고효율 열펌프 건조기 기술

이공훈 | 한국기계연구원

[요약문]

지구 온난화에 따라 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 감축은 세계적인 관심사이며 모든 산업 분야의 1차 목표가 되고 있다. IEA는 시스템의 고효율화 기술이 2035년까지 목표 감축량의 50% 이상을 달성할 수 있는 기술로 판단하고 있다. 건조기는 대부분의 산업 분야에서 사용되는 필수기계이고 에너지 다소비 기기이므로 건조기의 에너지 효율을 향상시키는 것은 온실가스 감축에 있어서 중요한 부분이라 할 수 있다. 열펌프 건조기는 건조기 중에서도 가장 높은 효율을 달성할 수 있는 장치로서 산업 분야에 활용된다면 큰 역할을 담당할 것으로 판단된다. 특히 산업의 많은 분야에 활용되기 위해서는 고온용 열펌프 건조기의 개발이 매우 중요하다. 최근에 국내외에서 고온용 열펌프에 대한 관심이 증가하고 있고, 개발이 일부 진행되었으나 많은 산업분야에 적용 가능하도록 기술을 성숙시키려면 지속적인 연구개발이 필요하다.

1. 서 론

최근 지구온난화와 기후 변화가 세계적인 이슈가 되고 있고, 이에 따라 온실가스 감축 기술이 화두가 되고 있다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 온실가스 감축을 위하여 다양한 기술이 조사되고 있는데, 그 중에서 2010년에서 2035년 사이에 에너지 효율 향상이 온실가스 감축기술 중에 50% 이상의 비중을 차지할 것으로 여겨지고 있다.[1]

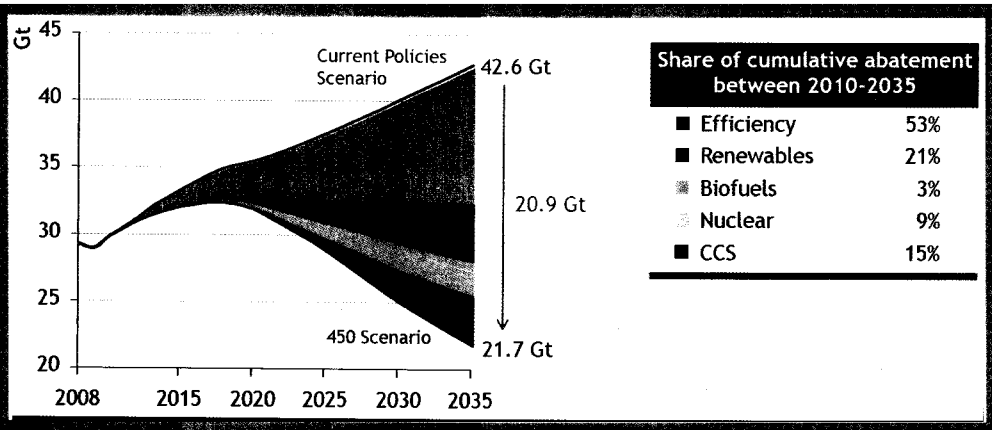

그림 1. CO_2 감축목표 달성을 위한 시나리오[1]

건조 기술은 농수산물, 제지, 섬유, 목재, 화공, 식품 등 대부분의 산업 분야에서 요구되는 필수적인 공정으로 건조 공정에서는 건조를 위하여 피건조물을 가열하여 건조시키기 때문에 많은 에너지를 소비한다.[2] Mujumdar는 제품의

생산에 투입되는 총 에너지에 비하여 목재 가공품의 생산 공정에서는 70%, 섬유 제조 공정에서는 50%, 옥수수 제품 생산 공정에서는 60% 이상의 에너지가 건조 공정에서 사용된다고 보고하였다.[3] 건조기는 생산 공정에서 에너지를 다량으로 소비하는 기계로서 고효율화를 통한 에너지 절감 및 온실가스 감축에 대하여 큰 잠재력을 가지고 있다고 할 수 있다.

에너지 다소비 공정인 건조 공정에서 에너지 효율을 높이기 위한 수단으로 배기열 회수, 새로운 건조기술 개발 등이 있는데, 그 중에서도 열펌프를 사용하는 건조기는 높은 에너지 효율에 기인하여 고효율 건조기의 중요한 후보가 되고 있다. 열펌프 건조기는 외국의 경우 1970년대부터 목재와 식품 건조 분야를 중심으로 사용되어 왔다.[4] 열펌프 건조기의 원리는 그림 2와 같이 냉난방용으로 사용되는 열펌프 시스템을 건조기에 적용하는 것으로 간단하여 기본적인 개발은 어렵지 않다. 그러나 효율적이고 신뢰성이 높은 열펌프 건조기를 개발하는 것은 쉽지 않기 때문에 현재까지도 지속적으로 연구가 이루어지고 있다.[4-6]

