

발효건조장치의 제습시스템 적용연구

전원표, 이기우, 박기호, 이계중
한국에너지기술연구원

Application study of dehumidification system in fermentation dryer

W. P. Chun, K. W. Lee, K. H. Park, K. G. Lee
Korca Institute of Energy Research

1. 서론

유기성 폐기물은 음식물쓰레기, 농·수·축산폐기물, 식품가공산업 폐기물 등에서 주로 발생되고 있다. 이러한 유기성 폐기물은 함수율이 70~85%W.B. 정도로 높고 부패성이 크기 때문에 악취 및 침출수 등의 여러 가지 환경유발 가능성이 높은 것으로 평가되고 있다. 최근에는 이러한 젖은 폐기물의 매립장 반입이 규제되고 있으며, 함수율이 높아 직접 소각도 어려운 실정이므로 유기성 폐기물의 안정화, 감량화 및 재자원화를 위한 처리기술개발이 시급한 실정이다. 유기성 폐기물은 적절한 처리기술에 의해 건조시키면 부산물의 재활용(사료 또는 퇴비)이 가능하며 소각을 위해서도 직접 소각시키는 것 보다 건조후, 소각시키는 것이 유리하다고 보고되고 있다. 특히 유기성 폐기물의 건조는 함수율이 높기 때문에 열매체를 이용하는 간접가열방식을 주로 채택하고 있으며, 에너지소비가 클 뿐만 아니라 건조과정에서의 악취로 인해 밀폐상태에서 건조시키는 것이 필요하다.

일반적으로 유기성 폐기물의 제습건조(dehumidification drying) 과정은 하부에서 열을 가하여 폐기물내의 수분을 증발시키고 상부에서 건공기의 열풍을 순환시켜 증발된 수분을 건공기의 열풍이 흡수하여 고온 습공기의 상태로 열교환기에 유입되어 외부의 공기에 의해 고온의 습공기가 응축되면서 건조가 진행되는 폐사이클(closed cycle)로 구성되어있다. 기존의 열교환기는 관내에 고온의 습공기가 유동하고 외부에는 공기가 유동하면서 내부의 고온 습공기가 응축되어 제습되는 환관형 열교환기를 사용하고 있다. 그러나 유기성 폐기물의 건조 과정에서 발생하는 VOC가스가 관내에 유동하면서 전열관을 부식시켜 수명을 단축시키고, 관내외에 열전달계수가 낮은 공기가 유동하므로 열교환기가 커지는 단점이 있다.

본 연구에서는 발효건조장치에 루프 써모싸이폰 열교환기술을 이용하여 유기성 폐기물의 건조과정에서 발생하는 고온의 습기를 효과적으로 제거하고 부식문제를 해결하고자 하였다. 따라서 간접가열 방식인 발효건조기내의 열풍 이용효과에 대한 기초실험을 수행하였으며, 기존의 환관형 열교환기와 루프 써모싸이폰 열교환기를 적용한 제습건조 특성에 대하여 비교실험을 수행하였다.

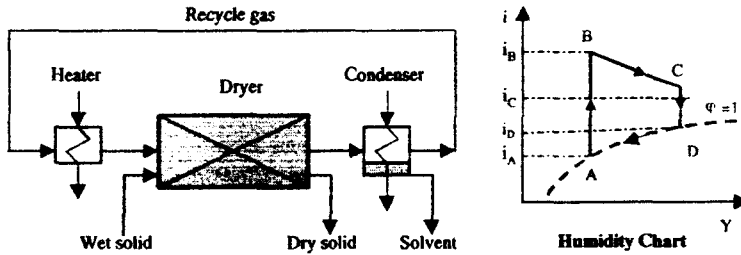
2. 제습건조 원리 및 특징

2.1 제습건조 원리

폐사이클을 이용한 제습건조는 건조과정에서 배출되는 고온의 습공기를 폐열회수장치에 의해

습기를 제거한 후, 건조기내로 순환시켜 재이용하는 시스템이다. [그림 1]은 응축열교환기를 이용한 폐사이클 제습건조시스템을 나타낸 것으로써 A점의 온도는 건조온도 B점까지 가열된다. 그리고 피건조물과 접촉하면서 건조가 진행되어 C점까지 냉각된다. 이 냉각된 배기가스는 열교환기에 의해 노점온도 D점까지 냉각되며, 포화선상의 A점까지 온도가 떨어지면서 배기가스의 습기를 제거한 후, 재가열하는 사이클을 형성한다.

