이용한 토양세척법이나 열탈착법을 주로 적용한다. 열탈착 기술의 특징은 오염원의 종류나 농도에 관계없이 단기간에 처리가 가능한 입증된 기술이라는 것이며 공정의 신뢰도가

이춘태(책임저자) : 신라대학교 자동차기계공학과
E-mail : charity@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5468

다. 여기서, Fig. 2에서와 같이 열교환장치로 유입되는 폐수의 유입온도는 8°C이고, 유입유량은 1.044 l/min 이다. 집수조의 처리된 폐수의 온도는 40°C로 가정 하였다.

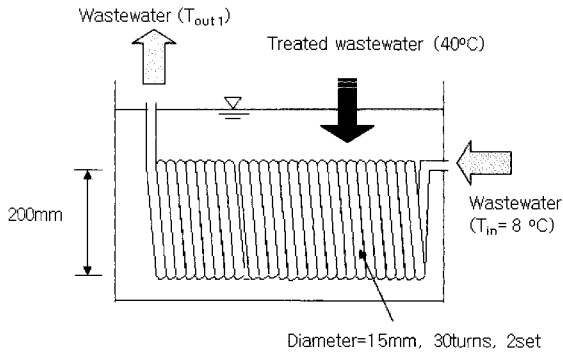


Fig. 2 Configuration of treated wastewater reservoir

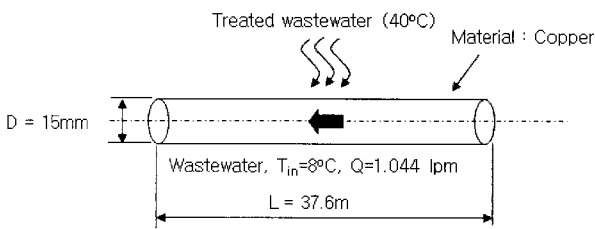


Fig. 3 Simulation model of treated wastewater reservoir (1st heat transfer process)

또한, 화구부에서의 열전달 현상(2차 가열) 해석을 위한 화구부 형상과 해석을 위한 모델을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서와 같이 1차 가열을 거친 폐수는 화구부 열교환장치의 입구로 유입되어 화구부의 열풍에 의해 2차적으로 가열된다.

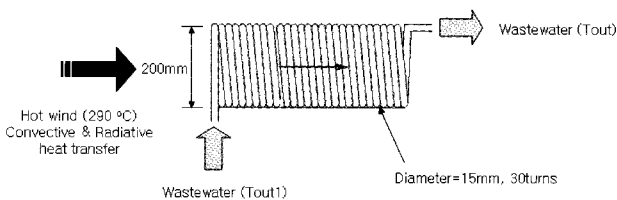


Fig. 4 Configuration of burner area (hot wind chamber)

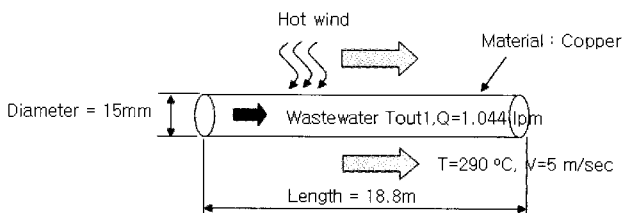
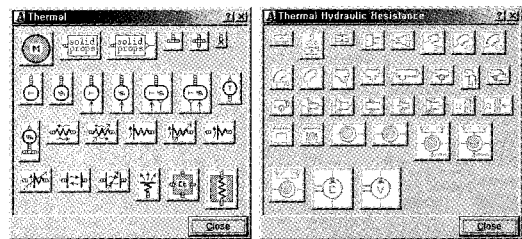
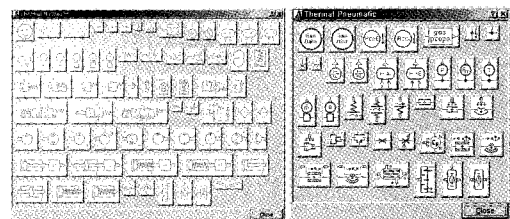


