

한국에너지공학회(2000년도)

추계 학술발표회 논문집 P215~220

배기가스 순환이용 건조공정의 에너지절약 효과

전원표, 이기우, 박기호, 이제중, 김홍*

한국에너지기술연구소, 호서대학교*

Energy conservation effects in drying process reusing exhaust gas

W. P. Chun, K. W. Lee, K. H. Park, K. G. Lee, H. Kim*

Korea Institute of Energy Research, *Hoseo University,

1. 서론

건조는 열풍, 스팀 및 전자기파 등의 직접 또는 간접적인 에너지를 투입하여 최종 제품, 가공, 후처리 과정에서 수분을 제거하는 필수 단위공정으로서 화학, 섬유, 식품, 제지·목재, 금속부품 및 폐기물 등에 이르기까지 모든 산업의 생산과정에서 널리 사용되고 있다.

건조공정은 국내 총에너지소비량의 1.2%('95년기준 1,413천TOE), 산업부문 에너지소비량의 2.2%를 소비하는 에너지다소비 장치의 하나이다. 실제로 산업분야 건조설비 사용업체의 에너지사용 비중 중에서 건조공정의 에너지사용 비중이 30%를 초과하고 있으나, 대부분의 건조공정의 에너지 이용효율이 50%이하로서 매우 낮은 실정이다.

직접접촉식 건조장치나 공기부양식 건조장치에 사용되는 열풍건조는 가열공기와 피건조물이 접촉하여 수분을 증발시키는 대류전열 방식으로서 전도전열이나 복사전열 등을 이용하는 건조방식에 비해 그 사용범위가 상당히 많다. 그러나 열풍건조는 보유열량의 대부분을 피건조물의 온도상승과 수분증발에 사용한 후, 방열손실을 제외한 열풍의 대부분이 그대로 출구로 배출되며, 다른 건조방식에 비해 고온 습공기의 배기방출량이 많고 배기가스가 갖고 있는 열량도 크므로 에너지손실이 큰 단점을 갖고 있다. 특히 열풍건조공정에서 발생하는 배기가스는 건공기(연소가스포함)와 피건조물에서 발생하는 증기의 체적의 합으로 구성되며 각 성분은 각각 고유의 열용량(heat content)를 갖고 있다. 이러한 건공기와 수증기의 혼합기체인 배기가스의 열용량은 수증기/건공기의 비, 즉 습도의 변화에 따라 변화하게 된다. 따라서 열풍건조공정에 있어서 고온 습공기의 손실열을 효과적으로 회수이용하는 것이 에너지절약의 기본이며, 고온의 습공기를 열원으로 재사용하는 방식 또는 제습 후, 재순환하여 이용할 수 있는 공정의 개발은 건조공정의 에너지절약에 매우 중요하다고 할 수 있다.

외국의 경우 히트파이프, 히트펌프 등을 이용한 제습 및 재가열 건조시스템, 과일증기 건조시스템, 고온 고습도 배가스 순환이용 건조시스템 및 타 건조장치와의 조합시스템을 이용한 다양한 배기가스 회수이용기술이 적용되고 있다. 그러나 국내의 경우 주로 장치의 크기, 가열형태, 운전의 용이성, 장치의 형식 등의 측면에서만 그 중요성이 강조되어 왔을 뿐, 시스템의 고효율화 측면에서의 배기가스 회수이용기술에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 건조공정에서의 배기가스 열량을 효과적으로 회수이용하기 위하여 히트파이프 또는 히트펌프 등을 이용한 제습 건조 및 고온 습공기 직접 순환이용방식에 대한 원리 및 특징을 고찰하였으며, 히트파이프 응축열교환기 이용 제습 건조와 고온 습공기 직접 순환이용기술에 따른 에너지절약 효과를 분석하였다.

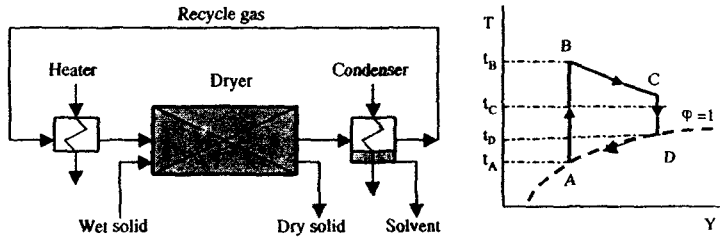
2. 건조공정의 배기가스 순환이용기술

2.1 제습 건조

2.1.1 응축기이용 제습 건조시스템

폐싸이클을 이용한 제습 건조시스템은 건조 배기가스를 제습하여 재이용한다. [그림 1]에 나타낸 바와 같이 건조 배기가스 온도 A는 건조온도 B점까지 가열된다. 그리고 피건조물과 접촉하면서 건조가 진행되어 C점까지 냉각된다. 이 냉각된 배기가스는 응축기에 의해 노점 온도 D점까지 냉각되며 포화선상의 A점까지 온도가 떨어지면서 배기가스의 습기를 제습한 후, 재가열하는 싸이클을 형성한다.

