

廢溶劑 回收用 二中管形 熱交換機 特性 解析

具宰賢 · *李在瑾

釜山大學校 機械工學科

Analysis of a Double Pipe Heat Exchanger for Waste Solvent Recovery

Jae-Hyun Ku and *Jae-Keun Lee

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

요 약

본 연구는 폐용제를 가열, 증발 및 응축과정을 거쳐 용제를 회수하는 시스템의 열교환기 해석에 관한 것으로, 고온 열매체유로 가열되는 이중관형 열교환기를 사용하여 용제 증발과정의 열전달 특성을 분석하고 용제유량과 가열온도에 따라 물, 벤젠 및 알킬벤젠의 증발을 위해 요구되는 전열면적을 분석하였다. 폐용제 회수장치는 용제 공급펌프, 이중관형 열교환기, 진공 스프레이 챔버 및 응축기 등으로 구성되며, 이중관형 열교환기는 용제액을 열적 포화온도로 가열시키는 구간과 포화된 용제액을 증발시키는 구간으로 구성된다. 관 내 용제의 증발을 위한 전열면적을 열평형 모델링에 의해 예측하였고, 이중관형 열교환기의 관 내 온도분포 측정을 통해 이론값과 비교, 분석하였다. 용제유량 0.1~0.5 l/min 및 가열온도 130~260°C의 범위에서 용제유량 증가 및 가열온도 감소에 따라 단위 전열면적당 열전달량이 감소하기 때문에 용제 증발을 위한 전열면적은 증가하였다. 관 내 용제 증발을 위한 전열면적의 이론적 분석결과와 측정값과 일치하였으며, 이중관형 열교환기를 사용한 폐용제의 증발과정을 통해 용제를 회수하는 기술에 적용이 가능하다.

주제어: 폐용제 회수, 이중관형 열교환기, 증발, 용제유량, 가열온도, 전열면적

ABSTRACT

This study describes to analyze the heat transfer characteristics of waste solvent recovery system using a double pipe heat exchanger heating solvent by the hot oil. The solvent recovery system consists of the feeding pump, the double pipe heat exchanger, the vacuum spray chamber, and the condenser. A double pipe heat exchanger consists of the first section to conduct the heating of solvent to the thermal saturated point and the second section to evaporate the saturated solvent. The heat transfer area for vaporization of water, benzene and alkylbenzene was predicted by the heat balance modelling and experimentally measured from the temperature distribution as a function of solvent flow rate and heating temperature. The required heat transfer area for vaporization was increased with increasing solvent flow rates and with decreasing heating temperatures due to decreased quantity of transferred heat per the unit area. Theoretical modelling of the heat transfer area for solvents vaporization in the pipe showed good agreement with experimental results. Results showed to be suitable for the waste solvent recovery using a double pipe heat exchanger.

Key words: waste solvent recovery, double pipe heat exchanger, vaporization, solvent flow rate, heating temperature, heat transfer area

1. 서 론

각종 염료, 세라믹, 폴리머 등의 제조공정시 용제(Solvent)를 혼합하여 회석, 분산 및 화학반응 공정들이

이루어지며, 이 때 폐기되는 폐용제는 근년에 이르러 그 양과 종류에 있어서 매우 심각한 양상을 나타내고 있다. 산업의 발달로 국내에서 발생하는 폐용제 양은 갈수록 급속하게 증가하여 연간 약 75만톤에 이르고 있으며 대부분 불법 폐기되기 때문에 자원 낭비와 함께 치명적인 환경오염 문제를 일으키고 있다.^{1,2)} 기존 폐용제 재활용

* 2000년 1월 20일 접수, 2000년 4월 17일 수리

* E-mail kujh@hyowon.pusan.ac.kr

기술들은 재활용과정에서 2차 유독성 폐기물이 발생하여 재처리하여야 하고, 재생된 용제도 많은 불순물 입자를 함유하는 저등급 용제이어서 재사용이 기피되고 있는 실정이다.^{2,3)} 국내외적으로 이러한 문제들을 해결하고 폐용제로부터 용제를 회수하여 고순도로 재생하기 위한 방법으로, 이중관 내에서 연속적으로 공급되는 폐용제의 증발과정을 통해 고순도의 용제를 회수할 수 있는 재활용 기술에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.^{2,3)}

이중관형 열교환기 내관에서 유동하는 저온 액체를 외관의 고온 액체에 의해 가열시켜 증발시키는 열전달 과정은 상(Phase)이 변화하는 2상 열전달 과정으로서 그 현상자체가 매우 복잡하고 난해하기 때문에 많은 해석 방법들이 주로 실험에 의존하고 있다.⁴⁾ 관 내 유동액체 증발과정의 열전달 특성에 영향을 주는 인자 중에서 액체유량과 가열온도가 가장 중요하다.⁵⁾ 그러나 관 내 유동액체의 증발을 위한 열전달 해석에 대하여 체계적인 연구가 부족한 실정으로서 이에 대한 정량적인 해석이 필요하다

본 연구는 폐용제 회수용 이중관형 열교환기 특성 해석에 관한 것으로, 고온 열매체유로 가열되는 이중관형 열교환기를 사용하여 물, 벤젠 및 알킬벤젠에 대해 용제유량 및 가열온도에 따라 용제 증발을 위한 전열면적 특성을 실험과 모델링에 의해 분석하고 비교하고자 한다. 본 연구결과는 관 내 폐용제의 증발과정을 통해 고순도 용제로 회수하는 폐용제 회수 시스템 개발과 향후 폐자원 재활용 기술에 기여하고자 한다.

