

## 廢溶劑에 含有된 粒子의 乾燥 및 分離用 連續式 瞬間 眞空乾燥시스템 解析

具宰賢 · \*李在瑾

釜山大學校 機械工學科

### Analysis of a Continuous and Instantaneous Vacuum Drying System for Drying and Separation of Suspended Particles in Waste Solvent

Jae-Hyun Ku and \*Jae-Keun Lee

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

#### 요 약

본 연구는 입자가 혼합된 용제를 이중관형 열교환기 내에서 가열 및 증발과정을 통해 건조입자와 용제로 분리하여 회수하기 위한 연속식 순간 진공건조 시스템 해석에 관한 것이다. 진공건조시스템은 용제 공급펌프, 이중관형 열교환기, 진공 스프레이 챔버 및 응축기로 구성된다. 연속적으로 공급되는 용제는 이중관형 열교환기 내에서 가열, 팽창 및 증발되며 관 출구부에서 팽창된 증기가 진공 스프레이 챔버 내로 분사되고, 증기는 응축기로 수송되어 용제로 회수되고 입자는 관성력에 의해 증기로부터 분리되어 건조된다. 안료입자가 함유된 벤젠 및 알킬벤젠의 분리 및 회수성능 실험을 수행한 결과, 습분양 1.1%로 건조된 안료입자를 94% 회수하였고, 99.9 wt%의 고순도 벤젠을 88% 회수하였다. 평균직경이 6.5  $\mu\text{m}$ 인 안료입자를 진공건조시스템의 이중관형 열교환기에서 관 출구부의 고속 분사에 의한 폭발적 분산력에 의해 입경이 14% 감소된 5.6  $\mu\text{m}$  크기의 건조 안료입자를 회수하였다. 따라서 진공건조시스템은 용제에 함유된 입자를 건조 및 분리하여 미분체 제품으로 회수하는데 효율적이며 폐용제 정제용으로 적용이 가능하다.

주제어: 진공건조시스템, 증발, 건조, 분리, 용제 회수

#### ABSTRACT

This study describes to analyze the characteristics for separation and recovery of both the dried particles and the purified solvent from the waste solvent through the vaporization process by the continuous and instantaneous vacuum drying system. The vacuum drying system for the waste solvents recovery consists of a feeding pump, a double pipe heat exchanger, a vacuum spray chamber, and a condenser. The vacuum drying system heats the waste solvent to the vapor in the double pipe heat exchanger and the expanded vapor is sprayed at the end of the tube. The vaporized solvent in the condenser are recovered. The particles in the waste solvent are separated and dried from the vapor in the vacuum spray chamber. Performance evaluation of the vacuum drying system was conducted using the mixture of the dried pigment particles and benzene or alkylbenzene as test samples. For the mixture of 10 wt% pigment particles and 90 wt% benzene, the recovery efficiency of benzene was 88% with the purity of 99.9% and the recovery efficiency of dried particles was 94% with the moisture of 1.1 wt%. The size of pigment particles was decreased from 6.5  $\mu\text{m}$  to 5.6  $\mu\text{m}$  in diameter due to high speed spraying and dispersion in the vacuum drying system during drying process. Therefore, the vacuum drying system showed to be an effective method for separating particles and solvent in the waste solvent.

**Key words:** Vacuum drying system, vaporization, drying, separation, solvent recovery

\* 2000년 5월 3일 접수, 2000년 7월 5일 수리

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

## 1. 서 론

산업의 발달로 국내에서 발생하는 폐솔벤트 양은 갈수록 급속하게 증가하여 연간 약 75만톤에 이르고 있으며 대부분 불법 폐기되기 때문에 자원 낭비와 함께 치명적인 환경오염 문제를 일으키고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 1995년 폐용제의 발생량은 연간 353천톤이 발생한 것으로 추정되고 이는 전년도와 비교하여 50.9%가 증가한 수치로써 갈수록 증가하고 있는 추세이다.<sup>3)</sup> 현재 폐용제 재활용기술은 간단하게 필터처리, 원심분리처리, 침전처리 등의 방식을 사용하거나, 유산/활성백토 처리, 진공박막 증류정제, 이온 정제하여 사용하는 것이 대부분이다.<sup>2,3)</sup> 기존의 재활용 기술들은 처리과정 중에서 제 2차 유독성 폐기물이 발생하여 재처리하여야 하고, 재생된 연료유나 용제도 저등급 용제이어서 재사용이 기피되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 건조, 증발농축, 입자결정 기술을 사용하여 폐유와 폐용제의 증발공정을 통해 고급 연료유나 고순도의 용제를 회수하고 용제 내에 함유된 입자를 건조시켜 고급분체로 재활용 가능하며, 제 2차 폐기물이 발생하지 않는 재활용 기술에 대해 국내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>2,3)</sup> 그러나 폐용제 재활용 기술은 건조기, 증발농축기, 입자결정 장치 등을 통하여 불연속적인 작업속에서 수행되고 있고 장치 내 폐용제의 2상유동 증발과정속에서 그 현

상자체가 복잡하여 열전달 해석을 통한 시스템 성능분석의 체계적 연구가 부족한 실정으로 주로 실험에 근거를 두고 있으므로, 이에 대한 정량적 해석에 의해 폐용제에 함유된 입자를 최적 건조 및 분리시키는 것이 중요하다.

