

분무건조장치에서의 히트파이프식 열교환기의 폐열회수

박기호, 이기우, 박준택, 이계중, 임상근*
한국에너지기술연구소, 삼영화학기계주식회사*

Waste Heat Recovery by Heat Pipe Heat Exchanger
in Spray Dryer

Ki-Ho Park, Ki-Woo Lee, Jun-Taek Park, Kye-Jung Lee, Sang-Keun Lim*
Korea Institute of Energy Research, Sam Young Chemical machinery Co. Ltd*

1. 서론

분무건조장치는 Solution, Slurry, Emulsion, Colloidal Suspension 등의 액상원료를 미립화하여 표면적을 증가시켜 수열면적을 크게 하여 열풍과 직접 접촉함으로써 순간적으로 건조를 행하여 액상원료로부터 바로 분립상의 제품을 얻는 건조법이다. 분유를 비롯하여 Instant 식품류, 합성세제, 염료, 안료, Ceramic, 공해 폐액의 처리에 이르기까지 폭넓게 이용되고 있다. 분무건조기는 통기, 회전, 기류 건조기 등 다른 건조기에 비하여 고도의 설계 및 제작 기술을 요하며, 설계에 있어서 일부 이론적인 취급이 행해지고 있는 것은 사실이나 아직은 경험에 의존하고 있는 현실이다. 국내에서 제작되고 있는 분무건조기의 열효율은 25-33%로 선진국의 35-48%에 비해 매우 낮다. 국내에서 사용되고 있는 분무건조기의 92%는 덴마크, 일본 등에서 수입된 것이다.

앞으로 세라믹, 염료, 안료, 제약, 고분자 제품 등 고부가가치 산업의 수요증가에 따라 분무건조기의 수요도 급증할 것으로 예상되며, 국산 건조기의 보급촉진을 도모하기 위하여 고효율화를 위한 설계 및 제작기술의 확보가 시급히 요청되고 있는 실정이다. 분무건조기의 고효율화를 위한 핵심 요소기술로는 원액의 분무 기술, 건조실 설계기술, 분말포집기술, 폐열회수기술 등이며, 이 중에서 특히 원액 분무 기술과 건조실 설계기술이 취약하며 외국으로부터의 기술도입도 어렵다.

원액의 미립화는 노즐과 회전 원판을 이용한 방식으로 나눌 수 있으나, 점도가 높은 액체의 건조에는 노즐 방식보다 회전원판식을 많이 사용하고 있다. 건조실 설계기술로는 먼저 건조기의 형식을 결정하여야 하는데 분무건조기를 열풍과 원액의 접촉 방식에 따라 분류하여 병류형과 향류형, 혼합류형으로 나눌 수 있다. 분무건조기의 설계 인자로는 건조된 제품의 회망 입도 및 겉보기 밀도, 재료의 특성을 고려하여 분무건조기의 형식 및 열풍의 흐름 방향을 결정한다.

또 열풍 입구 온도가 피건조물의 재료의 허용 온도를 고려하여 결정해야 하고 배기온도는 공급 열풍의 단열포화온도보다 20~30℃ 높게 취하는 것이 보통이다. 다른 설계 인자로는 재료 온도와 건조 소요 풍량을 들 수 있다. 건조에 필요한 풍량은 피건조물의 물질수지 및 열수지식으로 구한다. 본 연구에서는 히트파이프를 이용한 열교환기를 분무건조기에 적용하여 열교환기에서 유체의 흐름에 따른 폐열회수율과 그 경제성을 비교분석하였다.