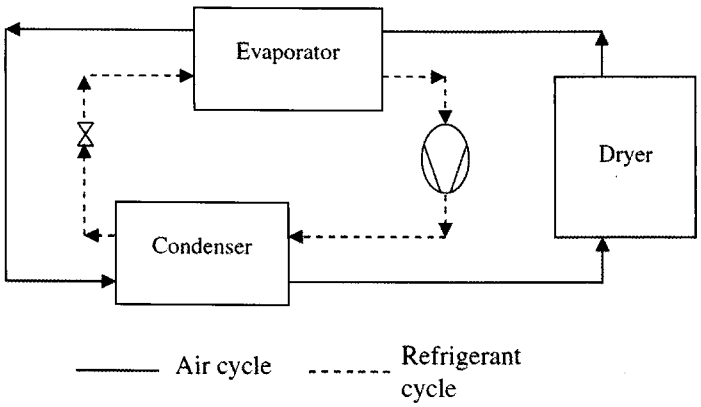

그림 2. 열펌프 건조기의 개략도

열펌프 건조기는 시스템의 기능상 건조기에서 배출되는 습공기에 포함된 현열과 잠열을 회수하여 재이용이 가능하기 때문에[7] 기존의 열풍 건조기에 비하여 에너지 이용 효율이 배 이상으로 높아 80% 이상으로 효율을 높일 수 있어서 상당한 에너지 절약효과를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.[8] 일례로 목재 건조에 이용되는 열펌프 건조기의 경우에는 기존의 석탄 또는 가스를 연료로 이용하는 건조기에 비하여 각각 45%, 42%의 1차 에너지(primary energy) 절감효과가 있다.[9] 일반적으로 열펌프 건조기에서는 건조기 출구에서 나오는 일정 온도 이상의 다습한 공기를 외부로 배출되지 않고, 증발기와 응축기로 순환되면서 습기를 제거하고 공기 중의 열에너지를 회수하여 다시 사용하게 된다. 건조 공기의 온도와 습도는 건조와 에너지 회수 과정에서 중요한 인자이며, 특별히 열펌프 건조기에 대하여 많이 사용되는 용어이기는 하지만 건조와 에너지 회수의 정도는 제습률(MER, moisture extraction rate)과 비제습률(SMER, specific moisture extraction rate)로 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\mathrm{MER} = \frac{\text{Amount of water evaporated from product (kg)}}{\text{Drying time (h)}}$$

$$\mathrm{SMER} = \frac{\text{Amount of water evaporated from product (kg)}}{\text{Total energy input (kWh)}}$$

MER은 열펌프 건조기의 건조속도를 대표하는 지표이고, SMER은 건조 에너지 효율 또는 건조비용과 관련이 되는 인자로서 열풍건조에서 이론적인 SMER의 최대값은 1.55 kg/kWh가 된다.[2] 일반적인 열풍 건조기에서는 0.5 ~

1kg/kWh 인데 비하여 전형적인 열펌프 건조기의 SMER은 3kg/kWh 정도이고 그림 3과 같이 특수한 경우에는 8 ~ 10kg/kWh의 SMER을 가지는 열펌프 건조기도 보고된 바 있다.[10]

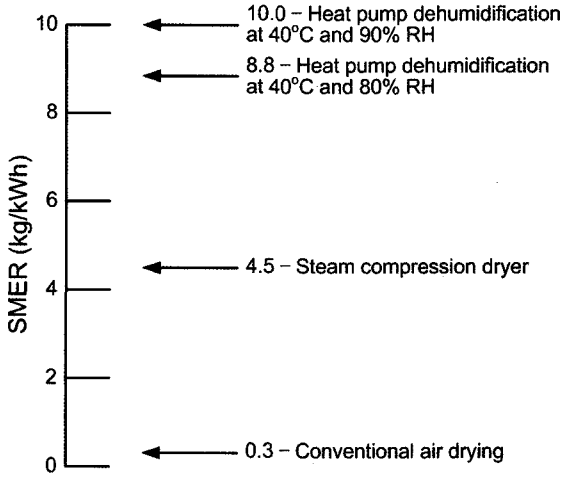

그림 3. 여러 가지 건조기의 성능[10]

이와 같이 열펌프 건조기는 건조 제품의 품질 향상 및 높은 에너지 효율 때문에 오랫동안 세계적으로 많은 연구와 개발이 이루어져 왔다. 다만 사용 냉매의 제한 때문에 대부분 60℃ 이하의 온도에서 사용하는 건조기가 대부분이고 그 이상의 온도에서 건조가 가능한 건조기에 대한 개발은 제한적으로 이루어져 왔다. 여기에서는 일반적인 열펌프 건조기에 대한 설명에 더하여 고온용 건조기 개발에 대한 최근 동향과 연구결과에 대하여 소개하고자 한다. 또한 건조 품질보다는 주로 에너지 효율 측면의 우수성에 대하여 주로 설명할 것이다.