본 연구는 입자가 혼합된 용제를 이중관형 열교환기 내에서 가열 및 증발과정을 통해 건조입자와 용제로 분리하여 회수하기 위한 연속식 순간 진공건조 시스템 해석에 관한 것이다. 시스템은 용제 공급펌프, 이중관형 열교환기, 진공 스프레이 챔버 및 응축기로 구성되며, 안료입자가 함유된 벤젠 및 알킬벤젠을 사용하여 건조입자와 고순도 용제의 분리 및 회수능 실험을 통해 시스템 성능을 분석하였다. 시스템 성능 분석으로 건조입자의 회수율, 습분양, 형상 및 입경분포를 분석하였으며, 또한 회수용제의 순도와 회수율 분석도 수행하였다. 본 연구결과는 연속식 순간 진공 건조시스템을 사용하여 폐용제를 건조 입자 및 고순도 용제로 분리 및 회수하고 향후 폐자원 재활용 기술에 기여하고자 한다.

## 2. 연속식 순간 진공건조시스템 개요

연속식 순간 진공건조시스템은 폐용제와 폐유의 열분해 특성을 이용하여 재활용 가능한 제품으로 회수할 수

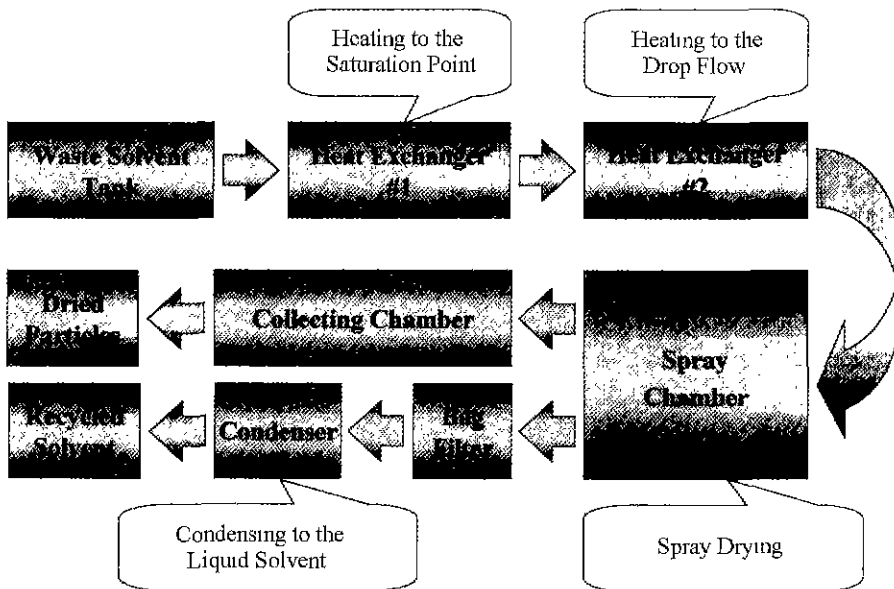


Fig. 1. Flow chart of the vacuum drying system.

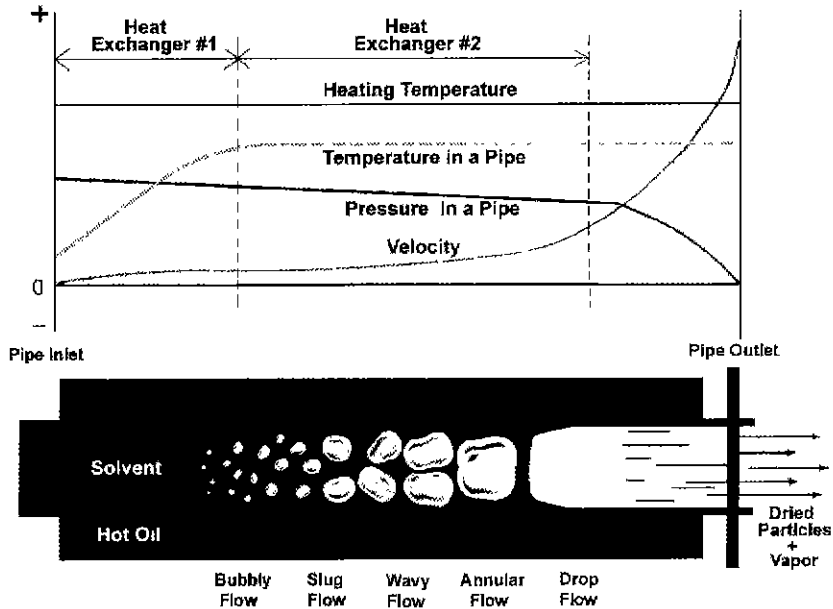


Fig. 2. Flow patterns of waste solvents in a double pipe heat exchanger<sup>3)</sup>

있는 장치로, 용제 공급펌프, 이중관형 열교환기, 열매체 유 히터, 열매체유 펌프, 스프레이 챔버, 진공펌프, 응축기, 분리입자 포집실, 회수용제 탱크 등으로 구성된다. 가열관 내에서 폐용제의 가열, 팽창 및 증발과정을 통해 팽창된 용제의 증기는 진공압이 인가된 스프레이 챔버(spray chamber) 내로 분부되며, 증기는 응축기에 의해 용제로 회수되고 입자는 관성력에 의해 증기로부터 분리되어 건조된다. 연속적으로 공급되는 폐용제로부터 건조입자와 고순도 용제로 분리 및 회수함으로써 각종 유기 화합물이 함유된 폐유 및 폐용제를 재활용할 수 있는 장치이다.