2. 히트파이프 열교환기

2.1 히트파이프 열교환기의 장점

히트파이프식 폐열회수장치는 여러 개의 히트파이프를 삼각배열 혹은 사각배열 등으로 조합하여 만든 열교환기로서 일반적으로 중저온 배열뿐만 아니라 고온의 폐열을 회수할 목적으로 사용되고 있으며 구조는 환을 부착한 여러 개의 히트파이프를 조합하여 판다발을 형성시키고 판다발의 중간을 분리판으로 막아 고온부와 저온부를 분리시킴으로서 한쪽으로는 고온기체, 다른 한쪽으로는 저온 기체를 흐르게 하여 양유체에 열교환이 이루어지게 한 것이다. 양유체의 흐름 방향은 병행류식과 대향류식의 2가지 방식이 있으나 열교환기의 성능을 고려하여 특별한 경우를 제외하고는 대향류식을 선택하는 것이 열효율측면에서는 유리하다. 그 응용범위는 가정용, 원자로, 태양열 발전까지 매우 광범위하게 사용되며 고효율의 회수를 위하여 복잡한 다른 열교환기에 비해 성능 및 초기 투자비, 운전비 등에서 특히 우수한 장점을 갖고 있다. 본 회전원반식 분무건조기에 폐열회수장치로 적용된 히트파이프식 폐열회수장치는 타 열교환기에 비해 여러 장점을 가지고 있다. 장점들은 높은 효율의 열교환 능력을 가지며 폐열회수기의 유지비가 필요없으며 반영구적인 내구성과 타 열교환기에 비해서 콤팩트하며 세정이 용이하고 급기와 배기 공기가 상호 교차하므로 공급공기의 오염이 없다.

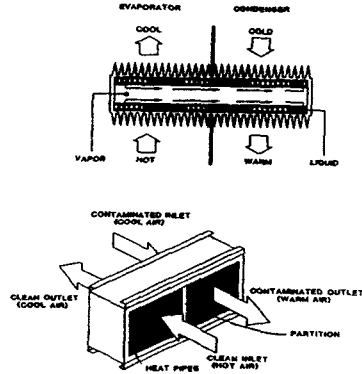


Fig. 1 Basic concept of heat pipe heat exchanger

또 급기계통의 고장시 증발부 측의 과열로 인한 히트파이프의 파손을 방지할 수 있는 대책이 필요하다.

Fig 1은 히트파이프식 열교환기의 기본구조를 나타내었다.

공조용 또는 폐가스 열회수용 열교환기는 공기측의 열전달계수가 작기 때문에 외부에 환을 부착하여 전열면적을 크게 하여야 하는데 히트파이프를 이용하면 고온측 및 저온측 양측에 환부착이 용이하여 총열저항이 작아져 열교환기를 소형화할 수 있는 이점이 있다.

2.2 히트파이프 열교환기의 응용분야

히트파이프식 배열회수장치는 보통 보일러, 공업로 등의 열발생설비나 건조기와 같은 열사용설비 등에서 배출되는 배가스의 배열을 회수하여 연소용공기를 예열하는 기체-기체 열교환기로서 사용되며, 또한 보일러의 급수를 예열하거나 증기를 생산하는 기체-액체 열교환기로도 사용되어진다. 히트파이프식 배열회수장치는 일반적으로 배가스로부터 배열을 회수하는 곳은 어디에나 사용할 수 있다. 배가스로부터 배열을 회수하기 위해 축열식 열교환기, 다관식 열교환기, 플레이트식 열교환기 등과 같은 여러 가지 장치가 사용되어지고 있지만 저온의 배가스는 배열을 회수하는데 그다지 경제성이 없기 때문에 열회수를 하지 않고 있는 실정이다. 그러나 새로운 형식의 열교환기로서 등장한 히트파이프식 배열회수장치는 종래의 열교환기가 가진 결점을 보완해주는 특징을 가졌을 뿐만 아니라 기존 설비라인에도 쉽게 설치할 수 있기 때문에 현재 에너지 절약기기로 많이 채용되고 있다.

2.3 히트파이프 열교환기 선정

히트파이프식 폐열회수장치의 고유 특성을 잘 살리고 적정 용량의 열교환기를 선정하기 위해서는 우선 열회수 대상인 폐열의 특성을 충분히 조사하고 분석한 뒤 여기에 맞는 작동유체 및 용기를 선정하고 열교환기의 설계를 하여 적정용량의 열교환기를 선정하여야 한다.