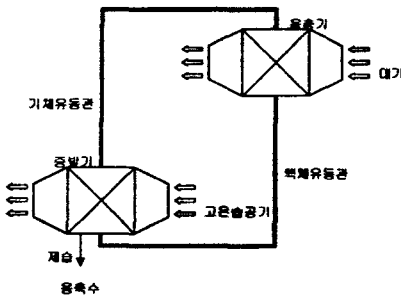
이러한 제습건조 시스템에 사용되는 열교환기는 환관형 열교환기, 판형 열교환기, 회전형 열교환기, 히트파이프 열교환기 등이 사용되고 있다. 열교환기의 선정에 있어서 주로 배기측의 가스온도와 성상(더스트 농도, 부식성 가스의 유무 및 습도 등)에 따라 적절한 열교환기의 형식, 구조 및 재질의 선정과 설치방법 등에 대한 종합적인 검토가 필요하다.



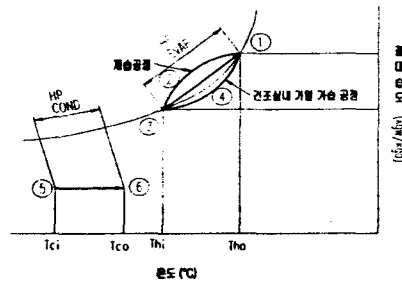
[그림 1] 응축열교환기를 이용한 폐사이클 제습건조시스템

2.2 루프 써모사이폰 제습시스템의 특징

[그림 2]는 루프 써모사이폰 열교환시스템의 구성도를 나타낸 것이며, [그림 3]은 고온의 습공기와 냉각용 공기의 온도 및 습도의 변화를 습공기선도에 나타낸 것이다. [그림 3]의 습공기선도에서 1-2-3과정은 루프 써모사이폰에 의한 제습과정이며, 3-4-5과정은 제습된 후에 재순환하여 건조기내로 유입되는 습공기의 온도 및 절대습도의 변화이다. 습공기선도에서 1-2-3의 제습과정은 루프 써모사이폰의 증발기에 유입되는 고온의 열풍이 응축부의 낮은 온도의 대기에 의해 작동유체의 증기가 응축되어 온도가 떨어진 상태에서 증발부에 유입되어 고온 습공기와 접촉하여 습공기의 온도를 낮추어 제습이 이루어진다. 3-4-5과정의 제습된 후의 저온 저습도의 공기는 건조기내에서 발생된 고온의 증기와 접촉하면서 온도와 습도가 증가하여 사이클을 구성하는 것이다.



[그림 2] 루프 써모사이폰 열교환 시스템의 구성도



[그림 3] 고온 습공기의 제습시스템의 습공기선도

루프 써모사이폰 열교환시스템은 내부의 밀폐된 공간에서 순환하는 작동유체가 연속적으로 액체-증기간의 상변화를 수행할 때, 동반하는 잠열을 이용하여 열을 이동시킴으로서 단일상의

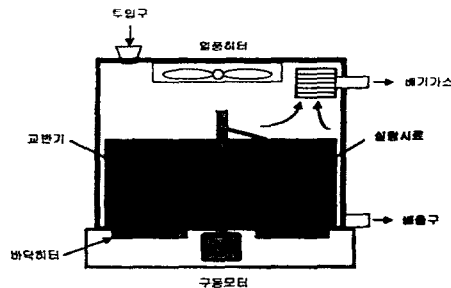
작동유체를 이용하는 일반적인 열교환기에 비해 큰 열전달 성능을 갖고 있다. 이것은 기존 열교환기에 비해 크기가 1/2정도 작아지는 효과가 있으며, 열회수율도 60~80%정도로 높은 장점이 있다. 특히 건조공정에 세습을 위해 루프 써모사이폰을 적용하는 경우에는 열전달 효과가 작은 고온의 습공기와 대기의 공기가 접촉하는 전열면이 모두 외부의 환부착으로 전열면적의 확대가 용이하여 써모사이폰 열교환기의 소형화 또는 고성능화가 가능한 장점을 갖고 있다. 또한 유기성 폐기물의 건조과정에서 발생하는 배기가스의 폐쇄이를 제습이 가능하므로 대기오염을 감소시키는 효과도 있다.

3. 발효건조기의 기초실험

3.1 실험장치 및 실험방법

발효건조기의 기초실험을 위해 [그림 4]의 기초실험장치를 이용하였다. 실험장치의 구조는 하부에 가열용 히터(40W)를 설치하여 40~50℃ 정도의 열을 가하여 발효실내의 온도를 적정하게 유지시킨다. 발효실 중앙에는 나선형 교반기가 설치되어 있으며, 회전수는 6rpm으로 조절하였다. 상부에는 열풍발생용 히터(250W)를 설치하여 약 80℃ 정도의 열풍이 공급된다. 발효실내부의 온도분포를 측정하기 위해 k형 열전대를 3곳에 설치하였다.