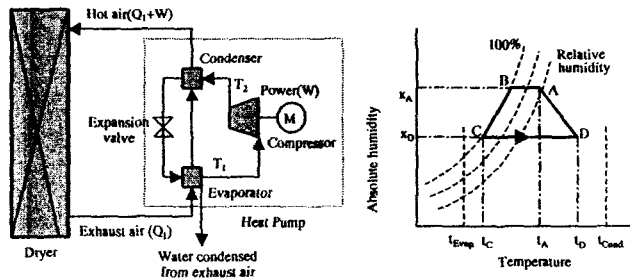
이러한 폐싸이클 제습 건조시스템에 사용되는 응축기는 thermal wheel, 원관형 열교환기, 판형 열교환기, 히트파이프 열교환기 등이 사용되고 있다. 특히 히트파이프 열교환기는 내부의 밀폐된 공간에서 순환하는 작동유체가 연속적으로 액체-증기 간의 상변화를 수행할 때, 동반하는 잠열을 이용하여 열을 이동시킴으로서 단일상의 작동유체를 이용하는 일반적인 열교환기에 비해 큰 열전달 성능을 갖고 있다. 이것은 기존 열교환기에 비해 크기가 1/2정도 작아지는 효과가 있으며, 열효율도 60~80%정도로 높은 장점이 있다. 또한 비교적 고온의 습공기에 대해서는 제습과 재가열이 가능한 루프싸이클(loop thermosyphon) 기술을 적용하여 습공기를 효과적으로 제습하여 가열열원으로 재이용할 수 있다.



[그림 1] 응축기이용 제습 건조시스템

2.1.2 히트펌프 제습 건조시스템

히트펌프는 저온열원으로부터 온도를 올려 고온열원을 얻는 동력학시스템으로서 [그림 2]에 나타낸 바와 같이 증발, 압축, 응축 및 팽창의 싸이클을 형성한다. 증발기에서 건조 배가스의 열을 흡수하여 액체상태의 냉매가 증발하여 압축기로 유입되어 단열압축에 의해 고온 고압의 과열증기 상태로 되며, 이 고온 고압의 과열증기는 응축기에서 냉각, 제습된 건조 배기가스에 열을 방출하고 액체상태로 팽창밸브에서 단열팽창 과정을 거치면서 저온의 액체로



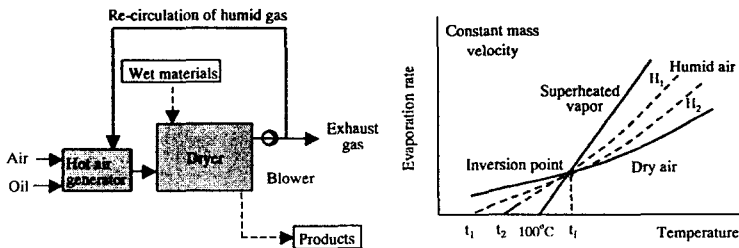
[그림 2] 히트펌프 제습 건조시스템

변화함으로써 한 사이클을 형성하게 된다. 이 사이클은 [그림 2]의 건조과정에서 상대습도가 증가한 배기가스는 A점에서 점차 포화상태인 B점으로 진행되어 증발기에 유입되며 증발기에서 배기가스의 열이 흡수되어 응축, 제습되어 포화선상의 C점까지 떨어진다. 이 제습된 배기가스는 응축기를 통과하면서 온도가 상승하며, 건조기 가열온도 D점까지 재가열되어 건조기로 유입되는 사이클이다. 일반적으로 히트펌프 제습 건조시스템은 가열온도가 40~50℃ 정도의 농산물 저온건조에 이용되고 있다.