Fig. 1은 연속식 순간 진공건조시스템의 폐용제 처리 흐름도를 나타낸 것으로, 원료의 열분해특성을 이용하여 원료의 가열 및 증발과정을 통해 휘발성분을 제거하고, 비휘발성분을 분리하는 건조기법을 사용한다. 폐용제의 일정량이 저장탱크로부터 열교환기부로 유입되면 용제온도를 증가시켜 포화온도까지 가열하는 열교환기 #1 및 포화된 폐용제를 증기화시켜 분무류까지 가열하는 열교환기 #2를 통과한다. 열교환기 #2의 가열관 출구부에서 용제의 증기는 진공압이 인가된 스프레이 챔버로 스프레이 되면서 폐용제 중에 함유된 입자가 관성력과 중력에 의해 증기와 분리되어 스프레이 챔버 하부에 있는 건조입자 포집실에서 연속적으로 회수된다. 용제 증기는 진공펌프에 의해 챔버 상부로 진공 흡입되고 응축기에서 응축 및 액화되어 회수 용제탱크에서 연속

적으로 회수된다.

Fig. 2는 열교환기 가열관내 폐용제의 유동양식을 나타낸 것으로, 내부 관 내에서 유동하는 폐용제는 이중관형 열교환기 바깥관 내의 고온 열매체유로부터 일정한 열량을 공급받아 가열관 길이에 따라 폐용제내 기포발생 및 급격한 팽창현상을 발생시키며 기포류(bubbly flow), 슬러그류(slug flow), 파형류(wavy flow), 환상류(annular flow), 액적류(drop flow) 등으로 변화된다.<sup>3,4)</sup> 가열관 출구부에서는 분무류(spray flow)로 변화되어 폐용제의 증발과정을 통해 건조된 입자와 증기로 분리되고, 팽창된 증기는 스프레이 챔버내로 100 m/sec 이상의 고속으로 분부된다. 이때 관 내에서 일정량의 열량을 공급받는 폐용제가 유동할 때, 폐용제액의 팽창과 휘발 성분인 용제액의 순간적 증발에 의해 급격하게 속도가 증가하며 스프레이 챔버내의 진공압으로 인해 가열관 출구부에서 폭발적인 스프레이가 이루어진다. 이때 진공압이 인가된 스프레이 챔버내로 분사된 미세한 용제액적은 순간적으로 증발되어 폐용제에 함유된 입자들이 건조되며, 폭발적인 분산력을 통한 스프레이 건조과정에서 증발전의 응집입자들이 분산되거나 마모 및 분화현상으로 인해 입자의 미립화 현상을 나타낸다.<sup>3,4)</sup> 관 내 유속은 일정한 가열온도에서 열교환기 출구부의 속도가 급격히 증가하고 있는데, 이는 기포류, 슬러그류, 파형류까지는 부피팽창이 크지 않지만 환상류, 액적류를 거치면

Table 1. Applications of the continuous vacuum dryer system for recycling<sup>10)</sup>

Applied Mixtures	Solvents	Slurry Concentration (wt%)	Moisture Contents (%)
Electric material slurry	Acetone	20	0.1
Ceramic slurry	Octane	30	0.1
Ceramic slurry	Alcohol+Water	15	0.1
Dye	Aniline	40	10
Medium liquid	Benzene	30	0.1
Bottom liquid	Nitric acid	22	1.0
Bottom liquid	Dimethylacetamide and Water	20	0.1
Bottom liquid	High viscous liquid	30	2

서 관내 기공률이 증가하고 부피가 급격히 증가하기 때문이다.<sup>5,6)</sup>

Table 1 은 연속식 순간 진공건조시스템을 적용할 수 있는 분야에 대한 것으로, 유기 화합물의 용제회수·건조 및 폐유정제용으로 적용가능하다.<sup>3)</sup> 진공건조시스템은 유기용제 중에 분산되어 있는 세라믹 입자와 같이 폐용제 내에 함유된 고형물을 제품으로 분리하면서 용제는 회수하여 재활용하는 경우에 적용이 가능하며, 제품의 미립화와 함께 정제된 유기용제를 고순도로 회수 가능하므로 경제성이 높다. 초미립자 제품의 표면처리와 건조를 동시에 실시하는 경우에 적용이 가능하며, 세라믹을 충분히 분산시킨 유기용제 슬러리에 결합제(binder), 합성수지 및 계면활성제 등의 표면처리제를 첨가하여 용해시킨 후 건조시키면 입자표면은 표면처리제

에 균일하게 코팅됨으로써 여러 종류의 표면특성을 가진 초미립자 제품을 쉽게 얻을 수 있다.