2. 열펌프 건조기의 원리 및 기술 현황

열펌프 건조기는 그 명칭에서 알 수 있듯이 크게 열펌프 시스템과 건조실로 구성된다. 열펌프는 공기, 지열, 하천수 등 자연적인 열원이나 폐열, 배기열 등 버려지는 열원으로부터 열을 회수하여 에너지 효율을 높이는 시스템이다. 건조실은 건조 공정에 따라 상자식, 유동층, 회전식 드럼, 밴드 또는 컨베이어 등 다양한 형태를 가질 수 있다. 일반적인 열펌프 시스템은 그림 2에 나타낸 바와 같이 증발기, 응축기와 같은 열교환기, 압축기, 팽창밸브 등의 핵심 요소로 구성된다. 열펌프 건조기에서는 그림 2와 4에 나타낸 바와 같이 건조실에서 배출되는 습공기로부터 열을 공급받아 열펌프의 증발기 내부에서 냉매의 증발이 일어나면서 배기열을 회수한다. 이 때 건조실에서 배출된 고습, 저온의 건조공기 내에 포함된 수분이 증발기 표면에서 응축되며 건조공기의 절대 습도를 낮추게 된다. 압축기에서는 냉매를 고압으로 압축시켜 냉매의 엔탈피를 상승시키고 응축기에서 건조 공기에 열을 공급하면서 냉매의 응축이 일어난다. 증발기에서 제습되고 응축기에서 가열된 저습, 고온의 공기가 건조실로 공급되어 피건조물의 건조에 이용되고, 건조 후에 건조실 출구에 위치한 증발기로 향한다. 응축기에서 액체 상태로 응축된 냉매는 팽창밸브에서 단열 팽창을 하여 저압, 저온의 상태로 증발기로 들어가서 열펌프 사이클을 완성하게 된다. 건조기의 성능은 앞에서 언급한 MER, SMER을 사용하고, 열펌프시스템의 성능은 성적계수(COP, coefficient of performance)를 사용한다.

$$COP = \frac{\text{Useful heat output}}{\text{Power input}}$$

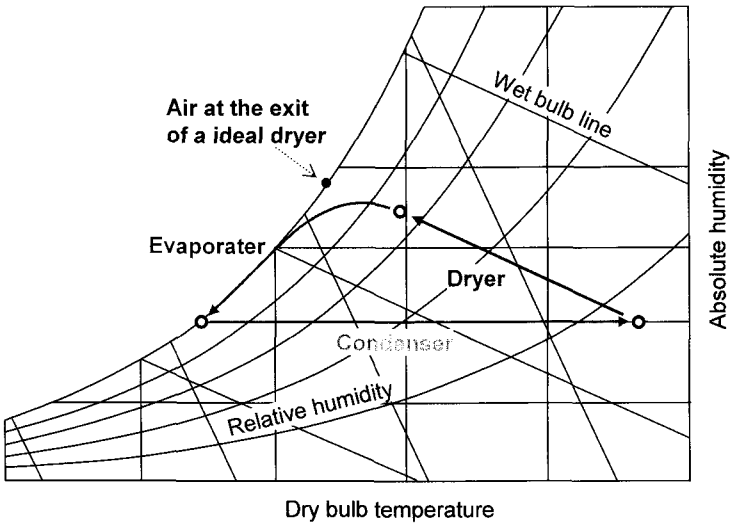

그림 4. 습공기 선도(Psychrometric chart)에 나타낸 열펌프 건조 과정

그림 2와 같이 단단 사이클(single cycle)을 사용하는 중저온용 열펌프 건조기는 국내에서는 냉풍건조기라는 이름으로 다수 보급되어 있다. 그러나 이러한 건조기는 냉난방에 사용하는 열펌프시스템을 차용한 것으로 그 명칭에서 알 수 있듯이 보통 상온 이하의 온도로 건조하는 장치로서 열펌프의 제습 기능을 주로 사용하여 주로 수산물, 농산품의 건조에 제한적으로 이용되고 있다. 또한 사용하는 열펌프시스템의 한계로 인하여 대부분 50~60℃ 이하의 온도에서 사용할 수 있고, 건조온도가 낮기 때문에 건조 속도가 느리고, 건조시간이 길어지는 문제가 있다.

중저온용 열펌프 건조기는 그림 5에 나타낸 예와 같이 단단 사이클 열펌프시스템을 사용하므로 구조가 비교적 간단하다.[1] 그림 5는 배치식 열펌프 건조기의 개략도를 나타낸 것이고, 그림 6은 연속식 열펌프 건조기의 개략도[2]를 보여준다. 건조기에 사용하는 열펌프시스템은 전형적인 열펌프시스템과 다르게 2개의 응축기를 가지고 있는데, 하나는 증발기에서 제습된 건조공기를 사용하고자 하는 건조온도까지 가열하는데 이용하고, 다른 하나의 응축기는 건조기 외부에 설치하여 건조 온도 및 부하 조절용으로 사용한다.