2.2 배기가스 직접순환이용 건조시스템

일반적으로 건조장치의 건조속도는 외부 건조조건에 의해 결정되며 건조방식에 따라 가열원의 허용온도가 다르다. 열전도건조의 경우 피건조물이 접촉하는 면에서 건조가 진행되므로 고온을 사용하는 경우 품온상승에 따른 비등증발 현상이 발생하며 고수분의 상태로 감을 건조기간으로 들어가 건조속도를 저해할 수 있으므로 적절한 온도를 유지해야 한다. 직접접촉식 건조의 경우 항울건조기간이 길기 때문에 고온열풍을 사용할수록 열효율이 향상된다. 또한 동일 온도를 사용하는 경우에 습도가 높아지게 되면 습구온도도 높아지기 때문에 열풍과 피건조물의 유효온도차가 감소되어 건조속도가 감소하게 된다. 그러나 과열증기 또는 고습도 공기를 역전점온도(170~190℃부근)이상 고온에서 사용하는 경우에는 습도가 증가하여 유효온도차가 감소하는 것 이상으로 전열계수의 값이 증가되어 건조속도가 건공기를 사용하는 기존의 건조시스템에 비해 큰 폭으로 증가하게 된다.

[그림 3]은 배기가스의 직접 순환이용 건조시스템을 나타낸 것이다. [그림 3]에서 건공기, 과열증기, 공기-수증기 혼합기체의 건조 특성곡선에 표시한 바와 같이 과열증기중의 습구온도가 대기압, 100℃에서 그 온도는 증기온도에 따라 변하지 않는다. 따라서 경막전열계수가 일정하게 되며 증발잠열도 크게 변화하지 않기 때문에 증발이 일어나지 않는 100℃를 기점으로 거의 직선에 가까운 곡선으로 나타난다. 건공기일 경우에는 습구온도가 각각 가열온도에 따라 다르기 때문에 기울기가 각각의 온도에 따라 변화하며 그 값도 과열증기와 비교하면 적게 나타난다. 한편 건조가스의 온도가 역전점 온도보다 상승하면 과열증기 중에서의 증발속도가 건공기 중에서의 증발속도보다 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 습공기에서도 똑같은 양상을 나타내며 습공기의 노점온도에서는 증발이 일어나지 않으므로 노점온도를 기점으로 역전점을 지나는 곡선을 얻게 되며 과열증기와 마찬가지로 습공기의 경우도 역전점 이하에서는 건공기에 비해 건조속도가 낮아지지만 역전점 이상에서는 공기의 온도와 습도가 높을수록 건조속도는 증가하게 된다. 따라서 역전점 온도이상의 고온열풍을 사용하는 건조시스템에 있어서 고습도 배기가스의 직접순환 이용방식이 유리하다. 특히 과열증기 또는 고습도 배기가스 순환이용 건조시스템의 특징은 경막전열계수가 증가하여 증발속도가 빠르기 때문에 기존 시스템에 비해 열효율을 20~30%정도 향상시킬 수 있으며, 장치의 소형화가 가능하다(경막전열계수 300~500kcal/m²·hr·℃정도). 또한 배기가스 순환이용 방식으로서 배기가스처리장치가 소형으로 되며, 피건조물의 열화, 산화, 폭발위험 등이 적다.



[그림 3] 고습도 배기가스 직접순환이용 건조시스템 및 건조특성 곡선

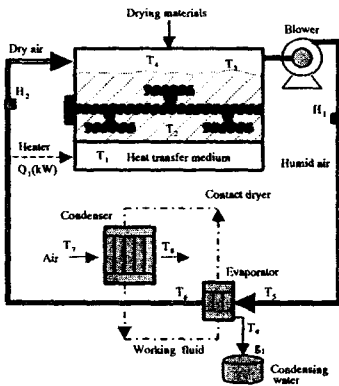
고온열풍을 사용하는 건조장치 중에서 건조 배기가스를 직접순환 이용할 수 있는 건조장치는 회전식 건조기, 기류식 건조기 및 유동층 건조기 등이 있다.