Fig. 5 Simulation model of hot wind chamber (2nd heat transfer process)

여기서, 2차 가열에 사용된 화구부 열교환장치는 파이프 직경 15mm, 파이프 두께 1mm, 총길이 18.8m의 구리파이프로 구성되어 있다. 그리고, Fig. 5에서와 같이 열교환장치를 흐르는 폐수의 입구온도는 1차 가열의 해석 결과인 T_{out1} 로 가정하였다. 또한, 화구부 공기온도는 290°C로 가정하였다. 이상과 같은 물성치와 초기조건을 이용하여 열유체 전용해석 소프트웨어인 AMESIM을 이용하여 열전달 특성해석을 실시하였다. 최하단 집수조 해석은 유체와 열전달 특성이 동시에 필요하므로 열(thermal), 열유체(thermal-hydraulic), 열유체저항(thermal-hydraulic resistance) 라이브러리 등 3가지의 라이브러리를 이용하여 해석모델을 구성하였고, 화구부 해석은 열공압(thermal-pneumatic) 라이브러리를 추가하여 4개의 라이브러리로 구성하였다. Fig. 6에 AMESIM에서 제공하는 해석에 사용한 각 라이브러리의 요소(components)들을 나타내었다. 또한, 이러한 라이브러리 요소들을 이용하여 본 논문에서 구성한 해석 모델을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 20과 21번 요소는 해석에 사용한 유체의 물성치를 지정하는 서브모델(submodel)로 각각 처리된 폐수와 유입된 폐수의 물성치를 나타낸다. 본 논문에서는 정화된 폐수가 모이는 집수조의 유체는 순수한 물로 가정하였다. 또한, 유입된 폐수의 성분은 디젤유를 포함한 여러 가지 유기성분과 물 등으로 구성되어 있고, 이러한 폐수의 조성은 매우 다양하므로 본 논문에서는 해석을 단순화하기 위하여 디젤유로 단순화하여 해석을 수행하였다.



(a) Thermal library (b) Thermal-hydraulic library



(c) Thermal-hydraulic resistance library (d) Thermal-pneumatic library

Fig. 6 Components of AMESIM software library

4. 해석결과

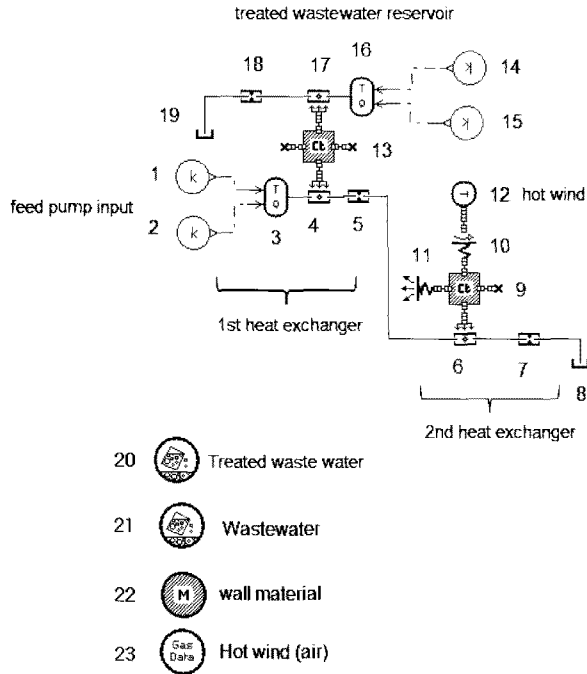


Fig. 7 Simulation model of hot wind chamber and treated wastewater reservoir of LTTD with AMESIM

Table 1 Simulation parameters

parameter		value
Pure aluminium	Density	2.702e+03 [kg/m ³]
	Specific heat	9.030e+02 [J/kg/K]
	Thermal conductivity	2.380e+02 [W/m/K]
Pure copper	Density	8.933e+03 [kg/m ³]
	Specific heat	3.850e+02 [J/kg/K]
	Thermal conductivity	4.010e+02 [W/m/K]
Pure iron	Density	7.870e+03 [kg/m ³]
	Specific heat	4.470e+02 [J/kg/K]
	Thermal conductivity	8.020e+01 [W/m/K]
Diesel	Density	8.240e+002 [kg/m ³]
	Absolute viscosity	3.090e-003 [kg/m/s]
	Specific heat	1.950e+003 [J/kg/K]
	Thermal conductivity	1.250e-001 [W/m/K]