2. 이중관형 열교환기내 용제의 증발 메카니즘

Fig. 1은 이중관형 열교환기내 용제 증발 메카니즘을 나타낸 것으로, 바깥관 내의 고온 열매체유에 의해 내부 관 내의 용제가 유동하면서 가열, 팽창, 증발과정을 통해 휘발성분인 용제가 증기화하는 상변화 과정이다. 가열관 길이에 따라 용제 온도분포는 크게 3구간으로 나누어지며, 포화온도(Saturation Temperature)까지 증가하는 온도상승 구간, 일정한 포화온도에서 잠열에 의해 상변화를 일으키는 비등구간 그리고 과열증기의 단상상태에서 온도가 다시 상승하는 과열증기 구간 등으로 이루어진다. 이때 용제 증발을 위한 구간은 온도상승 구간과 비등구간을 의미하며 액체가 포화증기가 되는 구간이다. 이중관형 열교환기 내에서 외관의 고온 열매체 유로부터 일정한 열량을 공급받아 용제의 가열, 팽창 및 증발과정이 진행되면서 유동양식이 변화하며, 가열관 길

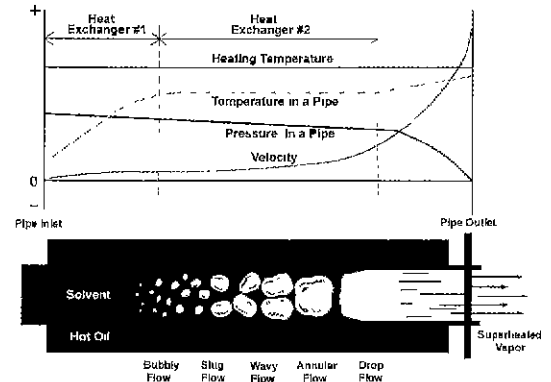


Fig. 1. Flow patterns by solvent vaporization in a double pipe heat exchanger.

이에 따라 용제의 유동양식은 용제내 기포발생 및 급격한 팽창속에서 기포류(Bubbly Flow), 슬러그류(Slug Flow), 파형류(Wavy Flow), 환상류(Annular Flow), 액적류(Drop Flow) 등을 나타낸다. 그리고 최종적으로 가열관 출구부에서 증기상태의 용제는 분무류(Disperse Flow)로 변화되어 스프레이 챔버(Spray Chamber)로 100 m/sec 이상의 고속으로 분무된다. 이는 관 내 용제를 연속적으로 진행할수록 용제의 팽창과 휘발성분인 용제의 순간적 증발에 의한 급격한 속도증가가 발생하여 스프레이 챔버내로 분사되기 때문이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 관 내 유속은 일정한 가열온도 조건에서 열교환기 출구부의 속도가 급격히 증가하고 있는데, 이는 기포류, 슬러그류 및 파형류까지는 부피팽창이 크지 않지만 환상류와 분무류를 거치면서 관 내 기공률이 증가하여 부피가 급격히 증가하므로 관내유속이 크게 증가하기 때문이다.⁶⁾ 스프레이 챔버내로 분사된 증기상태의 용제는 진공펌프에 의해 상부로 진공 흡입되어 응축기에서 응축되어 고순도의 액상으로 용제탱크에서 회수된다.

3. 용제 증발을 위한 이중관형 열교환기 해석

이중관형 열교환기는 타 열교환기 형식과 비교하여 열효율이 우수한 열교환기로서, 가열관 내 용제 증발을 위한 열전달 해석은 대수 평균 온도차법(Log Mean Temperature Difference Method)을 이용한 에너지 평형식(Energy Balance Equation)을 사용한다.⁷⁾ 2절에서 기술한 바와 같이 용제 증발을 위한 이중관형 열교환기 해석은 가열관 내 온도가 일정비율로 포화상태까지 상승하

는 구간과 일정한 포화온도에서 상변화가 발생하는 비등구간의 두 구간으로 나누어진다. 따라서 대수 평균 온도차법을 적용함에 있어 두 구간의 대수 평균 온도차이가 있으므로 서로 다르게 정의되기 때문에 열교환기내 유동용제의 증발과정 해석은 온도 상승구간인 열교환기 #1 및 비등구간인 #2의 두 구간으로 나누어 해석한다.

본 연구에 사용되는 이중관형 열교환기는 두께 0.8mm 인 내관 내경 8mm와 두께 2mm인 외관 내경 30mm 및 길이 30m의 원형 단면적을 가진 형상으로, 내관에서 용제가 유동하고 외관에서 용제유동 방향과 반대방향으로 고온 열매체유가 유동하는 향류식 열교환기이다. 이에 대한 열전달 해석은 물, 벤젠 및 알킬벤젠의 용제를 관 내로 유입시켜 외관의 고온 열매체유로부터 열공급을 받아 용제온도를 포화온도까지 상승시키는 구간인 열교환기 #1과 포화된 용제를 잠열에 의해 포화기체로 증발시키는 비등구간인 열교환기 #2 부분으로 나누어 수행하였다 열교환기 해석은 관 내 유동이 완전 발달 조건하에서 이루어지고, 주변으로의 열손실을 무시 그리고 관 내 용제의 레이놀즈 수가 일정하다는 가정하에서 수행되었다.