또 열교환기의 설치로 인해 전체 공정상에 미치는 영향 및 열교환기 운전시 발생할 수 있는 문제점 및 대책을 충분히 검토한 후 열교환기를 설계하여야 한다.

히트파이프 열교환기의 선정시 고려할 사항으로는 배열특성, 성분별 선정기준, 작동유체 및 용기의 선정 그리고 설계에 필요한 제반사항으로는 폐열량 산출, 열교환기의 선정 및 성능평가 그리고 경제성 평가를 들 수 있다.

3. 실험장치

3.1 히트파이프식 폐열회수 실험장치

에너지자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라는 에너지의 효율적 이용이 곧 원가절감인 동시에 원유 수입 감소를 의미하기 때문에 에너지 절약 기술 개발 및 보급이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 중.저온 배열회수에 히트파이프식 열교환기를 사용할 경우, 효율적인 배열회수가 가능한 동시에 여러 가지 장점이 있기 때문에 우리나라에서도 저온.제습공정이나 각종 산업 배열에 적용되고 있다. 그러나 히트파이프식 배열회수장치는 가격이 다소 비싸기 때문에 확대보급이 잘 되고 있지는 않지만 제품개발 및 가격인하가 실시될 경우 그 적용이 확대되어 질 것이 예상되며 건조기분야에서 높은 배열을 그대로 배출하고 있기 때문에 확대적용할 경우 그 효과가 상당히 클 것으로 기대된다.

Fig. 2에 분무건조기에서의 히트파이프 폐열회수 시스템의 개요를 나타내었다. 실험에 사용된 pilot spray dryer는 제품의 희망입도, 겔보기밀도,

재료의 특성, 미립화 방식 등을 고려하여 병류형으로 하였으며, 액체의 공급유량, disk의 회전수, 열풍온도 등을 고려하여 탑경 및 건조기 용적 등을 결정하여 설계제작하였다.

피건조물 액체는 feed pump, filter를 통하여 atomizer 상부로 공급되고, 열풍은 air heater에서 배풍온도 90℃를 유지하도록 180℃~200℃ 정도로 가열되어 atomizer의 원주로 swirl류로 공급된다. 이때 열풍의 공급 fan의 토출량은 5m³/min이며, 배풍 fan의 토출량은 7m³/min으로서 항상 챔버내의 부압(약-5mmAq)과 사이클론의 차압(약-80mmAq)을 유지하도록 하였다. 또한 배풍은 heat pipe 열교환기를 통과시켜 에너지 손실을 최소화하면서 폐열을 회수하여 공급 공기의 예열에 사용하였다. 이 실험에 사용된 디스크는 일반적으로 많이 사용되고 있는 cup-type 변형 Kestner형을 사용하여 건조된 후의 배가스를 사용하였다.

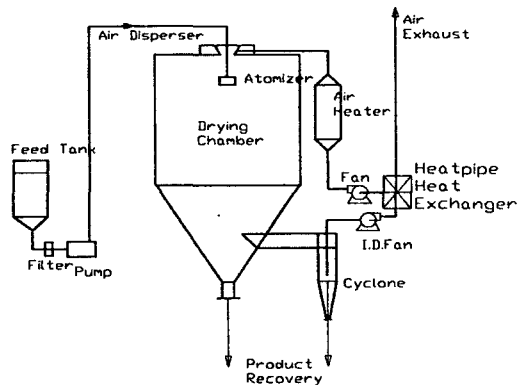


Fig. 2 Schematic diagram of waste heat recovery in Spray Dryer

3.2 폐열회수용 히트파이프 열교환기의 구조

Fig. 3은 본 실험에 사용된 히트파이프식 폐열회수장치의 전개도이고 작동유체로는 에탄올을 사용하여 전체적의 40%를 증액하였고 Fig. 3에서 보는 바와 같이 콤팩트하고 높은 열효율을 가지며 배열회수기의 유지비가 필요없으며 반영구적인 내구성을 가지고 급기와 배기공기가 섞이지 않아 급기가 양호한 상태로 공급이 될 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 폐열회수장치의 사양으로는 직경12.7mm의 동pipe 28개를 사용하였고 Fin은 63 메를 부착하

였으며 외곽은 스테인리스로 마감하여 미려한 외관을 가지게 하였다.