또한, 그림에서 22번 요소는 해석에 사용한 열교환기의 재질을 지정하는 서브모델이다. 본 해석에서는 열교환기를 구리 재질로 선정하였다. 그리고, 23번 요소는 해석에 사용한 기체의 물성치를 결정하는 서브모델이다. 본 논문에서는 순수한 공기로 가정하였다. table 1에 해석에 사용한 재질들의 물성치를 나타내었다.

이상과 같은 해석 모델을 이용하여 각종 물성치와 초기 조건을 입력한 후 열교환장치의 열전달 특성에 대한 해석을 실시하였다. Fig. 8에서는 1차 및 2차 가열에 의한 열교환기에서의 온도변화 특성을 해석한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 1차 가열은 초기온도 8°C로 유입된 폐수의 온도를 약 18분의 과도응답시간(setting time)을 거친 후 정상상태 온도인 17.3°C까지 가열하여 약 9.3°C의 온도상승이 있었다. 여기서 과도응답시간은 정상상태온도의 ±3% 온도에 도달하는 시간으로 정의하였다. 또한, 2차 가열에 의한 열전달 특성은 초기조건 8°C에서 시작한 유입 폐수의 온도를 1차 가열을 거치고, 열풍에 의한 2차 가열에 의하여 과도응답시간 약 12분 후에 정상상태 온도인 84°C까지 가열하여 약 76°C의 온도상승이 있었다.

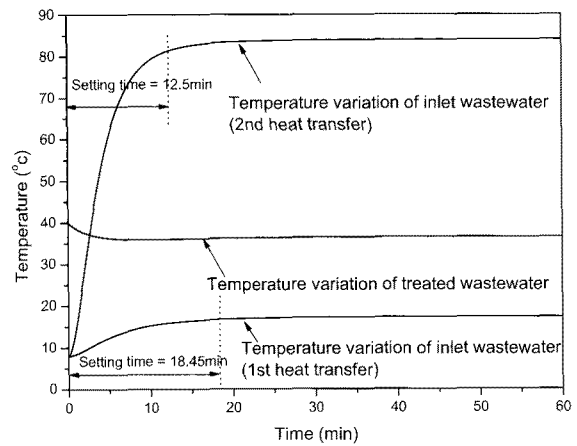


Fig. 8 Simulation results of temperature variation for the 1st & 2nd heat transfer process

이와 함께 Fig. 9와 Fig. 10에 1차, 2차 열전달에서의 열유동율(heat flow rate)의 해석결과를 나타내었다. 여기서, 열유동율은 고온의 물체로부터 저온의 물체로 단위시간당 전달되는 열량(heat flow per unit time)으로서 단위는 J/sec = W이다. Fig. 9에서와 같이 1차 가열에서는, 처리된 폐수로 부터 열교환기로의 열유동율이 시간과 함께 감소하여 약 18분 후에 열교환기로부터 유입된 폐수로의 열유동율과 열적 평형상태에 도달함을 알 수 있다. 정상상태에서의 열유동율은 255W이다. 그리고, 2차 가열에 의한 열유동율의 변화는 Fig. 10에 나타낸 바

와 같이, 열풍으로부터 열교환기로 전달되는 복사열과 대류에 의한 열유동율은 과도응답시간을 지난 후 열교환기에서 유입된 폐수로 전달되는 열유동율과 2,040W로 열적 평형을 이루고 있음을 알 수 있다.