### 3. 진공건조시스템 설계

Fig. 3 은 폐용제에 함유된 입자의 건조 및 분리를 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 전열선에 의해 예열할 수 있는 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 최대온도 260°C

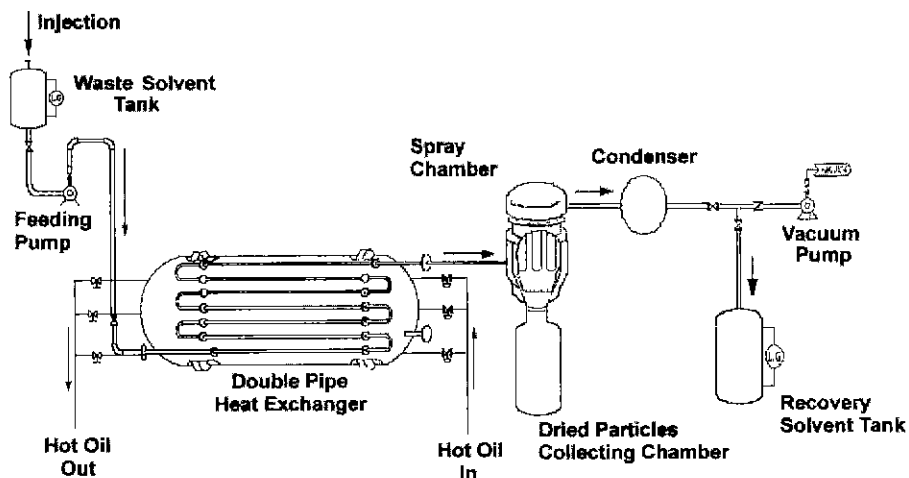


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus for drying and separating the mixture of solvent and particles.

로 가열되어 순환되는 고온 열매체유로부터 열을 공급 받는다. 내관에서 유동하는 용제액이 가열, 팽창 및 증발과정속에서 상변화하여 포화증기가 되고 620 mmHg의 진공압이 인가된 스프레이 챔버내로 고속 분사되면 진공펌프에 의해 응축기로 수송되어 고순도 용제로 액화된 후 용제회수 탱크에서 회수된다. 이때 스프레이 챔버 내부벽 표면온도를 열매체유 온도로 유지시킴으로써, 온도차에 기인하여 내벽 표면에 용제의 과열증기가 응결되는 것을 방지하였다.

본 연구에 사용되는 이중관형 열교환기는 두께 0.8 mm인 내관 내경 8 mm와 두께 2 mm인 외관 내경 30 mm 및 길이 30 m의 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. 가열관 내 용제 증발에 대한 열전달 해석은 대수 평균 온도차법(log mean temperature difference method)을 이용한 에너지 평형식(energy balance equation)을 사용하였다.<sup>7-10)</sup>

이중관내의 용제와 열매체유의 열교환 해석은 대수평균 온도차  $\Delta T_{lm}$ 를 이용한 열평형 식으로 나타낼 수 있으며, 다음의 식 (1)과 같이 열교환기의 총괄열전달에 관한 관계식으로 나타낸다.<sup>9,10)</sup>

$$\frac{1}{UA} = \frac{\Delta T_{lm}}{q} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{h_j k_w L} + \frac{hD}{h_o A_o} \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 총괄 열전달계수( $W/m^2 \cdot K$ ),  $A$ 는 전열면적( $m^2$ )으로  $A_i$ 는  $A_o$ 는 각각 용제가 유동하는 내관의 내부 및 외부 전열면적,  $\Delta T_{lm}$ 은 대수 평균 온도차( $^{\circ}C$ ),  $q$ 는 열전달율( $W$ ),  $k_w$ 는 내관의 재질인 스테인레스 스틸의 열전도율( $W/m \cdot K$ )로써 14.2  $W/m \cdot K$ 이고,  $D_i$ 와  $D_o$ 는 각각 내관의 내경 8 mm 및 외경 9.6 mm이다. 열전달을  $q(W)$ 는 열교환기 #1에서는 용제의 비열과 온도변화를 이용하고, 열교환기 #2에서는 용제의 잠열과 유량으로부터 구할 수 있다.  $h_i$ 와  $h_o$ 는 각각 관내에서 용제와 열매체유의 대류 열전달계수( $W/m^2 \cdot K$ )로, 강제대류 열전달의 일반적인 경험적인 Dittus-Boelter 관계식을 사용하여 식 (2)에서 계산한다.<sup>11,12)</sup>

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.45} Pr^b = \frac{hD}{k_L} \quad (2)$$

여기서,  $Nu_D$ 는 관내에 유동하는 액체의 Nusselt 수,  $Re_D$ 는 Reynolds 수,  $Pr$ 은 Prandtl 수,  $k_L$ 은 액체의 열전도율( $W/m \cdot K$ ),  $h$ 는 대류 열전달계수( $W/m^2 \cdot K$ ),  $D$ 는 액체가 유동하는 관 직경(m)이다. 지수  $b$ 는 냉각되는 유체에서는 0.3, 가열되는 유체에서는 0.4의 값을 가진다. 위의 식 (1)과 (2)를 사용하여 열교환기 가열관내 용제의 가열, 팽창 및 증발을 위한 가열관의 전열면적을 해석하였다.