폐열회수장치 성능에 영향을 주는 인자로는 작동유체, 히트파이프의 설치 경사각도, 작동유체의 주입량, 배가스 온도 및 배가스와 공기의 유속, 공기유입의 방향 등으로 볼 수 있다. 따라서 폐열회수장치의 히트파이프 열교환기의 설치 경사각을 5°, 작동유체의 주입량은 40%로 일정하게 하고 공급공기의 온도는 180℃로 일정하게 하였다.

3.3 실험 방법

히트파이프식 열교환기의 증발부 입구온도를 98℃, 전면속도를 3.2m/s, 응축부 입구온도를 -10℃에서 35℃로 변화시키고 전면속도를 2.2m/s로 하여 열회수율의 변화와 회수열량을 이론적으로 알아보고 성능에 영향을 미치는 변수인 응축부 입구 온도와 증발부 입구온도를 변화시켜 가면서 실제 회수열량을 측정하였다.

응축부의 온도는 대기 온도인 약 20℃로 하였고, 본 폐열회수장치의 성능실험의 또 하나의 변수로는 공기 유입의 방향을 향류형과 병류형으로 하여 히트파이프식 열교환기의 증발부 및 응축부 입출구 온도를 측정하여 폐열회수율 및 열량과 경제성을 설계치와 비교 분석하였다.

4 실험결과 및 고찰

4.1 히트파이프 열교환기의 설계 분석

히트파이프 열교환기의 증발부측 입구 온도를 98℃, 출구온도를 66.7℃, 응축부측 입구온도를 25℃, 출구온도를 56.3℃로 계산되어 지므로 히트파이프 열교환기의 열효율은

$$\eta = \frac{(T_{ao} - T_{ai})}{(T_{gi} - T_{ai})}$$

$$= .4287$$

42.87%이다.

Fig. 4에서는 응축부 입구온도에 따른 열회수율의 변화를 나타내었는데 응축부 입구 온도의 변화에 따라서는 열회수율의 변화는 크지 않고 응축부 입구온도가 -10℃에서 열회수율이 약 41%정도로 응축부의 입구온도가 높아짐에 따라 열회수율이 약간씩 높아지고, 응축부 입구온도가 10℃일 때에 열회수율이 약 43%로 높아졌다가 10℃이상에서부터 약간씩 낮아지는 것을 알 수 있었다. 열회수율의 변화는 41%~43%정도임을 알 수 있었다.

Fig. 5에서는 응축부 입구온도에 따른 히트파이프식 열교환기의 열교환량의 변화를 나타내

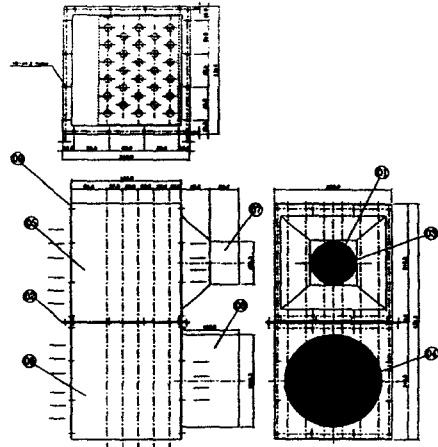


Fig. 3 Heat pipe Heat exchanger

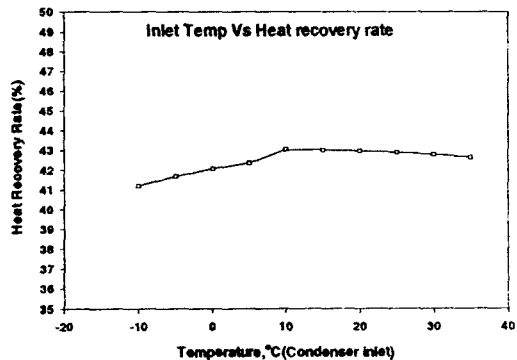


Fig. 4 Variation of heat recovery rate according to inlet air temperature of condenser