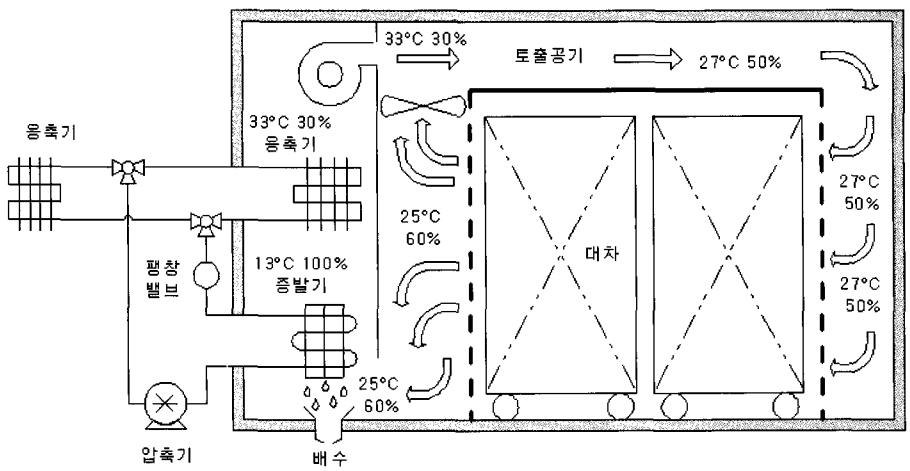

그림 5. 중저온용 상자식 열펌프 건조기 개략도

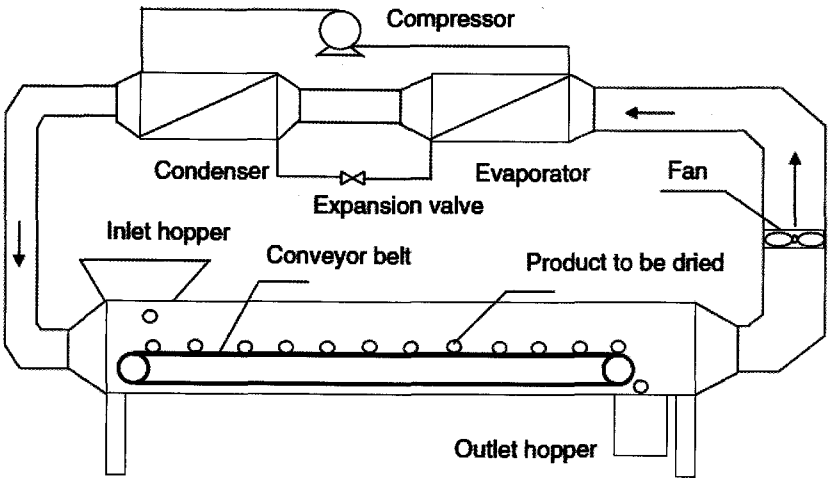

그림 6. 연속식 열펌프 건조기 개략도

위의 중저온용 열펌프 건조기는 앞서 언급한 바와 같이 상온 이하의 냉풍 제습 건조 또는 50℃ 이하의 온도로 사용 범위가 제한되기 때문에 대부분 농수산물의 건조에 사용되고 그 이상의 온도를 필요로 하는 산업용 건조 장치로 사용하기는 어렵다. 산업용 건조 공정에 적용하기 위하여 고온용 열펌프 건조기 개발이 시도되어 왔으나 고온용으로 사용가능한 냉매의 제한, 단단 사이클 보다는 다소 복잡한 열펌프 사이클 제어 등으로 인하여 활발하게 연구가 이루어져 있지는 않다. 1986년에 영국에서 CFC 계열 냉매인 R-114를 이용하여 60℃ 이상의 온도에서 건조가 가능한 목재 건조용 열펌프 건조기를 개발하였고, 목재 건조에서 기존의 열풍건조에 비하여 40~60%의 에너지 비용을 절감할 수 있었다고 보고된 바 있다.[2, 12] 그러나 최근에는 오존층 파괴와 지구온난화 문제로 냉매 R-114를 사용하는 시스템은 보고된 바 없다. 이와는 다른 자연냉매인 이산화탄소를 사용하는 고온용 열펌프 건조기에 대한 연구도 이루어져 왔다.[13-15] 이산화탄소를 사용하는 시스템은 초임계 이상의 고압에서 작동되어야 한다는 어려움은 있으나 110℃ 이하의 온도에서 사용이 가능하다. 다만 고압에서 작동 가능한 이산화탄소용 압축기와 열교환기에 대한 특수한 설계가 요구된다. 최근에는 캐나다 Hydro-Québec사의 연구소에서 그림 7과 8과 같이 R-236fa를 사용한 목재건조용 고온용 열펌프 건조기에 대한 연구가 수행되었다.[16] 이 건조기는 82~93℃의 온도 범위에서 가동되었으며 실험결과 평균 SMER이 목재의 종류에 따라 1.5~2.35 kg/kWh, COP는 3.0~4.6을 얻을 수 있었다고 발표하였다.

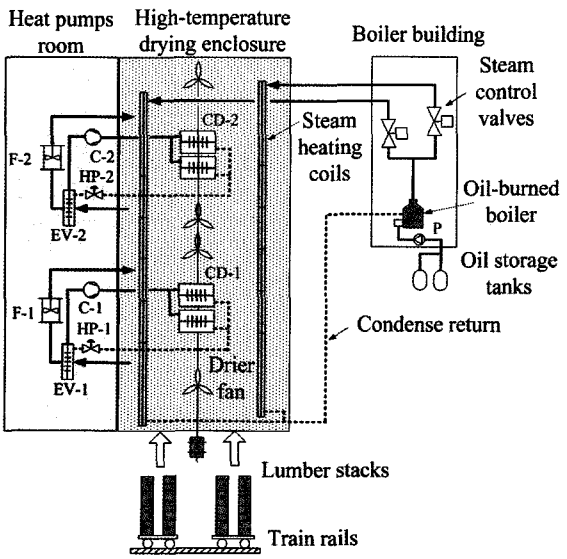

그림 7. Hydro-Québec사의 고온용 열펌프 건조기 개략도

국내에서도 최근에 고온용 열펌프 건조기 개발을 위한 연구가 수행되었다.[17, 18] 고온용 열펌프 건조기에 사용된 열펌프 시스템은 그림 9와 같이 2-사이클 시스템을 사용하였는데, 이는 고온용 열펌프에 사용 가능한 여러 가지 사이클을 분석하여 가장 높은 COP를 얻을 수 있는 사이클을 선정한 것이다.[19] 냉매로는 저온부 사이클에는 R-134a, 고