#### 4. 실험 방법

본 연구에서 열유동 해석을 통해 설계 및 제작된 진공 건조시스템을 사용하여 안료입자가 10 wt% 함유된 벤젠 및 20 wt% 함유된 알킬벤젠을 건조입자와 고순도 용제로 분리 및 회수하였으며, 건조된 안료입자에 대하여 회수율, 습분양, 형상 및 입도분포를 분석하였고, 회수용제에 대하여 순도 및 회수율을 분석함으로써 진공건조시스템의 성능을 분석하였다. 회수용제의 순도는 회수 용제탱크로부터 회수한 용제에 대하여 습분측정기(OHAUS, MB200)를 사용하여 측정하였고, 회수율은 용제에 혼합된 용제의 분리 전과 후의 무게 차이를 통하여 분석하였다. 건조입자의 습분양은 포집실에서 포집된 건조 안료입자를 KS M5130 규정에 따라 채취하여 습분측정기(OHAUS, MB200)를 사용하여 KS M5108 규정에 의해 온도 110 $^{\circ}C$ 에서 2시간이상 가열한 후 측정하였으며, 건조입자의 형상 및 입도분포는 광학현미경(NAVITAR MICROMATE, x5000)과 입도분석기(image scanning particle analyzer, X5000, >0.3  $\mu m$ )를 사용하여 분석하였다. 분리된 건조입자의 회수율은 용제에 혼합된 안료입자의 분리 전과 후의 무게차이를 통하여 분석하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

##### 5.1. 진공건조시스템 열유동 분석

Table 2는 진공건조시스템의 성능분석용 용제로 사용한 벤젠(benzene) 및 알킬벤젠(alkylbenzene)에 대하여 비등점에서 물성치를 나타낸 것으로, 진공건조시스템을 사용하여 밀도 1.620  $kg/m^3$ 의 안료입자가 10 wt% 함유된 벤젠과 20 wt% 함유된 알킬벤젠에 대해 건조입자와 고순도 용제의 분리 및 회수실험을 수행하였다.<sup>13)</sup> 2종류의 성능분석용 용제에 대하여 3절에서 기술한 진

**Table 2.** Properties of solvents used in the test

Parameters	Benzene	Alkylbenzene
Boiling Point (°C)	80.1	206
Density (kg/m <sup>3</sup> ) (at boiling point)	815	750
Viscosity (kg/msec) (at boiling point)	$3.29 \times 10^{-4}$	$0.5 \times 10^{-3}$
Specific Heat (J/kg · K) (at boiling point)	2,087	4,098
Thermal Conductivity (W/m · K) (at boiling point)	0.13	0.15
Latent Heat (kJ/kg) (for vaporization)	394	762

공건조시스템 열유동 해석방법에 따라 시스템을 설계하였으며, 이중관형 열교환기 내의 용제온도를 비등점까지 상승시켜 증발시키는데 요구되는 열량을 고려하여 외관의 고온유로부터 내관의 용제로 전달되는 열전달율 (q)을 6 kW로 설정하여 시스템 해석을 수행하였다. 안료입자가 10 wt% 함유된 벤젠유량 20 kg/hr에 대하여 관 내에서 온도상승 및 비등을 위한 전열길이는 각각 2.6 m, 6.3 m로 계산되어 용제증발을 위해 필요한 총 전열길이는 8.9 m로 해석하였다. 안료입자가 20 wt% 함유된 알킬벤젠유량 40 kg/hr에 대하여 관 내에서 온도상승 및 비등을 위한 전열길이는 각각 6.8 m, 23 m로 계산되었으며 용제증발을 위해 필요한 총 전열길이는 29.8 m로 해석하였다. 스프레이 챔버 체적 0.65 m<sup>3</sup> 내에서 용제증기와 건조입자를 분리하고 용제증기는 전열면적 5 m<sup>2</sup>의 응축기에 의해 응축시켜 회수가능하도록 시스템 내 열유동을 해석하였다.

Table 3 은 진공건조시스템을 사용하여 벤젠 및 알킬벤젠에 대한 분리와 회수성능 운전조건을 나타낸 것으로, 관 내에서 벤젠을 비등점까지 온도상승시켜 증발시키는데 필요한 열전달율을 6 kW로 설정하기 위해 안료입자 10 wt%와 벤젠 90 wt%로 혼합된 벤젠 혼합액에 대하여 온도 25°C로 공급되고 열교환기부 외관에 유동하는 열매체유 온도는 210°C로 유지하면서 내관의 벤젠 혼합액으로 열을 공급하였다. 스프레이 챔버내 온도를 210°C로 유지함으로써 챔버의 내벽표면에 발생하는 입자응결을 방지하였고, 620 mmHg의 진공압을 인가하여 벤젠증기를 응축기로 수송하였다. 알킬벤젠의 분리 및 회수성능 운전조건인 경우, 벤젠과 동일한 실험 조건인 열전달율 6 kW를 설정하기 위해 안료입자 20

**Table 3.** Thermal analysis of the vacuum drying system

Parameters	Components	Mixture of Benzene and Pigments	Mixture of Alkylbenzene and Pigments
Weight Percentage of Pigments		10	20
Heat Transfer Rate		6 kW	6 kW
Hot Oil Temperature of Heat Exchanger #1		210°C	260°C
Hot Oil Temperature of Heat Exchanger #2		210°C	260°C
Temperature of Inlet Feeding		25°C	125°C
Temperature of Spray Chamber		210°C	260°C
Vacuum Pressure		620 mmHg	620 mmHg

wt%와 순수 알킬벤젠 80 wt%로 혼합된 알킬벤젠 혼합액에 대하여 저장탱크에서 예열시켜(preheating) 온도 125°C로 투입되고 열교환기부 외관에 유동하는 열매체유 온도는 260°C로 유지하면서 내관의 알킬벤젠 혼합액으로 열을 공급하였다. 스프레이 챔버내 온도를 260°C로 유지함으로써 챔버 내벽표면에 입자응결을 방지하였고, 620 mmHg의 진공압을 인가하여 알킬벤젠 증기를 응축기로 수송하였다.