3.1. 온도상승 구간의 열교환기 해석

용제가 가열되면 온도가 포화온도까지 상승하는 구간인 열교환기 #1은 비열과 온도차에 대한 에너지 평형식으로부터 해석할 수 있다. 식 (1)은 이중관형 열교환기 내관의 용제와 외관의 고온 열매체유의 열평형을 나타낸 것으로, 용제가 고온 열매체유로부터 공급받은 총 열전달을 \dot{q}_1 을 구한다.⁷⁾

$$\dot{q}_1 = \dot{m}_s C_{ps} (T_{s1} - T_{s0}) \quad (1)$$

여기서 \dot{q}_1 는 열전달율(W), \dot{m}_s 는 용제의 질량유속(kg/sec), C_{ps} 는 용제의 정압비열(J/kg · K), T_{s1} 와 T_{s0} 는 용제에 대해 각각 내관의 입구와 출구 용제온도(°C)이다.

식 (2)는 열교환기 #1의 전열면적 A_1 (m²)을 구하기 위해 관내의 용제와 열매체유의 대수평균 온도차 ΔT_{lm} 를 이용한 열평형을 나타낸 것으로, 식 (3)의 총괄 열전달 계수 U (W/m² · K)와 식 (4)의 대수평균 온도차 ΔT_{lm} (°C)을 계산한 후, 식 (1)에서 구한 총 열전달율 \dot{q}_1 을 식 (2)에 대입함으로써 관 내 용제온도를 포화온도까지 상승시키기 위한 열교환기 #1의 전열면적 A_1 을 구할 수 있다.

$$A_1 = \frac{\dot{q}_1}{U \Delta T_{lm}} \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{D_{ii} \ln(D_{io}/D_{ii})}{2k_w} + \frac{D_{ii}}{h_o D_{io}}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{oi} - T_{so}) - (T_{oo} - T_{si})}{\ln \left[\frac{(T_{oi} - T_{so})}{(T_{oo} - T_{si})} \right]} \quad (4)$$

여기서, k_w 는 내관의 재질인 스테인레스 스틸의 열전도 계수(W/m · K)로서 14.2 W/m · K이고, D_{ii} 와 D_{io} 는 각각 내관의 내경 8mm 및 외경 9.6mm이며 T_{oi} 와 T_{oo} 는 각각 외관의 입구 및 출구 열매체유 온도(°C)이다. h_i 와 h_o 는 각각 관 내에서 용제와 열매체유의 대류 열전달계수(W/m² · K)로서, 강제대류 열전달의 일반적인 경험식인 Dittus-Boelter 관계식을 사용하여 식 (5)에서 계산한다.^{5,7)}

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^b = \frac{hD}{k_L} \quad (5)$$

여기서, Nu_D 는 관내에 유동하는 액체의 Nusselt 수, Re 는 Reynolds 수, Pr 은 Prandtl 수. k_L 은 열전도계수(W/m · K), h 는 대류 열전달계수(W/m² · K). D 는 액체가 유동하는 관 직경(m)이다. 지수 b 는 냉각되는 유체에서는 0.3, 가열되는 유체에서는 0.4의 값을 가진다.^{5,7)}

3.2. 비등구간의 열교환기 해석

포화된 용제를 잠열에 의해 포화기체로 상변화시키는 비등구간인 열교환기 #2는 용제의 증발잠열에 따른 에너지 평형식을 사용하여 해석할 수 있다. 식 (6)은 이중관형 열교환기 내관의 용제가 외관의 고온 열매체유로부터 열공급을 받아 비등시키는데 소요되는 총 열전달을 \dot{q}_2 를 나타내며, 용제유량과 증발잠열을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\dot{q}_2 = \dot{m}_s \lambda_s \quad (6)$$

여기서 \dot{q}_2 는 열전달율(W), \dot{m}_s 는 용제의 질량유속(kg/sec), λ_s 는 용제의 증발잠열(J/kg)이다.

용제의 비등구간인 열교환기 #2의 전열면적 A_2 는 식 (6)로부터 구한 총 열전달율 \dot{q}_2 를 구하여 3.1절에 기술된 열교환기 #1과 같은 방법으로 식 (3)~식 (5)를 통하여 총괄 열전달 계수 U 및 대수 평균 온도차 ΔT_{lm} 을 계산하여 구한다. 따라서 포화된 용제를 잠열에 의해 포화기체로 상변화시키는 비등구간인 열교환기 #2의 전열면적 A_2 (m²)는 용제의 증발잠열에 따른 열평형식을 사용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$A_2 = \frac{\dot{q}_2}{U\Delta T_{lm}} \quad (7)$$

본 연구에서는 물, 벤젠 및 알킬벤젠 등의 용제에 대해서 3.1절과 3.2절의 이중관형 열교환기 #1과 #2의 해석과정을 통해 용제유량과 가열온도를 주요 변수로 하여 열교환기 #1과 #2의 전열면적 A_1 과 A_2 를 각각 이론적 및 실험적으로 분석하였으며, 관 내의 용제 증발을 위한 총 전열면적 A_{Total} 은 온도상승 구간 A_1 과 비등구간 A_2 의 합으로서 해석하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2는 용제회수용 이중관형 열교환기 해석을 위한 실험장치 개략도를 나타낸 것으로, 용제 공급펌프, 이중관형 열교환기, 열매체유 히터, 열매체유 펌프, 스프레이 챔버, 진공펌프, 응축기, 분리입자 포집실, 회수용제 탱크 등으로 구성되어 있다. 용제는 저장탱크로부터 인버터(Inverter)로 유량 제어되는 용제 공급펌프(주)필텍, PT-50)에 의해 이중관형 열교환기의 내관(직경 8 mm)에 유입하면, 외관에서 전열히터(용량 20 kW)에 의해 최대 온도 260°C로 가열되어 순환되는 고온 열매체유로부터 열을 공급받는다. 내관에서 유동하는 용제액이 가열, 팽창 및 증발과정속에서 상변화하여 포화증기가 되고 스프레이 챔버내로 고속으로 분사되면 진공펌프에 의해 응축기로 수송되어 고순도 용제로 액화된 후 용제회수 탱크에서 회수된다. 이때 스프레이 챔버 내부벽 표면온도를 열매체유 온도로 유지시킴으로서, 온도차에 기인하여 내벽

표면에 용제의 과열증기가 응결되는 것을 방지하였다.