실험은 주정박 슬러지를 대상으로 초기함수율 40~50%W.B.까지 수분을 조절하여 시료중량 5kg에 미생물 발효제(K-M발효제) 70cc를 첨가하여 실험하였으며, 상부의 열풍히터를 가동하는 경우와 가동하지 않는 경우로 나누어 각각 24시간동안 4시간간격으로 함수율의 변화 및 발효실내의 온도분포를 측정하였다.



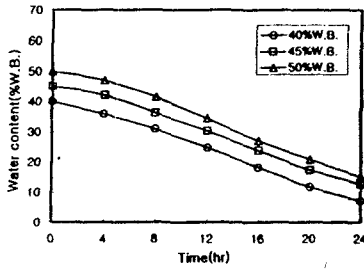
[그림 4] 건조발효 기초실험장치의 개요도

3.2 실험결과 및 고찰

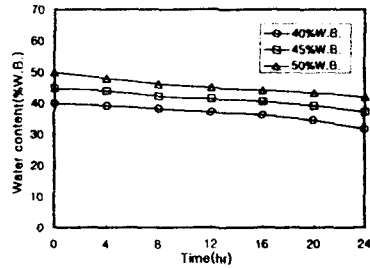
[그림 4]의 실험장치에서 주정박 시료의 함수율을 40%W.B., 45%W.B., 50%W.B.로 수분을 조절하여 각각 실험하였다. 상부의 열풍히터를 가동하는 경우 열풍의 평균온도는 약 80℃로 나타났으며, 발효조 내부의 온도는 60~63℃, 피건조물의 온도는 48~52℃로 유지되었다. 또한 열풍히터를 가동시키지 않는 경우에는 발효조 내부온도는 39~43℃, 피건조물의 온도는 39~42℃로 나타났다. [그림 5]는 상부의 열풍히터를 가동한 경우이고, [그림 6]은 상부의 열풍히터를 가동시키지 않은 경우의 실험 결과이다. [그림 5]에서 초기함수율 40%W.B., 45%W.B., 50%W.B.에 대한 24시간후의 최종함수율은 각각 7.2%W.B., 12.6%W.B., 15.1%W.B.로 나타났으며, [그림 6]에서 최종함수율은 31.7%W.B., 37.1%W.B., 41.9%W.B.로 나타났다. 실험결과에서 보면, 열풍을 가하지 않은 발효과정에서는 24시간동안에 수분감소율이 16~20%로 낮게 나타나고 있으나 열풍을 이용하는 경우 수분감소율이 70~80%로 크게 증가되는 것으로 나타났다.

따라서 본 실험을 통하여 하부에서 열을 가하여 발효건조실 내부온도를 적정한 온도로 유지시키고 상부에 열풍을 이송시키는 경우에는 열풍을 이송시키지 않은 경우에 비해 수분감소율이 50~64%까지 증가되는 것으로 나타났으며, 발효건조장치에서 배출되는 고온 습공기

를 제습하여 건공기를 재순환함으로써 건조속도를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.