**5.2. 안료입자를 함유한 용제의 분리 및 회수성능 분석**

Table 4 는 안료입자를 함유한 용제의 분리 및 회수성능을 분석한 결과로, 진공건조시스템을 사용하여 건조입자와 용제액으로 분리 및 회수하였으며 분리 전과 후의 안료입자와 용제액의 함량분포이다. 안료입자가 10 wt% 함유된 벤젠 혼합액에 대하여 습분양이 1.1 wt%로 측정된 건조입자의 경우 분리 전과 후의 무게차이로 회수율을 분석한 결과, 분리 전 벤젠 혼합액 전체의 함량 중에 10 wt% 함유되었던 안료입자의 함량이 분리 후 9.4 wt% 회수되어 입자회수율이 94%로 분석되었다. 분리 후 순도 99.9 wt%로 측정된 회수벤젠의 회수율을 분석한 결과, 분리 전 벤젠 혼합액 전체의 함량 중에 90 wt% 함유되었던 안료입자의 함량이 분리 후 79 wt% 회수되어 회수율이 88%로 분석되었다. 안료입자와 고순도 벤젠이 분리되어 모두 회수되지 못한 원인은 건조입자의 경우 포집실까지의 관로 내벽표면과 증기는 도차에 기인한 열영동(thermophoresis)에 의해 내벽표면

**Table 4.** Separation results of the mixture of solvent and pigments using the vacuum drying system

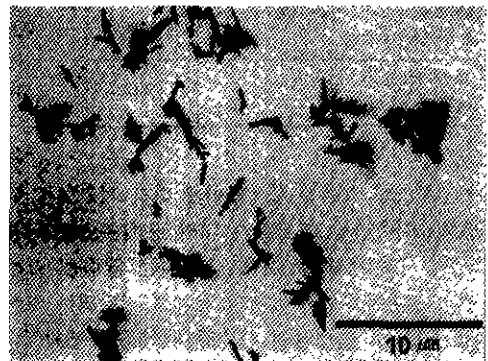
Test Material		Feeding Content (wt%)	Separated Content (wt%)	Recovery Efficiency (%)
Mixture of Benzene and Pigments	Pigments	10	9.4	94
	Benzene	90	79	88
Mixture of Alkylbenzene and Pigments	Pigments	20	18.2	91
	Alkyl-benzene	80	68	85

에 건조입자들이 부착되며, 벤젠의 경우 증기온도보다 낮은 관로 내벽표면에 증기가 응결되거나 또는 응축기에서 증기의 불완전 응축때문이다.<sup>14-16)</sup>

안료입자가 20 wt% 함유된 알킬벤젠 혼합액에 대하여 습분양이 1.2 wt%로 측정된 건조입자의 경우 회수율을 분석한 결과는 Table 4에 나타내었으며, 분리 전 알킬벤젠 혼합액 전체의 함량 중에 20 wt% 함유되었던 안료입자의 함량이 분리 후 18.2 wt% 회수되어 회수율이 91%로 분석되었다. 분리 후 순도 99.9 wt%로 측정된 알킬벤젠의 회수율을 분석한 결과, 분리 전 알킬벤젠 혼합액 전체의 함량 중에 80 wt% 함유되었던 알킬벤젠의 함량이 분리 후 68 wt% 회수되어 회수율이 85%로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 진공건조시스템을 사용하여 입자를 함유한 용제의 가열, 팽창 및 증발과정을 통해 건조 입자와 순수 용제로 분리 및 회수하였으며, 각종 유기 화합물을 포함하는 폐용제의 회수를 통한 재활용 기술에 적용가능함을 보여주었다.

### 5.3. 건조입자의 형상분석

Fig. 4는 진공건조시스템을 사용하여 알킬벤젠에 20 wt% 함유된 안료입자를 건조시킨 후 포집된 모습을 광학현미경을 통해 400배율로 확대하여 촬영한 사진으로, 건조 전과 후의 안료입자의 형상을 나타낸다. 건조 후의 안료입자 형상은 건조 전의 응집된 입자들이 분산되거나 입자의 마모 및 분화현상으로 인해 크기가 감소한 모습을 보이고 있으며, 건조 전보다 전체적으로 균일한 형태를 나타내었다. 이는 입자의 분리 전에 반데르 발스 힘(van der Waals force) 및 전기력(columb force)에 의한 정전기적 인력 등에 의해 응집상태로 있는 안료입자들이 관 내에서 높은 열량이 공급되는 증발과정속에서 관 길이에 따라 용제내 기포발생 및 급격한 팽창이 이루어지고, 관 출구부에서 진공압이 인가된 스프레이 챔버 내로 분사될 때 속도가 급속하게 증가하며 고속 분사력에 의한 폭발적 비산에 의해 건조전 입자들



(a)



(b)

**Fig. 4.** Micrographs of pigment particles, (a) raw pigments, (b) dried pigments.

이 분산화 또는 분화되었기 때문이다. 따라서 진공건조시스템을 사용하여 고속 스프레이 건조공정을 통한 미소 입경의 입자 생산기술에 적용가능성을 보여주었다.