총 길이 30 m의 이중관형 열교환기 내관에 1.5 m간격으로 온도센서(Thermocouple, K Type)를 설치하고 데이터 수집 및 처리장치(Data Logger, FLUKE, HYDRA series II)를 사용하여 가열관 길이에 따라 측정되는 관 내 용제의 온도값을 컴퓨터와 연결시켜 연속적으로 측정하였다. 관 내 용제의 증발특성 해석은 용제유량 및 가열온도 변화속에서 수행되었는데, 물은 유량 0.08~0.27 l/min, 가열온도 160~220°C범위에서, 벤젠은 유량 0.3~0.5 l/min, 가열온도 130~170°C범위에서 그리고 알킬벤젠은 유량 0.3~0.36 l/min, 가열온도 260°C에서 전열면적에 따른 관 내 온도분포를 측정하였다. 관 길이에 따른 온도분포 측정값으로부터 온도상승 구간과 온도가 일정한 비등구간의 전열면적을 용제 증발을 위한 전열면적으로 분석하였다.

Table 1은 본 실험에서 사용된 물, 벤젠(Benzene) 및 알킬벤젠(Alkylbenzene)에 대하여 비등점에서의 물성치를 나타낸 것으로, 3종류 용제에 대하여 용제유량과 가열온도에 따른 관 내 증발특성을 조사하였다.^{7,8)} 관 내에서 유동하는 액체는 액체유량과 가열온도 변화에 따라 액체가 공급받는 열량이 변화하며, 액체유량 증가 및 가열온도 감소에 따라 단위 전열면적당 열전달량이 감소되기 때문에 액체증발에 요구되는 전열면적이 증가한다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 물의 증발특성 분석

이중관형 열교환기의 전열면적 해석과 용제 증발특성

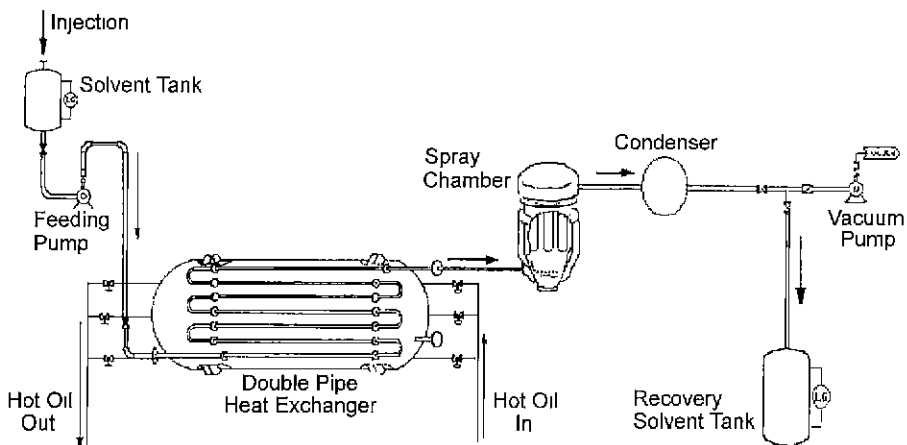


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for evaluating the double pipe heat exchanger for waste solvent recovery.

Table 1. Properties of solvents used in the test

Items	Water	Benzene	Alkylbenzene
Boiling Point(°C)	100	80.1	206
Density(kg/m ³) (at boiling point)	958	815	750
Viscosity(kg/m · sec) (at boiling point)	2.81×10^{-4}	3.29×10^{-4}	0.5×10^{-3}
Specific Heat(I/kg · K) (at boiling point)	4,216	2,087	4,098
Thermal Conductivity (W/m · K)(at boiling point)	0.68	0.13	0.15
Latent Heat(kJ/kg) (for vaporization)	2,257	394	762

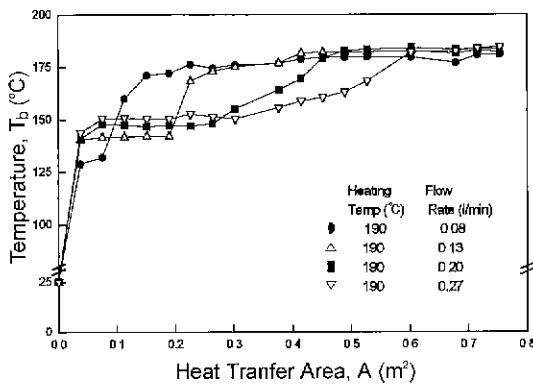


Fig. 3. Experimental results of bulk fluid temperature as a function of water flow rate and heat transfer area.

을 분석하기 위해 시험용 용제로서 물을 선택하여 실험 값과 이론값을 비교, 분석한 후 적용용제인 벤젠과 알킬벤젠용 열교환기 설계자료로 이용하고자 한다.