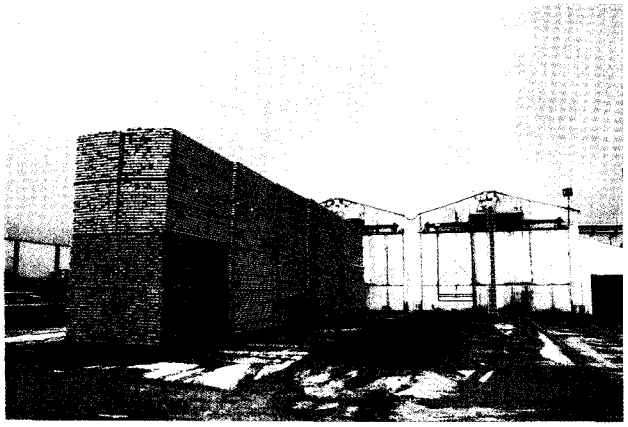

그림 8. Hydro-Québec사의 고온용 열펌프 건조기 전경

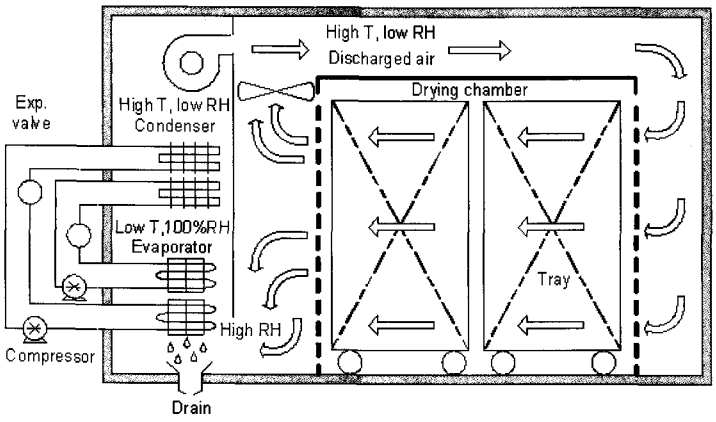

그림 9. 2-사이클 열펌프시스템을 이용한 고온용 열펌프 건조기 개략도

온부 사이클에는 R-124를 사용하였다. 그림 10에는 2-사이클 열펌프시스템을 이용한 건조과정을 습공기 선도에 나타내었는데, 시스템의 특성상 증발기와 응축기가 각각 2개씩 사용되므로 건조공기의 순환 과정도 그림과 같이 각각의 열교환기를 거치면서 상태가 변하게 된다. 건조실에서 배출된 습공기는 고온부 사이클의 증발기를 거치면서 1차 제습과 열회수가 이루어지고, 저온부 사이클의 증발기에서 추가로 제습과 열회수가 진행된다. 증발기를 거치면서 제습되고 온도가 낮아진 공기는 저온부 사이클의 응축기와 고온부 사이클의 응축기를 거치면서 순차적으로

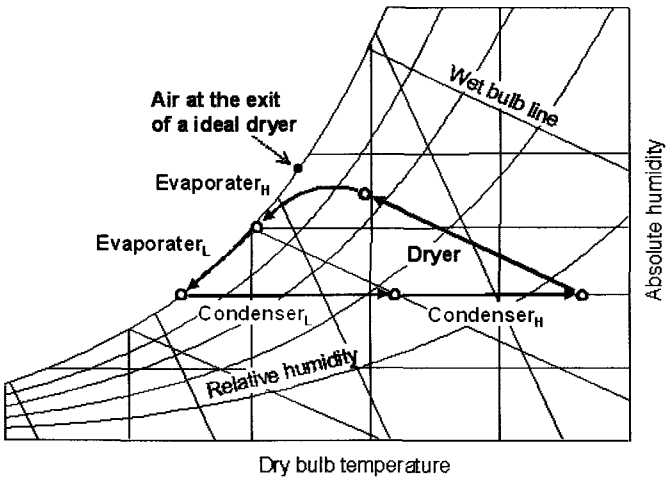

그림 10. 2-사이클 열펌프 시스템을 사용한 건조 과정

온도가 상승된 후에 건조실로 투입되어 피건조물을 건조하게 된다.

그림 11은 2-사이클 열펌프시스템을 이용한 50kW급 고온용 열펌프 건조기를 보여준다. 이 건조기는 그림에서 볼 수 있듯이 배치식으로 설계, 제작되었으며 80℃ 이상의 온도로 건조실에 투입된 피건조물을 건조할 수 있다. 최근에는 이 건조기의 상용화 모델로 200kW급 고온용 열펌프 건조기가 제작되었다.