### 5.4. 건조입자의 입도분포 분석

Fig. 5는 진공건조시스템을 사용하여 벤젠에 10 wt% 함유된 안료입자를 건조시켜서 건조 전과 후의 입도분포를 분석한 것으로, 안료입자의 건조 전 투영면적 동등직

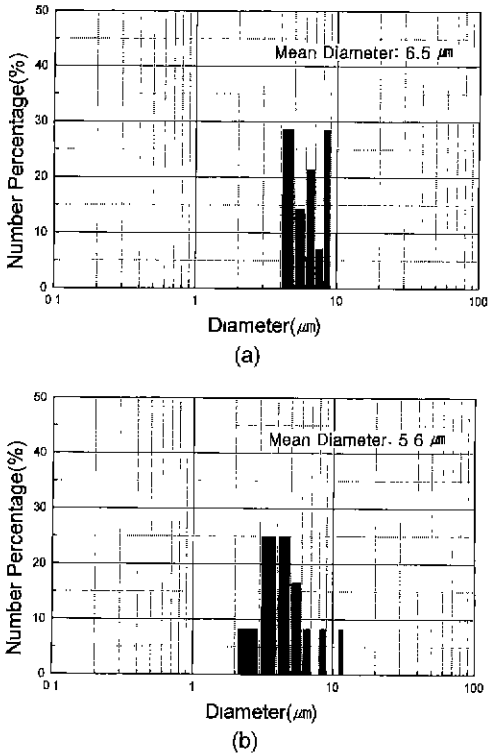


Fig. 5. Size distributions of pigment particles in the mixture of benzene and pigments; (a) raw pigments, (b) dried pigments.

경 분포는 4~9 μm. 평균 직경이 6.5 μm이고, 건조 후 안료입자의 투영면적 동등직경 분포가 2~10 μm, 평균 직경이 5.6 μm로 측정되어 분리 전보다 분리후의 안료입자의 입경이 약 14%의 입경이 감소하였음을 알 수 있다. 이는 관 내 벤젠 혼합액이 연속적으로 진행할수록 휘발 성분인 벤젠 액체의 팽창과 순간적 증발에 의해 증기화 되고, 유속 100 m/s이상의 급격한 속도증가로 인해 관 출구부에서 폭발적인 비산이 이루어지면서 강한 분산력에 의해 증발 전의 안료입자들이 분산 또는 분화되어 입경의 미립화 현상을 나타내기 때문이다.

Fig. 6은 진공건조시스템을 사용하여 알킬벤젠에 20 wt% 함유된 안료입자를 건조시켜 건조 전과 후의 입도 분포를 분석한 것으로, 분리 전 안료입자의 투영면적 동등직경 분포는 2~8 μm, 평균 직경이 3.6 μm이고, 분리 후 안료입자 투영면적 동등직경 분포가 1~8 μm, 평균 직경이 3.2 μm로 측정되어 분리 전보다 분리 후의 안료입자의 입경이 약 11% 감소하였음을 알 수 있다. 따라서 진공건조시스템을 사용하여 관 내 증발과정

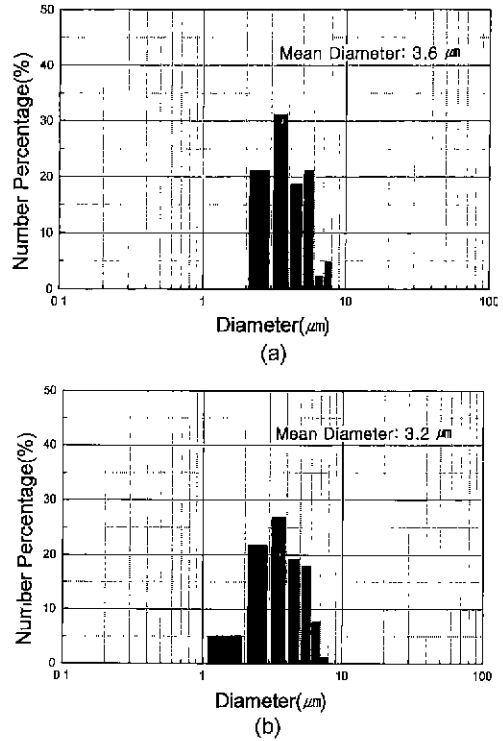


Fig. 6. Size distributions of pigment particles in the mixture of alkylbenzene and pigments; (a) raw pigments, (b) dried pigments.

을 통한 입자 분리기술을 통해 용체에 함유된 입자를 미립화시켜 분리하였으며, 분리 후 고급의 미립자 제품으로 회수 및 재활용이 가능하다.