Fig. 3 은 물의 유량변화에 대해 전열면적에 따른 관 내 온도분포 측정결과이며, 가열온도를 190°C로 일정하게 하고 물유량을 0.08~0.27 l/min 으로 변화시키면서 물의 증발을 위해 필요한 전열면적을 측정하였다. 관내로 25°C의 상온으로 투입된 물은 전열면적이 증가함에

따라 온도상승 구간, 일정한 포화온도를 갖는 비등구간, 그리고 온도가 다시 상승하는 단상의 과열증기 구간의 3구간으로 나누어지며, 과열증기 구간이후의 일정한 온도분포로 측정되는 구간은 주어진 가열온도 조건에서 공급열량에 의해 더 이상 상승하지 않는 물의 최고 온도를 나타낸다. 물유량이 0.08 l/min, 0.13 l/min, 0.20 l/min, 0.27 l/min의 경우 포화온도까지 상승을 위해 필요한 전열면적은 각각 0.038 m², 0.038 m², 0.076 m², 0.076 m²이고, 비등구간에 필요한 전열면적은 각각 0.038 m², 0.151 m², 0.188 m², 0.226 m²이므로, 관 내 물 증발을 위해 요구되는 총 전열면적은 온도상승 구간과 비등구간의 전열면적으로서 각각 0.076 m², 0.188 m², 0.264 m², 0.302 m²로 측정되었다. 측정결과로부터 동일한 가열온도 조건하에서 물의 증발을 위해 물 유량이 증가할수록 온도상승과 비등에 필요한 공급열량이 증가하므로 물의 증발을 위해 요구되는 총 전열면적도 증가함을 알 수 있는데, 이는 동일한 가열온도에 대해 유량증가에 따라 상대적으로 단위 전열면적당 물로의 열전달량이 감소하기 때문이다.

Table 2 는 Fig. 3 에서 나타낸 물 유량변화에 따라 관 내 물의 증발을 위해 요구되는 전열면적 측정값과 예측값을 비교한 것으로, 모델링에 의해 예측된 값은 측

Table 2. Comparison of measured and predicted heat transfer area as a function of water flow rate

Flow Rate (l/min)	Measured Heat Transfer Area(m ²)			Predicted Heat Transfer Area(m ²)		
	A ₁	A ₂	A _{Total}	A ₁	A ₂	A _{Total}
0.08	0.038	0.038	0.076	0.027	0.046	0.073
0.13	0.038	0.151	0.189	0.034	0.145	0.179
0.20	0.076	0.188	0.264	0.065	0.193	0.258
0.27	0.076	0.226	0.302	0.080	0.234	0.314

Note 1. A₁: heat transfer area of heat exchanger #1, 2. A₂: heat transfer area of heat exchanger #2, 3. A_{Total}: total heat transfer area(=A₁+A₂).

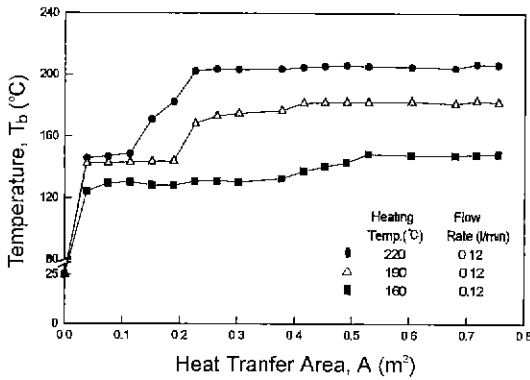


Fig. 4. Experimental results of bulk fluid temperature as a function of heating temperature for water and heat transfer area.

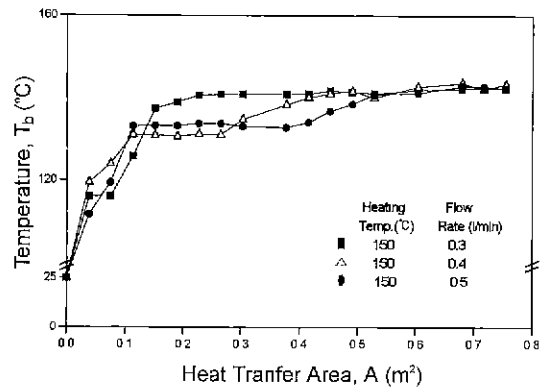


Fig. 5. Experimental results of bulk fluid temperature as a function of flow rate for benzene and heat transfer area.

정값과 비교하여 오차를 $\pm 5\%$ 범위에서 일치하였으며 총괄 열전달 계수 및 대수 평균 온도차를 이용한 열평형식을 사용하여 관 내 물 증발을 위한 전열면적 예측이 가능함을 확인하였다. 모델링 해석을 통하여 물 증발특성을 위해 물 유량 및 가열온도가 이중관형 열교환기의 전열면적 설계에 주요 변수임을 분석하였다.