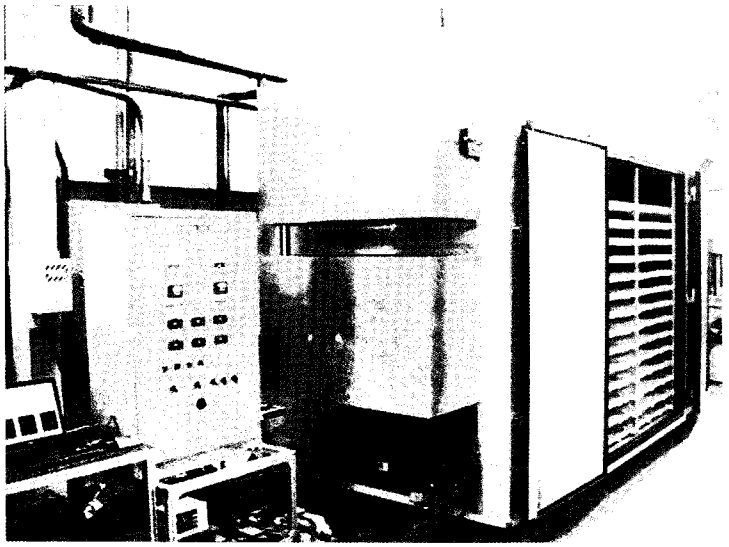

그림 11. 2-사이클 열펌프시스템을 이용한 고온용 열펌프 건조기

3. 열펌프 건조기 성능

열펌프 건조기에서는 사용되는 열펌프시스템의 특성에 의하여 배기열을 회수하여 다시 건조에 이용하기 때문에 우수한 에너지 효율을 얻을 수 있다. 열펌프 건조기의 에너지 효율은 표 1과 같이 다른 건조 방식에 비하여 높은 SMER과 효율로 나타난다. 높은 SMER은 결국 건조기 운전비용을 낮추게 되고 짧은 기간 내에 초기 투자비용을 회수할 수 있도록 해준다.

표 1. 열펌프 건조기와 다른 건조기의 비교[2]

구분	열풍 건조기	진공 건조기	열펌프 건조기
SMER (kg/kWh)	0.12~1.28	0.72~1.2	1.0~4.0
에너지 효율 (%)	35~40	≤70	95
초기 설치비용	낮음	높음	중간
운전비용	높음	매우 높음	낮음

그림 12는 그림 5에 나타낸 단단 사이클을 이용한 15kW급 중저온용 열펌프 건조기와 동일한 용량의 열풍 건조기에 대하여 건조실험을 수행하고 그 결과를 비교한 것이다. 건조온도는 40℃이고, 무 절편을 피건조물로 사용하여 실험을 수행하였다. 열펌프 건조기에서 Case III는 그림 5와 같이 완전 밀폐형 유로를 사용한 것이고, Case II는 증발기 출구와 응축기 입구에서 일부 공기를 배출하고 그 만큼의 외기를 도입하여 사용한 경우를 나타낸다. 열풍 건조기에서는 배기열 회수 기능이 없고, 외부에서 도입된 공기를 건조 온도까지 가열하여 건조에 이용하며, 건조실 출구로 배

출되는 습공기는 댐퍼를 통하여 모두 외부로 배기된다. 그림에는 건조기 출구 댐퍼를 완전히 개방한 경우와 절반만 개방한 경우를 함께 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 열펌프 건조기의 SMER은 모두 열풍 건조기에 비하여 3배에 가까운 높은 결과를 보여준다. 열펌프 건조기에서 항률건조기간의 SMER은 3.0kg/kWh 이상으로 높으나 건조 후기의 감률건조기간에는 에너지 이용 효율이 감소하여 건조과정 전체의 평균 SMER은 1.5kg/kWh 정도의 값을 보여주었다.