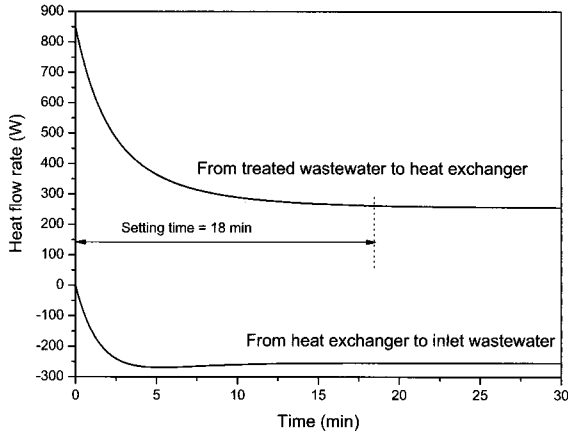


Fig. 9 Variations of heat flow rate during the 1st heat transfer process

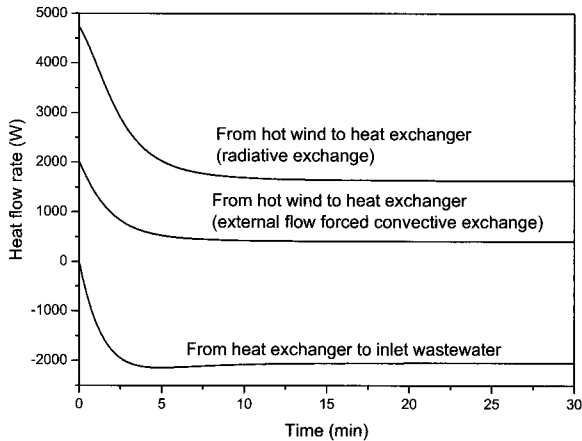


Fig. 10 Variations of heat flow rate during the 2nd heat transfer process

Fig. 11에 1차, 2차 열전달 동안, 열교환기에 저장된 열량을 해석한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 1차, 2차 가열을 통하여 집수조의 열교환장치에 각각 $1.2 \times 10^5 \text{ J}$ 와 $7.7 \times 10^5 \text{ J}$ 의 열이 저장되었음을 알 수 있다. 그리고, 시스템의 각종 물성치 변화에 따른 열전달 특성을 검토하기 위하여 열교환기의 재질을 변화시킨 경우의 해석 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서와 같이 1차, 2차 가열과정 모두 철에 비해 알루미늄과 구리재질이 빠르게 온도가 상승하고, 구리와 알루미늄은 거의 유사한 온도특성을 보임을 알 수 있다.

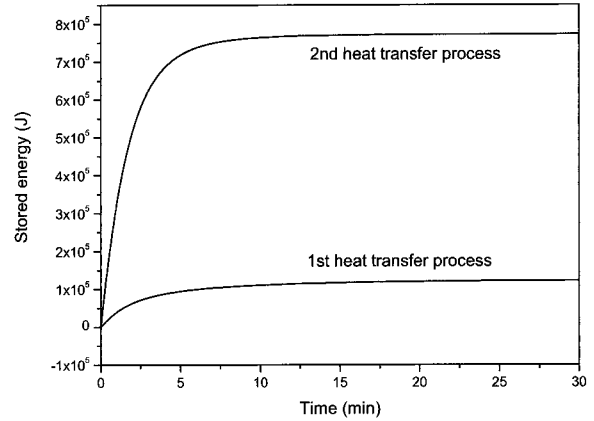


Fig. 11 Stored energy at the heat exchanger during the 1st & 2nd heat transfer process

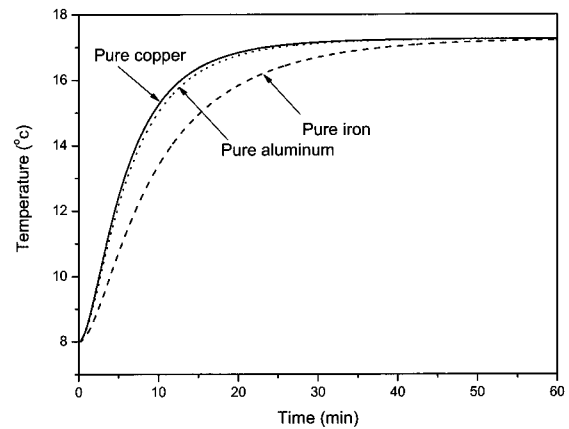


Fig. 12 Temperature variations according to material of heat exchanger for the 1st heat transfer process