Fig. 4는 물의 가열온도 변화에 대해 전열면적에 따른 관 내 온도분포 측정결과이며, 물 유량을 0.12 l/min으로 일정하게 하고 가열온도를 160~220°C로 변화시키면서 물의 최적 증발을 위해 필요한 전열면적을 측정하였다. 물의 가열온도가 160°C, 190°C, 220°C의 경우, 온도상승을 위해 필요한 전열면적은 각각 0.076 m², 0.038 m², 0.038 m²이고, 비등구간에 필요한 전열면적은 각각 0.226 m², 0.151 m², 0.076 m²이므로, 관 내 물 증발을 위해 요구되는 총 전열면적은 온도상승 구간과 비등구간의 전열면적으로서 각각 0.302 m², 0.189 m², 0.114 m²으로 측정하였다. 동일한 물 유량 조건하에서 가열온도를 증가시켜 공급열량이 커질 때, 물의 증발을 위해 요구되는 총 전열면적이 감소하고 있으며, 이는 동일 유량에 대해 가열온도가 증가함에 따라 물 증발을

위한 에너지가 증가하며 단위 전열면적당 물로의 열전달량이 증가하기 때문이다.⁷⁻¹⁰⁾

Table 3은 Fig. 4에서 나타낸 가열온도 변화에 따라 관 내 물의 증발을 위해 요구되는 전열면적 측정값과 예측값을 비교한 것으로, 가열온도 증가에 따른 전열면적의 예측값이 측정값에 일치하였으며 이중관형 열교환기내 물의 증발특성 예측이 가능함을 알 수 있었다 따라서 관 내 용제의 증발특성 규명을 위해 물 유량 및 가열온도 변화에 대한 열교환기 전열면적 특성에 대하여 실험적 및 이론적 분석결과, 이중관형 열교환기 및 열평형 모델링 검증의 타당성을 검토하였다.

5.2. 벤젠의 증발특성 분석

Fig. 5는 관 내 벤젠의 증발을 위한 전열면적 분석을 위해 벤젠의 유량을 증가시키면서 열교환기 전열면적 증가에 따른 관 내 온도분포 측정결과이며, 벤젠은 안료 및 화학산업에서 입자와 혼합되어 이용되는 대표적 용제이다. 가열온도를 150°C로 일정하게 하고 벤젠유량을 0.3~0.5 l/min으로 변화시키면서 벤젠의 증발을 위해 필요한 전열면적을 측정하였다. 벤젠유량이 0.3 l/min,

Table 3. Comparison of measured and predicted heat transfer area as a function of heating temperature for water

Heating Temperature(°C)	Measured Heat Transfer Area(m ²)			Predicted Heat Transfer Area(m ²)		
	A ₁	A ₂	A _{Total}	A ₁	A ₂	A _{Total}
160	0.076	0.226	0.302	0.052	0.236	0.288
190	0.038	0.151	0.189	0.034	0.145	0.179
220	0.038	0.076	0.114	0.030	0.090	0.120

Table 4. Comparison of measured and predicted heat transfer area as a function of flow rate for benzene

Flow Rate (l/min)	Measured Heat Transfer Area(m ²)			Predicted Heat Transfer Area(m ²)		
	A ₁	A ₂	A _{Total}	A ₁	A ₂	A _{Total}
0.3	0.038	0.038	0.076	0.030	0.050	0.080
0.4	0.113	0.151	0.264	0.097	0.155	0.252
0.5	0.113	0.264	0.377	0.103	0.288	0.391

0.4 l/min, 0.5 l/min의 경우, 관 내 벤젠증발을 위해 요구되는 총 전열면적은 온도상승 구간과 비등구간의 전열면적으로서 각각 0.076 m², 0.264 m², 0.377 m²으로 측정하였다. 측정결과로부터 일정한 가열온도에 대해 관 내 벤젠유량이 증가할수록 유량증가에 따라 상대적으로 단위 전열면적당 벤젠으로의 열전달양이 감소하기 때문에 온도상승 구간과 비등구간 전열면적이 증가하여 결과적으로 벤젠의 최적 증발을 위해 필요한 총 전열면적도 증가함을 알 수 있다. 물과 벤젠의 증발특성을 고려한 전열면적 측정결과를 비교하면 물 유량 0.27 l/min에서 물 증발을 위한 전열면적 0.302 m²이고 벤젠 0.3 l/min의 경우 0.076 m²로 나타났으며 유사한 유량에 대해 물이 벤젠보다 증발을 위해 요구되는 전열면적이 매우 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 Table 1 과 같이 물이 벤젠보다 약 20°C정도 높은 비등온도를 갖고 비등에 필요한 잠열도 5배이상 높기 때문에 증발을 위해 필요한 열 에너지가 높으며 전열면적도 커지기 때문이다.

Table 4 는 Fig. 5 에서 나타난 벤젠 유량변화에 따라 관 내 벤젠의 증발을 위해 요구되는 전열면적 측정값과 동일조건하에서 열평형 모델링을 사용한 예측값을 비교한 것으로, 모델링에 의해 예측된 값이 측정값과 일치함을 알 수 있으며 관 내 벤젠증발을 위한 전열면적 예측이 가능하고 용제 증발용 열교환기의 효율적 설계가 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 6 은 벤젠의 가열온도 변화에 따른 전열면적 증가에 따른 관 내 온도분포 측정결과이며, 벤젠유량을 0.3 l/min으로 일정하게 하고 가열온도를 130~170°C 로

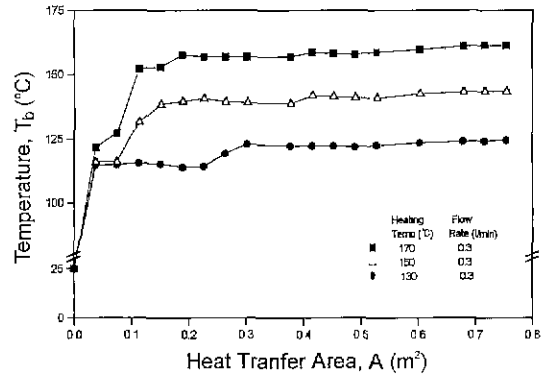


Fig. 6. Experimental results of bulk fluid temperature as a function of heating temperature for benzene and heat transfer area.