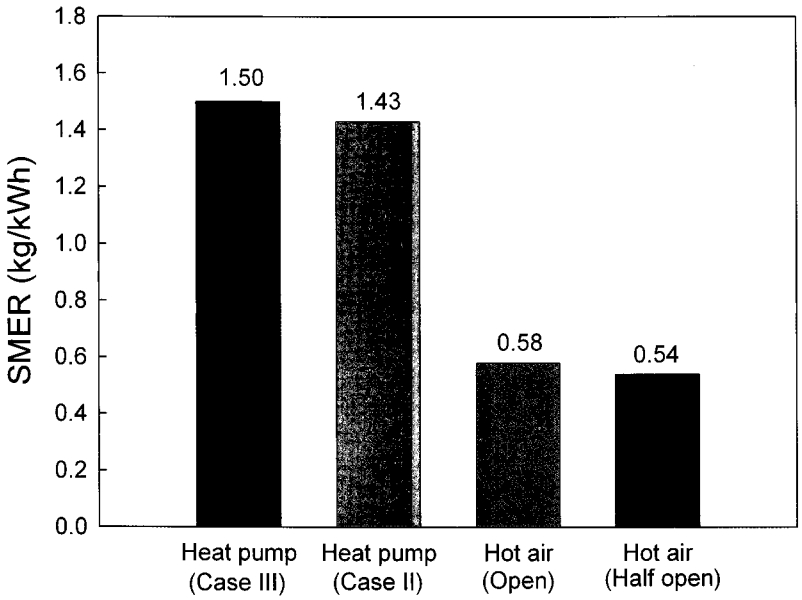

그림 12. 열풍 건조기와 중온용 열펌프 건조기의 SMER 비교

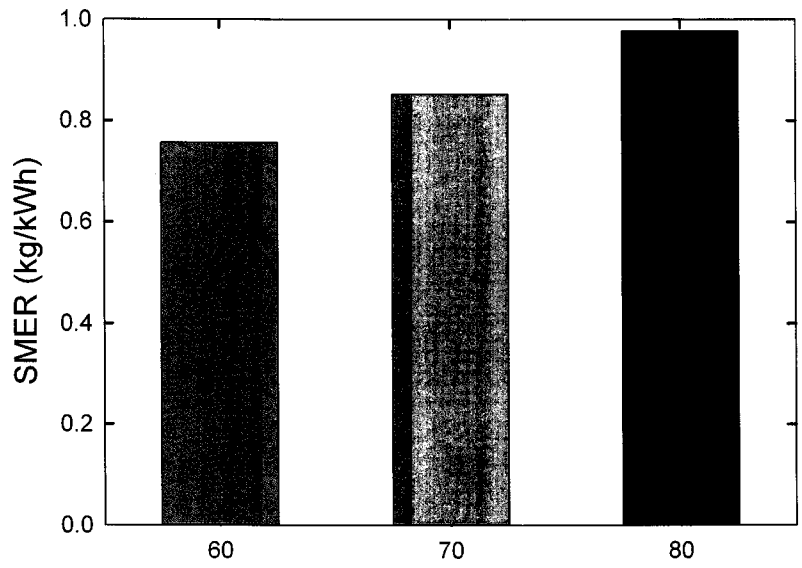

그림 13. 고온용 열펌프 건조기의 건조온도에 따른 SMER 비교

고온용 열펌프 건조기의 경우에는 중저온용의 경우에 비하여 건조기 벽면을 통한 열손실이 증가하기 때문에 성능이 다소 낮아지게 된다. 그림 13에 보인 결과는 그림 11의 고온용 열펌프 건조기를 사용하여 1회에 약 270kg의 붉은 고추를 건조한 결과는 나타낸 것이다. 이 건조기는 80℃ 이상의 건조온도를 사용하도록 설계된 장치로 80℃ 건조의 경우에는 중온용의 경우보다는 낮지만 1.0kg/kWh에 가까운 SMER을 보여준다. 이는 피건조물의 투입량 등의 최적화를 통하여 더 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 건조온도가 80℃ 보다 낮은 경우에는 고온용으로 설계된 열펌프시스템의 성능 저하와 건조시간이 길어져서 다소 낮은 성능을 보이고 있다. 그러나 열풍 건조기의 경우와 비교한다면 여전히 높은 성능을 보인다고 할 수 있다. 80℃ 건조에 대한 SMER을 에너지 효율로 환산하면 약 71%가 된다.

4. 열펌프 건조기의 장단점

지금까지 열펌프 건조기의 원리, 성능 등에 대하여 살펴보았는데, 열펌프 건조기가 에너지 효율 측면에서 우수한 것은 분명한 사실이고 많은 장점을 가지고 있다고 할 수 있다. 그러나 열펌프 건조기를 모든 분야의 건조공정에 적용하기에는 한계가 있다는 것도 사실이다. 열펌프 건조기의 장점은 앞서 많이 언급이 되었지만 여기에서 정리하면 다음과 같다.

① 열펌프 건조기에서는 건조실 배출 습공기로부터 현열 및 잠열을 회수하여 일반적으로 1.0~4.0kg/kWh 범위의 높은 SMER을 얻을 수 있다.
② 열펌프 건조기에서는 상당히 우수한 품질의 건조 제품을 얻을 수 있고, 밀폐유로를 사용할 경우에는 일반적인 열풍 건조기에 비하여 상당히 낮은 함수율까지도 건조가 가능하다.
③ 건조온도의 범위가 -20~100℃로 넓다. 보조가열 장치를 추가하면 100℃ 이상의 건조가 가능한 시스템을 구성할 수 있다.
④ 밀폐유로를 구성하면 외기의 이물질 유입 없이 위생적인 건조가 가능하여 식품, 세라믹, 바이오 물질 등 품질의 안정, 향상이 요구되는 제품 건조에 적용이 가능하다.
⑤ 에너지 효율이 높아서 CO_2 저감 등 환경문제 대응이 유리하다.

반면에 대표적인 단점들은 다음과 같다.

① 열펌프시스템에 사용하는 냉매의 종류(CFC 계열)에 따라서 환경문제를 야기할 수 있다.
② 열펌프시스템의 사용으로 열풍 건조기에 비하여 시스템 구성이 복잡해지므로 정기적인 시스템 관리 및 유지보수를 필요로 한다.
③ 시스템 구성이 복잡해지면서 초기 설치비용이 증가한다.

5. 결 론

지구 온난화에 따라 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 감축은 세계적인 관심사이며 모든 산업 분야의 1차 목표가 되고 있다. IEA는 에너지시스템의 고효율화 기술이 2035년까지 목표 감축량의 50% 이상을 달성할 수 있는 기술로 판단하고 있다. 건조기는 대부분의 산업 분야에서 사용되는 필수기계이고 에너지 다소비 기기이므로 건조기의 에너지 효율을 향상시키는 것은 온실가스 감축에 있어서 중요한 부분이라 할 수 있다. 열펌프 건조기는 건조기 중에서도 가장 높은 효율을 달성할 수 있는 장치로서 산업 분야에 활용된다면 큰 역할을 담당할 것으로 판단된다. 그러나 고효율에도 불구하고 큰 초기 투자비용, 유지보수 문제 등으로 아직까지는 많은 보급이 이루어지지 않고 있다.