## 6. 결 론

본 연구는 용체에 함유된 입자의 건조 및 분리용 연속식 순간 진공건조시스템 해석에 관한 것으로, 진공건조시스템을 설계 및 제작하였고 안료입자가 함유된 벤젠과 알킬벤젠의 가열, 팽창 및 증발과정을 통해 건조된 안료입자 및 고순도의 용제로 분리하여 진공건조시스템의 분리 및 회수성능을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이중관형 열교환기내 입자를 함유한 용체 혼합액의 증발과정에 대한 열전달 해석을 통해 입자 건조를 위한 전열길이를 계산하였으며, 안료입자가 10 wt% 함유된 벤젠혼합액의 경우 8.9 m, 안료입자가 20 wt% 함유된 알킬벤젠 혼합액의 경우 29.8 m의 열교환기를 사용하여 입자의 건조 및 분



- 리기술에 적용하였다.
2. 진공건조시스템을 통해 안료입자가 함유된 벤젠 및 알킬벤젠의 분리 및 회수성능 실험을 수행한 결과, 벤젠 혼합액에 대해 습분양 1.1%로 건조된 안료입자 회수율이 94%, 99.9 wt%의 고순도 벤젠 회수율이 88%이며, 알킬벤젠 혼합액에 대해 습분양 1.2%로 건조된 안료입자 회수율이 91%, 99.9 wt%의 고순도 알킬벤젠 회수율이 85%로 분석되었다. 따라서 진공건조 시스템은 유무기 화합물로 구성되는 폐용제의 가열, 팽창 및 증발과정을 통해 건조 입자와 순수 용제로 분리하여 회수하는 기술에 적용 가능하다.
  3. 연속식 순간 진공건조시스템을 사용하여 안료입자를 함유한 벤젠 및 알킬벤젠 증발과정을 통해 건조된 안료입자의 입도분포를 분석한 결과, 벤젠으로부터 건조된 안료입자의 경우 건조 전보다 건조 후 입경감소율이 14%이며 알킬벤젠으로부터 건조된 안료입자의 경우 건조 전보다 건조 후 11%의 입경이 감소하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 진공건조시스템을 사용하여 폐용제에 함유된 입자를 건조시키면 미립화되므로 고급 분체제품으로 회수가 가능하다.

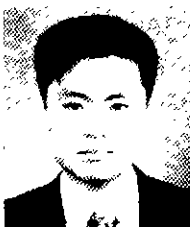
**감사의 글**

본 논문은 1998년도 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)(과제번호: 97-10-24-99-B-1)와 장우기계(주)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

1. 환경부 : "1997년 환경백서". 환경부 (1997)
2. 조영수 : "외국의 폐유 재활용 사례". 월간 폐기물 10월호, 중앙환경신문사, pp. 114-118 (1994)

3. 前川 義裕 "순간진공건조장치 Cracks System", 월간 화학장치, 화학공업조사회 통권 41, 7월호, pp.100-104 (1996).
4. 植田 辰洋 "환상 기액 2상류에 대한 액적 발생률과 액적 경에 대해서", 일본기계학회 논문집, 제45권, 제389호, pp 127-135 (1979)
5. Collier, J. G. and J. R. Thome : "Convective Boiling and Condensaton", Oxford University Press (1994).
6. Burmeister, L. C "Convective Heat Transfer", John Wiley & Sons. Inc (1993).
7. Tong, L. S. and Y S. Tang "Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow", Taylor and Francis (1997).
8. 구재현, 박인철, 박경덕, 이재근 : "용제회수·건조 및 폐유 정제용 연속식 진공건조장치 개발". 월간 폐기물, 12월호, pp.126-130 (1997)
9. 박경덕, 이재근, 구재현, 박인철 "용제회수·건조 및 폐유 정제용 연속식 순간진공건조 시스템 개발에 관한 연구", 한국자원리사이클링학회 1997년도 추계학술대회, 서울 한국과학기술회관, pp.35-36 (1997).
10. 박경덕 : "열교환기 튜브내에서 액적 미립화 특성 연구". 부산대학교 공학석사 학위논문 (1998)
11. 박인철 "액상에 함유된 입자의 건조 및 분리를 위한 이중관형 열교환기의 특성에 대한 연구", 부산대학교 공학석사 학위논문 (1999).
12. 조현호, 구재현, 한옥천, 정중호, 이종호, 이정언, 이재근 "폐솔벤트 회수용 이중관형 열교환기의 성능평가", 한국자원리사이클링학회 1999년도 춘계학술대회, 5. 28.-5. 29., 부산 부경대학교 제7공학관, pp.116-117 (1999).
13. Perry, R. H and D. W Green "Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition", McGraw-Hill (1997).
14. Hinds, W. C : "Acrosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles", John Wiley & Sons (1982).
15. Mills, A. F : "Basic Heat and Mass Transfer", Richard D. Irwin, Inc. (1995).
16. Masters, K. : "Spray Drying Handbook", Longman Scientific & Technical (1985).
17. 구재현, 이재근 : "폐용제 회수용 이중관형 열교환기 특성 해석", 한국자원리사이클링학회지, Vol. 9, No. 3, pp.13-21 (2000).



**具宰賢**

- 부산대학교 정밀기계공학과 박사과정
- 환경유체공학



**李在瑾**

- 부산대학교 기계공학부 부교수, 공학박사
- 환경유체공학