변화시키면서 벤젠의 증발을 위해 필요한 전열면적을 측정하였다. 벤젠의 가열온도가 130°C, 150°C, 170°C의 경우, 관 내 벤젠 증발을 위해 요구되는 총 전열면적은 온도상승 구간과 비등구간의 전열면적으로서 각각 0.226 m², 0.076 m², 0.038 m²으로 측정하였다. 벤젠이 유동하는 관 내에서 가열온도가 증가할수록 벤젠의 증발을 위해 요구되는 총 전열면적이 감소함을 알 수 있는데, 이는 동일한 벤젠유량에 대해 가열온도가 증가함에 따라 관 내벽을 통해 벤젠으로 전달되는 단위 전열면적당 열전달양이 증가하기 때문이다. 벤젠과 물에 대한 전열면적 측정결과와 비교할 때, 물 유량 0.12 l/min 조건에서 가열온도를 160~190°C로 변화시 측정된 전

Table 5. Comparison of measured and predicted heat transfer area as a function of heating temperature for benzene

Heating Temperature(°C)	Measured Heat Transfer Area(m ²)			Predicted Heat Transfer Area(m ²)		
	A ₁	A ₂	A _{Total}	A ₁	A ₂	A _{Total}
130	0.038	0.188	0.226	0.054	0.182	0.236
150	0.038	0.038	0.076	0.030	0.050	0.080
170	0.038		0.038	0.010	0.026	0.036

열면적 변화 0.189~0.302 m²는 벤젠유량 0.3 l/min 조건에서 가열온도를 150~170°C로 변화시 측정된 전열면적 변화 0.038~0.076 m²보다 유사한 가열온도에서 유량이 작음에도 불구하고 전열면적이 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 물이 벤젠보다 높은 비등온도를 갖고 비등에 필요한 잠열도 5배이상 높기 때문에 증발을 위해 높은 열 에너지가 필요하며 비등온도와 잠열이 낮은 용제보다 요구되는 전열면적도 커지기 때문이다.

Table 5 는 Fig. 6 에서 나타낸 가열온도 변화에 따라 관 내 벤젠의 증발을 위해 요구되는 전열면적 측정값과 예측값을 비교한 것으로, 열평형식에 의해 예측된 값이 측정값과 일치함을 알 수 있으며 응용 용제인 벤젠의 증발특성 분석으로서 관 내 벤젠증발을 위해 요구되는 전열면적 특성을 열평형 모델링에 의해 예측가능함을 확인하였다.

5.3. 알킬벤젠의 증발특성 분석

Fig. 7 은 화학 및 안료산업에서 대표적으로 이용되는 용제인 알킬벤젠의 유량변화에 대해 전열면적 증가에 따른 관 내 온도분포 측정결과이며, 가열온도를 260°C

로 일정하게 하고 알킬벤젠 유량을 0.33~0.36 l/min으로 변화시키면서 알킬벤젠의 증발을 위해 필요한 전열면적을 측정하였다. 알킬벤젠 유량이 0.33 l/min, 0.36 l/min의 경우, 관 내 알킬벤젠의 증발을 위해 요구되는 총 전열면적은 온도상승 구간과 비등구간의 전열면적으로서 각각 0.377 m², 0.452 m²으로 측정하였다. 동일한 가열온도 조건하에서 알킬벤젠 유량이 증가할수록 온도상승 구간과 비등구간의 전열면적이 증가하며 결과적으로 알킬벤젠의 증발을 위해 필요한 총 전열면적도 증가함을 알 수 있는데, 이는 동일한 공급열량에 대해 알킬벤젠 유량이 증가할수록 상대적으로 단위 전열면적당 알킬벤젠으로의 열전달량이 감소하므로 증발을 위해 요구되는 전열면적이 커지기 때문이다. 물, 벤젠 및 알킬벤젠의 증발을 위해 필요한 전열면적 측정결과를 비교하면 알킬벤젠의 경우 유량 0.33 l/min에서 0.377 m²로 나타나며 이는 물 0.27 l/min에서 0.302 m²과 벤젠 0.3 l/min에서 0.076 m²보다 유사한 유량에 대해 알킬벤젠이 물과 벤젠보다 증발을 위해 요구되는 전열면적이 매우 크게 분석되었다. Table 1 에서 보는 바와 같이 알킬벤젠의 비등온도는 206°C로 물과 벤젠보다 100°C이상 높기 때문에 알킬벤젠 증발을 위해 필요한 열 에너지가 높으며 동일조건하에서 비등온도가 낮은 용제보다 요구되는 전열면적이 커지기 때문이다.

Table 6 은 Fig. 7 에서 나타낸 알킬벤젠 유량변화에 따라 관 내 알킬벤젠의 증발을 위해 요구되는 전열면적 측정값과 예측값을 비교한 것으로, 물과 벤젠의 경우와 같이 오차를 ±5%범위내에서 일치하였으며 총괄 열전달 계수 및 대수 평균 온도차를 이용한 열평형식을 사용하여 관 내 알킬벤젠의 증발을 위해 요구되는 열교환기 설계가 가능함을 알 수 있었다 따라서 이중 관 내 용제증발 특성의 모델링 및 실험적 분석결과를 토대로 관 내 용제증발을 위한 전열면적에 대해 정밀도가 높은 설계가 가능하며 이는 폐용제의 증발과정을 통해 고순도 용제로 회수하는 폐용제 회수시스템 개발과 향후 폐자원 재활용 기술에 적용가능하다고 평가할 수 있다.