3. 적용효과 분석

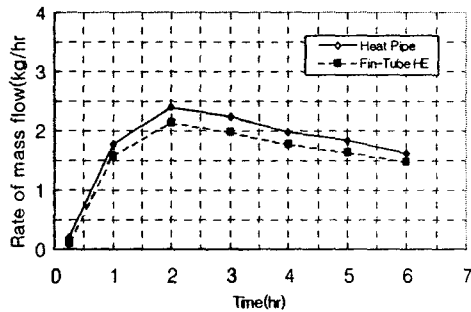
3.1 히트파이프식 응축기이용 열전도건조기

일반적으로 음식폐기물, 식품산업 부산물과 같은 유기성폐기물은 수분함량(70~80%정도)이 높고 악취와 오수를 발생하기 때문에 열전도건조기를 주로 이용하고 있다. 기존의 음식폐기물 건조기는 하부에서 열을 가하여 폐기물내의 수분을 증발시키고 상부에서 건공기가 순환되면서 증발된 수증기를 건공기가 흡수하여 고온 습공기 상태로 응축기로 유입되어 외부공기에 의해 이 습공기는 응축, 재습되어 건조실로 순환하는 시스템이다. 그러나 기존의 환관형 응축기는 동관을 사용하고 있으며, 건조과정에서 발생하는 고온 습공기가 관내부로 유동하므로 관을 부식시켜 수명을 단축시키고 관내외에 열전달계수가 낮은 공기가 유동하므로 열교환기가 커지는 단점이 있다.

따라서 본 적용 연구에서는 [그림 4]에 나타난 바와 같이 히트파이프 기술을 이용한 고효율 응축기를 개발하여 기존 열전도건조기에 적용하였다. 이 시스템은 실험시료(음식폐기물+뚝밥)의 초기함수율 60WB%, 30kg을 대상으로 건조과정에서 발생하는 고온 습공기는 증발부로 유입시키고 외부의 공기는 응축부로 유동시키는 분리형 루프히트파이프 기술을 적용하였다. 성능 실험결과 히트파이프식 열교환기의 증발부 입출구의 평균온도(T_5 , T_6)는 각각 61.3℃, 57.4℃로서 전열온도차는 3.9℃로 측정되었다. 이는 기존 환관형 열교환기의 입출구 온도차 7.7℃보다 3.8℃정도 낮게 운전됨으로서 건조실로 유입되는 건공기의 온도가 상대적으로 높아지게 되어 가열에 필요한 소요전력이 줄어들게 되었으며, [그림 5]에 나타난 바와 같이 응축효율이 상승하는 효과를 얻었다. 따라서 [표 1]에서 기존 환관형 열교환기에 비해 응축효율이 8%정도 향상되었으며, 부식성가스와 접촉하는 증발부에 스테인레스 재질로 가공하여 부식문제를 해결하였다. 특히 기존시스템에 비해 열교환기의 전열면적이 약 1/2정도 작아지고 기존 열교환기에 비해 약 10%정도의 에너지절약 효과를 얻었다.



[그림 4] 히트파이프식 응축기이용 성능실험장치의 개략도



[그림 5] 환관형 열교환기와 히트파이프식 열교환기의 응축수량 비교

<표 1> 시스템의 성능실험결과 비교

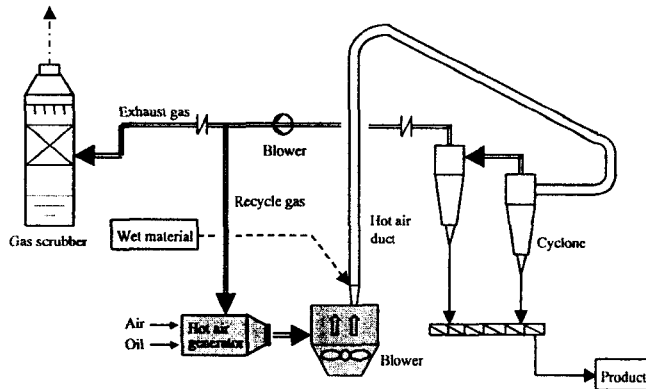
구 분	기존 시스템(A)	개선 시스템(B)	개선 효과
응축효율	85%	93%	8% 효율향상
전력소비량	2.34kW/hr	2.11kW/hr	-0.23kW/hr(10%절감)

3.2 고습도 배기가스 직접순환이용 기류건조기

기류건조기는 입상 또는 분체상인 피건조물을 고온 건조가스가 흐르고 있는 파이프내에서 고온 건조가스의 표면에 최대한 접촉되도록 산포하여 피건조물이 건조기체 속에서 부양된 상태로 흘러가면서 급속한 열교환이 이루어지며, 이때 발생하는 수증기를 포집시켜 건조하는 공기부양식 건조기이다. 이러한 기류건조기는 피건조물 입자의 열풍중 분산효과가 우수하여 건조시간이 짧고 열효율이 비교적 높으며 구조가 간단하여 식품공업, 화학공업 및 광공업 분야에서 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 식품공장의 맥분 건조공정에서 고온열풍을 사용하는 기류건조기에 대하여 고온 고습도 배기가스의 직접순환 이용방식을 적용하였다. 일반적으로 기류건조기의 배기가스는 파이프 끝단에 설치된 집진기를 통해 포집된 건조물은 하부로 배출되고 고습도의 배기가스는 가스세정장치 등을 통해 처리한 후, 대기중으로 배출된다. 본 시스템은 [그림 6]에 나타난 바와 같이 초기함수율 30WB%의 맥분원료를 공급기를 통하여 분산기로 공급하고 열풍발생기에서 350℃의 고온열풍을 송풍기에 의해 20m/sec로 공급하여 파이프내에서 산포되면서 건조가 진행된다. 이때 배기가스의 온도는 105℃, 절대습도는 0.2kg w/kg a로서 이 고온 고습도 배기가스의 일부(순환율 42%)를 열풍발생기로 직접순환하여 고온 고습도의 열풍을 건조열원으로 이용하는 시스템이다.