있는데 응축부 입구 온도에 따라서 열교환량의 변화는 2300 kcal/hr ~ 3800 kcal/hr 정도로 입구 온도가 높을수록 열교환량이 적어짐을 알 수 있었다. 계절에 따라서 입구온도가 변화하므로 10월중의 열교환량은 입구온도가 약 20℃ 정도이므로 2900 kcal/h 임을 알 수 있다. 회전원반식 분무건조기의 건조소요열량은

$$\begin{aligned}
 Q_d &= \Delta w * h_{fg} + m * C_p * \Delta T \\
 &= 8.458 * 565 + 1.5 * 0.35(70 - 45) \\
 &= 5011 \text{ kcal/h}
 \end{aligned}$$

이고, 소요풍량 및 열량은 방열손실을 25%로 하면 증발부 입구온도가 98℃, 소요열량, Q_t ,는 6263 kcal/hr이다. 공급 공기의 유량을 5 m³/min으로 하면 히트파이프 열교환기에서의 열전달량은 2705 kcal/hr이다. 히트파이프식 열교환기의 설치로 인하여 25℃의 외기를 56.3℃로 예열하여 공급공기로 사용함으로써 시간당 약 3.14kW의 전기를 절약할 수 있다. 총전력소비량은 약 14 kW이므로 히트파이프식 열교환기에서 절감할 수 있는 열량은 전력으로 환산하면 3.14 kW이므로 절감량은 전체 소비전력의 22.4%의 전력을 절감할 수 있다. 겨울철에 외기온도가 현재보다 더 낮게 될 경우에는 응축기 입구온도가 더 낮아지기 때문에 Fig. 4에서 알 수 있듯이 히트파이프식 열교환기에서의 열교환량이 약 3500 kcal/hr로 높아져 전력으로 환산하면 약 4 kW 절감효과를 얻을 수 있어서 열교환기 설치로 인한 에너지 절감량이 약 28.5%로 높아진다. 여기에서 유체의 흐름은 향류형으로 계산하였다.

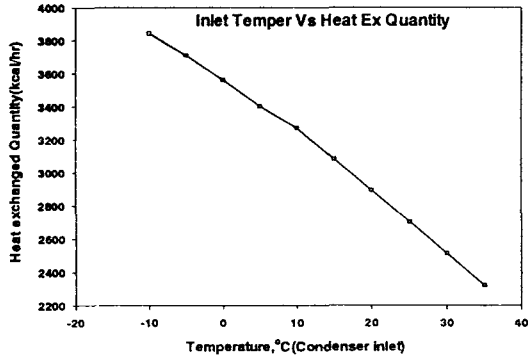


Fig. 5 Variation of heat exchanged quantity according to inlet air temperature of condenser

4.2 히트파이프 열교환기의 적용 실험

(1) 병류형

Fig.6에서는 유체의 흐름을 병류로 하였을 때 히트파이프 열교환기의 증발부 및 응축부 입출구의 온도 변화를 나타내었다. 히트파이프 열교환기의 증발부측 입구온도를 87℃, 출구온도를 63.2℃, 응축부측 입구온도를 18.3℃, 출구온도를 42.1℃로 측정되어 히트파이프 열교환기의 열효율은 34.6%이다. 또 히트파이프 열교환기의 증발부측 입구온도를 72.9℃, 출구온도를 53.0℃, 응축부측 입구온도를 16.8℃, 출구온도를 36.7℃로 측정되어 히트파이프 열교환기의 열효율은 35.4%이다. 공급 공기의 유량을 계산하면 5 m³/min이 되고 히트파이프 열교환기에서의 열전달량은 1631.9 kcal/hr