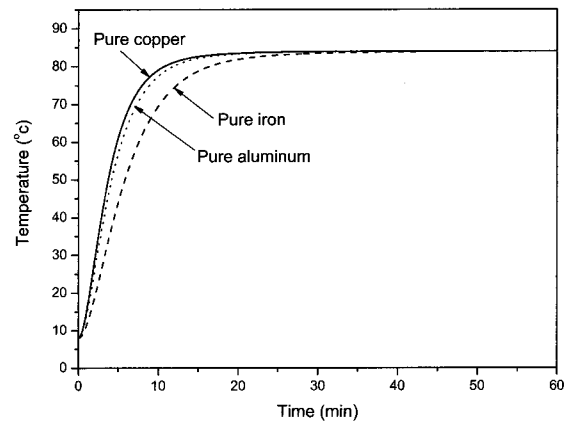


Fig. 13 Temperature variations according to material of heat exchanger for the 2nd heat transfer process

또한, 열교환기의 직경을 변화시킨 경우의 해석 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 열교환기의 직경이 증가함에 따라 정상상태의 온도는 증가하지만, 직경 변화에 따른 온도 증가율은 점차 감소함을 알 수 있다. 여기서 직경에 따른 전열면적은 πDL 이며, D 는

파이프 직경, L 은 파이프 길이이다.

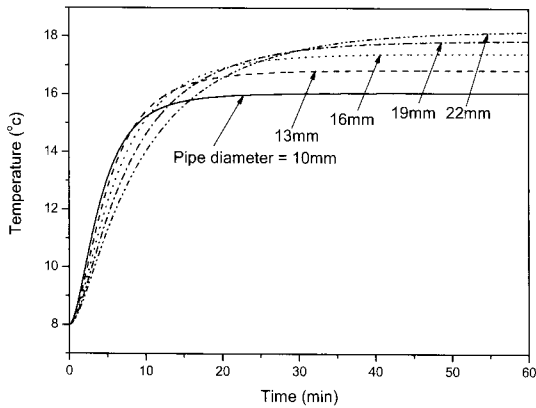


Fig. 14 Temperature variations according to pipe diameter of heat exchanger for the 1st heat transfer process

4. 결 론

저온 수처리장치의 성능예측을 위한 열전달 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구를 통하여 저온 수처리장치의 1차, 2차 가열부에 대한 열전달 특성을 해석할 수 있는 해석 모델을 제시하였고, 이러한 해석모델을 통하여 저온 열처리장치의 온도변화 특성, 열유동을 및 저장에너지를 예측할 수 있었다.

2) 열교환장치의 재질에 따른 온도 변화특성을 제시하였으며, 철에 비해 알루미늄 또는 구리의 온도 특성이 우수함을 확인 할 수 있었다.

3) 열교환기의 직경에 따라 일반적으로 정상상태 온도는 상승하지만, 직경 증가율에 따른 온도 상승율은 점차 감소함을 확인 할 수 있었다.

참고 문헌

1. USEPA, 2001, "A Citizen's Guide to Soil EPA 542-F-01-008.
2. USEPA, 1990, "Managing Contaminated : EPA Decision-making Processes", EPA 506/6~90/002.
3. Olin-Estes, T. J, M. R. Palermo, 2001, "Recovery of Dredged Material for Beneficial Use", Journal of Hazardous Materials, pp. 39~51.
4. Krishnan, R., H. W. Parker, R. W. Tock, 1995, "Electrode Assisted Soil Washing", Journal of Hazardous Materials, pp. 111~119.

5. 최상일 외 2명, 1997, "소수성 유기오염물질로 오염된 토양에 대한 혼합 계면활성제를 이용한 토양세척기법의 적용성 연구", 한국지하수토양환경학회지, 제 4권, 제 2호, pp. 103~108.
6. 이민희 외 4명, 2002, "계면활성제 원위치 토양세척법을 이용한 유류오염지역 토양 지하수 정화 실증 시험", 한국지하수토양환경학회지, Vol. 제 7권, 제 4호, pp. 77~86.