이 시스템의 운전결과는 <표 2>에 나타난 바와 같이 초기함수율 30WB%의 맥분 원료공급량 500kg/hr를 최종함수율 12WB%까지 건조시키는데 소비되는 연료소비량이 21 l/hr로 나타났으며, 열효율이 기존시스템의 48%에서 73%로 향상되어 약 25%정도의 에너지절약 효과를 얻었다.



[그림 6] 고습도 배기가스 직접순환이용 기류건조시스템

<표 2> 고습도 배기가스 직접순환이용 기류건조기의 운전결과

Parameters	Unit	Operating results	Remarks
입구온도	℃	350	초기함수율 : 30WB%
배기온도	℃	105	제품함수율 : 12WB%
입구습도	kg w/kg a	0.15	
배기습도	kg w/kg a	0.20	
원료공급량	kg/hr	500	
순환율	%	42	
연료소비량	ℓ/hr	21	
열효율	%	73	기존장치의 열효율 : 48%

4. 결 론

건조공정에서 배출되는 배기가스를 효과적으로 회수이용하기 위해서는 배기가스의 특성(량, 습도, 온도등)을 기초로 하여 배기가스의 온도가 비교적 저온인 100℃이하인 경우에는 제습 건조시스템을 적용하는 것이 효과적이다. 또한 100℃이상의 고온 고습도 배기가스에 대해서는 직접순환 이용방식이 유리하다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각종 건조공정에 있어서 히트파이프 및 히트펌프를 이용한 제습 건조시스템과 고온 고습도 배기가스 직접순환 이용시스템 등의 배기가스 회수이용기술을 통하여 약 20~30%정도의 에너지절약이 가능하다.
- 2) 특히 직접접촉식 고온열풍 건조시스템에 대하여 배기가스 순환이용기술을 적용함으로써 기존 건조시스템의 열효율 45~55%정도를 75~85%까지 향상시킬 수 있다.
- 3) 배기가스의 습도가 높은 경우(70~80WB%) 증발장치와의 조합이 가능하며, 타 건조장치와의 복합시스템을 적용하면 에너지절약 효과를 더욱 높일 수 있다.
- 4) 건조공정의 배기가스 회수이용기술 적용은 열효율 향상뿐만 아니라 배기가스 처리량이 감소하여 대기오염저감도 기여할 수 있다.

참고문헌

1. 통상산업부, 고효율 건조시스템 개발을 위한 기획연구. (1996)
2. 통상산업부, 히트파이프이용 건조기 개발에 관한 연구. (1997)
3. 한국에너지기술연구소, 히트파이프를 이용한 고효율 응축열교환 시스템 개발. (2000)
4. 이기우 외, 분리형 히트파이프식 열교환기의 응용 및 실용화 설계기술. 대한기계학회 열공학부문 학술강연회 강연집 pp.29-35. (1982)
5. Arun, S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker Inc.(1987)
6. Romuald, Z. Czestaw, S., Heat Pump in Drying, Drying '87, Hemisphere Pub. Co. pp.129-141, (1987)
7. E. J. Perry, F. I. Mesh, Drying by Cascade Heat Pumps, IEE Conference Publication No. 192, pp.246-256. (1981)
8. T. Yoshida and T. Hyodo, Evaporation of water in Air, Humid Air and Superheated Steam, Ind. Chem. Process Des. Develop., Vol. 9, No. 2. (1970)
9. J. C. Chu, A. M. Lane, D. Conklin, Evaporation of Liquids into Their Superheated Vapors, Ind. Eng. Chemistry, Vol. 45, No. 7, pp.1586-1592. (1953)
10. 伊與田浩志, 西村伸也, 野呂奉弘, 過熱水蒸氣乾燥における 複合熱傳達特性, 日本機械學會論文集(B編), 64卷, 619号 pp.173-180. (1998)