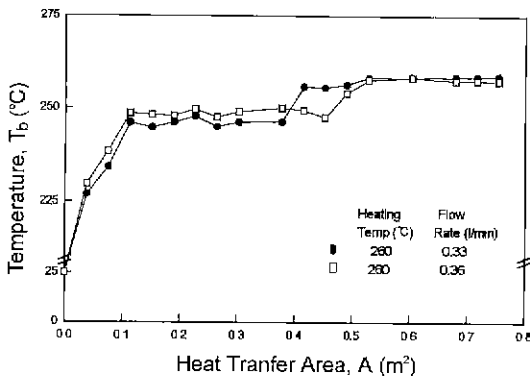


Fig. 7. Experimental results of bulk fluid temperature as a function of flow rate for alkylbenzene and heat transfer area.

Table 6. Comparison of measured and predicted heat transfer area as a function of flow rate for alkylbenzene

Flow Rate (l/min)	Measured Heat Transfer Area(m ²)			Predicted Heat Transfer Area(m ²)		
	A ₁	A ₂	A _{Total}	A ₁	A ₂	A _{Total}
0.33	0.113	0.264	0.377	0.121	0.267	0.388
0.36	0.113	0.339	0.452	0.131	0.344	0.475

6. 결 론

본 연구는 폐용제 회수용 이중관형 열교환기내 용제의 증발특성 해석에 관한 것으로 물, 벤젠 및 알킬벤젠 등의 용제에 대하여 용제유량 및 가열온도를 주요 변수로 하여 용제 증발을 위한 전열면적 변화를 예측 및 측정하여 열전달 특성을 해석하였다.

1. 이중관형 열교환기의 관 내 온도분포를 측정하여 용제증발을 위해 필요한 총 전열면적이 온도상승 구간과 비등구간 각각의 전열면적 합으로 분석되었으며, 관 내 용제증발을 위한 총 전열면적은 용제유량이 감소하거나 가열온도가 증가할수록 단위 전열면적당 열전달량이 증가 하기 때문에 감소하는 것으로 분석되었다.

2. 관 내 용제증발을 위한 전열면적을 이론적 해석 및 측정을 통해 분석한 결과, 이론값은 오차율 $\pm 5\%$ 범위내에서 실험값과 일치하였으며, 이중관형 열교환기 내 각종 용제의 증발특성 해석이 가능하다.

3. 이중관 내 용제증발 특성의 모델링 및 실험적 분석결과를 토대로 이중관형 열교환기를 사용하여 폐용제의 증발과정을 통해 고순도 용제로 회수하는 폐용제 회수시스템에 적용가능하고 폐자원 재활용에 기여가 가능하다.

감사의 글

본 논문은 1998년도 부산대학교 학술연구조성비를 지원받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부 · “1997년 환경백서”, 환경부 (1997).

2. 김주향 · “원유의 현상과 리사이클”, 월간 폐기물 10월호, 중앙환경신문사, pp. 96-106 (1994).
3. 조영수 · “외국의 폐유 재활용 사례”, 월간 폐기물 10월호, 중앙환경신문사, pp. 114-118 (1994).
4. 김민수 · 유체로 가열되는 원관 내 냉매의 증발과정 열전달”, 대한기계학회 1995년 춘계학술대회논문집(II), pp. 576-580 (1995)
5. Shires, G.L · “Process Heat Transfer”, CRC Press (1994).
6. 前川 · “순간진공건조장치 Cracks System”, 월간 화학장치, 화학공업조사회, 통권 41, 7월호, pp. 100-104 (1996).
7. Incropera, F.P. and D.P. DeWitt · “Fundamental of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, Inc. (1996).
8. Perry, R.H. and D.W. Green · “Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition”, McGraw-Hill (1997)
9. 이상용, 김병주, 김부환 · “이상유동열전달”, 대영사 (1993)
10. Masters, K. · “Spray Drying Handbook”, Longman Scientific & Technical (1985).
11. 박경덕, 이제근, 구제현, 박인철 · “용제회수 · 건조 및 폐유 정제용 연속식 순간진공건조 시스템개발에 관한 연구”, 한국자원리사이클링학회 1997년도 추계학술대회, 서울 한국과학기술회관, pp. 35-36 (1997).
12. 구제현, 박인철, 박경덕, 이제근 · “용제회수 · 건조 및 폐유 정제용 연속식 진공건조장치 개발”, 월간 폐기물, 12월호, pp. 126-130 (1997)
13. 조현호, 구제현, 현옥천, 정중호, 이종호, 이정언, 이제근 · “폐솔벤트 회수용 이중관형 열교환기의 성능평가”, 한국자원리사이클링학회 1999년도 춘계학술대회, 5.28,~5.29., 부산 부경대학교 제 7공학관, pp. 116-117 (1999)
14. 박경덕 · “열교환기 튜브내에서 액적 미립화 특성 연구”, 부산대학교 공학석사 학위논문 (1998).
15. 박인철 · “액상에 함유된 입자의 건조 및 분리를 위한 이중관형 열교환기의 특성에 대한 연구”, 부산대학교 공학석사 학위논문 (1999).



具 宰 賢

- 부산대학교 정밀기계공학과 박사과정
- 환경유체공학



李 在 瑾

- 부산대학교 기계공학부 부교수, 공학 박사
- 환경유체공학