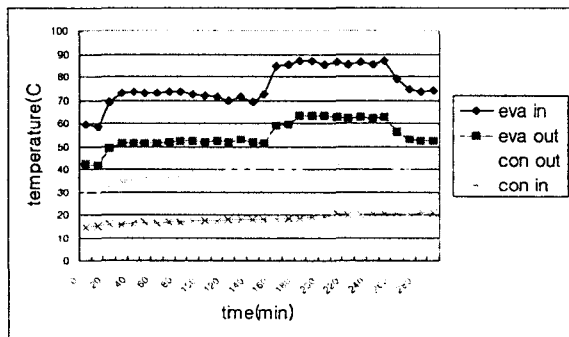


Fig. 6 Variation of temperature in heat exchanger

이다. 히트파이프식 열교환기의 설치로 인하여 16.8 °C의 외기를 36.7 °C로 예열하여 공급공기로 사용함으로써 시간당 약 1.9 kW의 전기를 절약할 수 있다. 계산한 결과와는 많은 차이가 있는데 이것은 히트파이프 열교환기의 증발부 입구온도 차이에 따른 전열량의 차로 볼 수 있고 또 유체의 흐름을 병류와 향류로 한데 따른 차이인 것 같다. 유체의 흐름을 병류로 하였을 경우 향류로 하였을 때보다는 약 10%정도 적게 나타났다.

2) 향류형

히트파이프 열교환기의 증발부측 입구온도를 79.7°C, 출구온도를 57.6 °C, 응축부측 입구온도를 23.9°C, 출구온도를 46°C로 측정되어 히트파이프 열교환기의 열효율은 39.6%이다.

또 히트파이프 열교환기의 증발부측 입구온도를 85.3 °C, 출구온도를 60.4 °C, 응축부측 입구온도를 23.5 °C, 출구온도를 48.4 °C로 측정되어 히트파이프 열교환기의 열효율은 40.4 %이다. 공급 공기의 유량을 계산하면 5 m³/min 이 되고 히트파이프 열교환기에서의 열전달량은 1800 kcal/hr이다. 계산한 결과와는 많은 차이가 있는데 이것은 히트파이프 열교환기의 증발부 입구온도 차이에 따른 열교환량의 차로 볼 수 있고 히트파이프식 열교환기의 설치로 인하여 23 °C의 외기를 48 °C로 예열하여 공급공기로 사용함으로써 시간당 약 2.1kW의 전기를 절약할 수 있다.

5. 결 론

히트파이프식 열교환기를 분무건조기 파일럿 플랜트에 설치하고 유체의 흐름을 병류형과 향류형으로 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 히트파이프식 열교환기의 회수효율은 이론값이 약 42%, 실제 실험값이 약 40%로 매우 우수하게 나타났다.
- 2) 히트파이프식 열교환기의 유체의 흐름을 병류로 하였을 경우의 열회수 효율은 약 35%, 열교환량은 약 1630 kcal/hr로 나타났고 히트파이프 열교환기의 유체의 흐름을 향류로 하였을 경우 병류로 하였을 때보다는 약 10%정도 열전달량이 많게 나타났다.
- 3) 건조기의 성능실험을 대기의 온도가 낮은 겨울에는 실시하지 못한 관계로 열교환기의 응축부 입구의 온도가 낮을 때의 열전달량은 측정할 수 없었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지절약연구사업으로 수행되었으며 실험을 수행할 수 있게 도와주신 (주)삼영화학기계 관계자 여러분께도 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 박준택, 박기호, 오재건, 서영위, “분무건조를 위한 회전원판의 미립화 특성”, 제14회 에너지절약Workshop 논문집, pp393-402, 1999.
2. 에너지관리공단, “히트파이프이용 배열회수장치 효과분석”, 1986.
3. 이기우 외, “히트파이프를 이용한 고효율 응축 열교환 시스템 개발“, 한국에너지기술연구소 보고서, 2000.