[그림 5] 열풍히터 가동시 주정박 시료의 함수율 변화



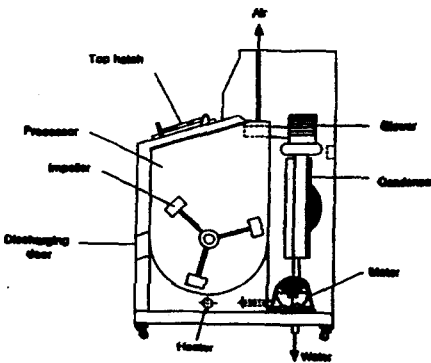
[그림 6] 열풍히터 정지시 주정박 시료의 함수율 변화

4. 제습시스템의 성능실험

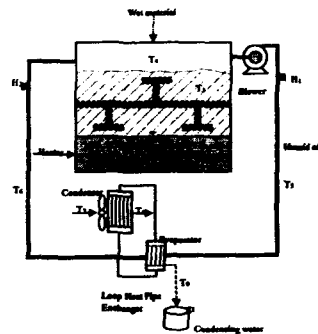
4.1 실험장치 및 실험방법

기존의 증소형 유기성 폐기물 발효건조기의 구조는 [그림 7]과 같이 하부의 자켓내의 열매체(텍사썸-46)를 전기히터로 가열하며 가열면과 피건조물이 접촉하여 증발된 고습도 배기가스는 환관형 열교환기에 의해 수분이 제거된 후, 발효건조실 상부로 재순환되는 폐싸이클을 형성한다. 그러나 기존의 환관형 열교환기에서는 고온 습공기를 파이프내부로 유동시켜야 하므로 전열면적의 확대가 용이하지 않아 열교환기가 커지고, 열풍내의 부식성 가스에 의한 열교환기 수명단축 등의 문제가 있다. 따라서 루프 써모싸이폰 열교환기 기술을 이용하여 유기성 폐기물의 건조공정에서 발생하는 습기를 제거하고 부식문제를 해결하고자 [그림 8]과 같이 실험장치를 구성하였으며, 고온 고습도의 열풍은 루프 써모싸이폰의 증발부로 유입시키고, 외부의 공기는 냉각부로 유동시켜 증발부와 응축부를 완전히 분리하였으며, 이와 같이 함으로서 부식성가스와 접촉하는 증발부만 스텐레스로 가공하고 증발부와 응축부를 파이프로 연결하여 페루프로 구성하였다.

본 실험에서는 [그림 7]의 기존 환관형 열교환기와 [그림 8]의 루프 써모싸이폰 열교환기의 성능을 비교하기 위해 환관형 열교환기와 루프 써모싸이폰 열교환기 성능실험을 병행하여 수행하였다. 실험시료는 초기함수율 60%W.B.의 톱밥(30kg)을 사용하였다. [그림 8]의 실험장치에서 열매체유 온도, 가열면의 온도, 피건조물 온도, 발효건조실 상부온도, 열교환기 전후의 배기온도 및 유입 건공기온도 등을 측정하기 위해 k형 열전대를 설치하였으며, 매시간 피건조물의 함수율, 열교환기 입출구의 절대습도 및 응축수량을 측정하였다.



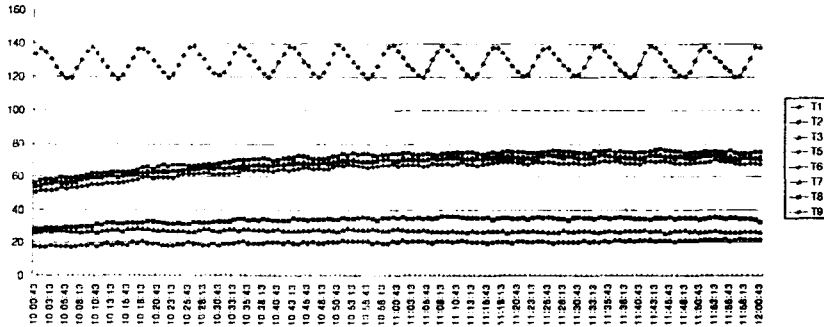
[그림 7] 기존 발효건조기의 환관형 열교환기 적용시스템



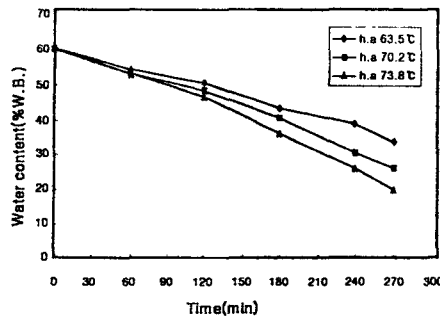
[그림 8] 루프 써모싸이폰 제습시스템을 적용한 실험장치 개요도

4.2 실험결과 및 고찰

[그림 9]은 루프 써모싸이폰 제습시스템을 적용한 각 구성요소의 온도분포를 나타낸 것이다. [그림 9]에서 가열온도는 120~140℃로 일정하게 조절하였으며, 가열면과 피건조물이 접촉하는 평균온도는 71.9℃로 측정되었으며, 발효건조실 상부 평균온도는 67.4℃, 써모싸이폰 증발부 입출구의 평균온도는 각각 61.3℃, 57.4℃로서 전열온도차는 3.9℃로 나타났다. 한편 동일 실험조건에서 루프 써모싸이폰 증발부의 배출온도가 63.5℃, 70.2℃, 73.8℃로 변화되었을 때의 함수율의 변화는 [그림 10]에 나타낸 바와 같이 열풍온도가 증가할수록 함수율이 낮아지는 것으로 나타났으며, 발효건조실로 유입되는 건공기의 온도가 높을수록 건조속도가 증가하는 것을 확인하였다.