특히 산업의 많은 분야에 활용되기 위해서는 고온용 열펌프 건조기의 개발이 매우 중요하다. 최근에 고온용 열펌프건조기의 개발이 일부 진행되었으나 배치식 구조로 인하여 일부 응용 분야에 한정되어 있고, 다양한 분야에 활용하기 위해서는 연속식 등 다른 구조의 건조기에 대한 개발이 필요하다고 할 수 있다.

고온용 열펌프 건조기의 개발에 있어서 중요한 점 하나는 고온용 열펌프에 사용할 수 있는 지구온난화지수(GWP, global warming potential)이 낮은 새로운 냉매의 개발이라 할 수 있다. 이러한 냉매가 개발된다면 고온용 열펌프의 개발에 큰 도움이 될 것이다.

참고 문헌

[1] World Energy Outlook, International Energy Agency (IEA), 2010.

[2] A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, 3rd ed., CRC Press, Boca Ration, 2007.

[3] J. C. Ho, S. K. Chou, A. S. Mujumdar, M. N. A. Hawlader, and K. J. Chua, "An optimization framework for drying of heat sensitive products," Appl Therm Eng, Vol. 21, pp. 1779-1798, 2001.

[4] P. Bannister, G. Carrington, and G. Chen, "Heat Pump Dehumidifier Drying Technology - Status, Potential and Prospects," Proc. of 7th IEA Heat Pump Conference, Vol. 1, pp. 219-230, 2002.

[5] G. Carrington, N. Hewitt, P. Bannister, and J. Anderson, "Oppertunities for Heat Pump Drying in Industrial Processes," Proc. of Int. Congress on Refrigeration, ICR0540, 2003.

[6] N. Colak and A. Hepbasli, "A review of heat pump drying: Part 1 . Systems, models and studies," Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 2180-2186, 2009.

[7] S. Prasertsan, P. Saen-Saby, G. Prateepchaikul, and P. Ngamsritrakul, "Effects of Producr Drying Rate and Ambient Condition on the Operating Modes of Heat Pump Dryer," Proc. of 10th Int. Drying Symp., Vol. A, pp. 529-534, 1996.

[8] B. Wijesinghe, "Low Temperature Drying of Food Materials Using Energy-Efficient Heat Pump Dryers," CADDET Newsletter, No. 7, pp. 4-5, 1997.

[9] P. Bannister, G. Chen. A. Grey, C. G. Carrington, and Z. F. Sun, "Economic Reduction of Greenhouse Gas Emission Through Enhanced Dehumidifier Timber Drying," Proc. of 19th Int. Congress of Refrigeration, pp. 241-249, 1997.

[10] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker. Inc., New York, 2002.

[11] 이공훈, 김욱중, 이상열, "순환 공기 유량의 변화를 고려한 열펌프 건조기의 성능 해석", 설비공학논문집, 제21권, 제1호, pp. 1-8, 2009.

[12] C. L. Lpoez-Cacicedo, "Electrical Methods for Drying," Drying '86, Vol. 1, Hemisphere Publishing Corp., Washington, USA, pp. 12-21, 1986.

[13] O. Alves-Filho, T. Lystad, T. Eikevik, and I. Strømen, "A New Carbon Dioxide Heat Pump Dryer - An Approach for Better Product Quality, Energy Use and Environmentally Friendly Technology," 12th International Drying Symposium, The Hague, The Netherlands, 2000.

[14] T.M. Eikevik, O. Alves-Filho, and I. Strømen, "Potential Applications for a New CO_2 Heat Pump Dryer," The First Nordic Drying Conference, Trondheim, Norway, 2001.

[15] I. Strømen, O. Alves-Filho, and T. Eikevik, Developments of Heat Pump Drying Technology," The First Nordic Drying Conference, Trondheim, Norway, 2001.

[16] V. Minea, "Energetic and Ecological Aspects of Wood Drying with Heat Pumps," Proc. of 5th Asia-

Pacific Drying Conference, Vol. 1, pp. 434-442, 2007.
[17] 이공훈, 김욱중, 김종률, 이상열, "2-사이클 열펌프 건조기에서 건조과정에 대한 실험적 연구", 대한설비공학회 동계학술대회논문집, pp. 631-641, 2008.
[18] K. H. Lee, O. J. Kim, J. Kim, "Performance Simulation of a Two-Cycle Heat Pump Dryer for High-Temperature Drying," Drying Technology, Vol. 28, pp. 683-689, 2010.
[19] 김종률, 김용민, 이공훈, 이성철, 정치영, 이상열, "건조기 적용을 위한 고온용 열펌프 사이클 설계," 대한설비공학회 동계학술대회논문집, pp. 788-793, 2009.

이 공 훈

· 한국기계연구원 에너지플랜트 연구본부
열유체시스템연구실
· 관심분야 : 에너지플랜트, 고효율 열유체시스템
· E-mail : konghoon@kimm.re.kr