[그림 9] 루프 써모싸이폰 제습시스템을 적용한 각 구성요소의 온도변화



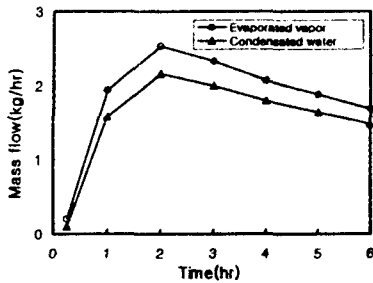
[그림 10] 루프 써모싸이폰 제습시스템의 열풍온도에 따른 함수율 변화

[그림 11]은 기존 환관형 열교환기를 적용한 실험결과로서 초기함수율 60%에서의 건조시간에 따른 수분증발량과 응축열교환기의 응축수량의 변화를 나타낸 것이다. [그림 11]에서 건조가 시작되어 약 1.5~2시간사이에서 증발량의 최대점이 나타났으며 최대 증발량은 2.52kg/hr로 산출되었고, 6시간동안의 환관형 열교환기에 의한 응축수량은 평균 1.72kg/hr로 측정되었다. 여기서 열교환기의 응축효율(η_c)은 응축수량(W_c)에 대한 수분증발량(R_e)의 비로 나타낼 수 있으며, 다음 식을 이용하여 기존 환관형 열교환기의 응축효율은 85%로 계산되었다.

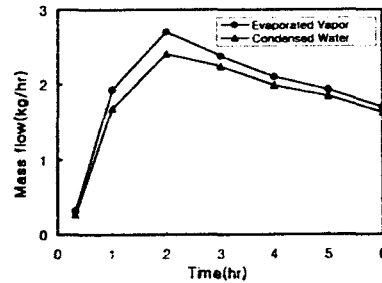
$$\eta_c = \frac{W_c}{R_e} \times 100\% \quad (1)$$

[그림 12]는 동일 운전조건에서 기존 환관형 열교환기를 루프 써모싸이폰 열교환기로 교체하여 실험한 결과이다. [그림 12]에서 단위시간당 측정된 함수율을 기초로 계산한 수분증발량과 측정된 응축수량의 변화는 측정시간을 기준으로 시간당 최대증발량은 2.76kg/hr로

나타났으며, 6시간동안의 응축수량은 평균 1.97kg/hr로 측정되었다. 응축효율은 식 (1)을 이용하여 계산한 결과 93%로 나타났으며, 기존 환관형 열교환기에 비해 응축효율이 약 11% 정도 향상되었다.



[그림 11] 기존 환관형 열교환기에 의한 증발량과 응축수량의 변화



[그림 12] 루프 써모싸이폰 열교환기에 의한 증발량과 응축수량 변화

5. 결론

본 연구에서는 루프 써모싸이폰 재습기술을 기존 발효건조기에 적용함으로써 유기성 폐기물 건조과정에서 발생하는 고온 습공기를 효과적으로 제습하여 응축효율을 향상시키고 부식 문제를 해결하고자 하였으며, 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

폐싸이클로 구성된 유기성 폐기물 발효건조기의 고온 습배기ガ스를 효과적으로 제습하여 발효건조실내로 재순환하는 경우 재순환되는 건공기의 온도가 높을수록 건조속도가 빨라지는 것으로 나타났으며, 기존의 환관형 열교환기에 비해 루프 써모싸이폰 열교환기를 적용하는 경우 응축효율이 약 11%정도 증가되는 결과를 얻었다.

또한 기존의 열교환기는 건조과정에서 발생한 고온 고습도의 배기가스가 관내로 유동하면서 전열관을 부식시켜 수명을 단축시키고 관내외에 열전달계수가 낮은 공기가 유동하므로 열교환기가 커지는 단점이 있다. 그러나 루프 써모싸이폰 열교환기에서는 열풍과 접촉하는 증발부는 스텐레스로 사용하여 부식을 방지하고 부식성이 없는 공기와 접촉하는 응축기만을 동관에 알루미늄 핀을 부착하므로써 부식방지와 열교환기를 소형화할 수 있다. 또한 루프형 써모싸이폰 열교환기는 증발기와 응축기를 멀리 분리시킬 수 있으므로 설치에 편리한 곳에 열교환기를 배치할 수 있는 장점도 있다.

참고문헌

1. 有機廢棄物資源化大事典, 有機質資源化推進會議 編
2. 有機性 廢棄物의 堆肥化 技術, 韓國有機性廢棄物資源化協議會
3. Subrat, B., et al., Fate of Semivolatile Organic Compounds During Heat Drying of Mixed Primary and Waste, Water Environment Research, Vol. 67, No. 1, pp.57-64
4. Arun S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker Inc.
5. R. B. Keey, Introduction to Industrial Drying Operations, Pergmon Press.
6. 이기우 외, 히트파이프를 이용한 고효율 응축열교환 시스템 개발, 연구보고서