

무중력 유동층 건조기 개발과 성능평가

한지웅* · 금성민** · 이창언***

A Study on the Development and Performance Test of the Non-gravity Fluidized Dryer

J. W. Han, S. M. Kum and C. E. Lee

Key Words: Non-gravity Fluidized Dryer(무중력 유동층 건조기), Mixer(혼합기), Paddle Mechanism(패들 메커니즘), Fluidized Zone(유동층영역)

Abstract

The purpose of this study is to develop a new type dryer, which is to proceed mixing and drying of wet-materials at the same time and drying process is carried out in a closed system.

In this drying system, thermal contact occurs, when a fluidized zone is created by paddle mechanism. Accordingly, wet-materials is dried in a short time without any damage. Also wet-materials could be dried uniformly to low moisture contents. It is suitable to dry a small quantity of multi-kind materials. And drying process is carried out in a closed system, so as for environmental pollution dust not to be emitted into the atmosphere.

Accordingly, it could be used to dry not only food and chemical materials, but also environmental pollution materials.

1. 서 론

열에 의해 피건조물중에 존재하는 수분을 증발 제거하는 건조는 열과 물질의 이동이 동시에 진행되는 열적 분리법의 하나로, 산업체 제조공정 중 가장 많이 적용되는 대표적인 에너지 다소비 공정이기 때문에 열사용설비의 효율적 관리 측면에서 그 중요성이 널리 인식되어 왔다^(1~4). 건조 공정에서는 피건조물의 건조 후 상태가 최초에 목적했던 상태와 동일하게 되도록 건조시키는 기술이 핵심이며, 피건조물의 종류가 섬유제품, 화공제품, 식품, 폐기물 등 매우 다양하므로 각각의

피건조물 특성에 맞는 적당한 형태의 건조방식 선택이 중요하다^(5, 6).

현재 산업체에서 생산되고 있는 건조기는 통기식 건조기가 약 69%, 회전식 건조기가 12%, 기류식 건조기가 6%, 분무건조기가 3%, 유동층 건조기가 3% 정도로 파악되며^(1, 2) 피건조물의 특성에 적합하도록 설계, 제작되고 있으나 기술수준은 선진국에 비해 많이 떨어져 있는 상태이다.

따라서 제조분야에서 건조과정의 중요성을 생각해볼 때 건조장치에 대한 기술개발은 매우 중요하며^(1~9) 소량 다품종에 대응할 수 있는 설계 기법이 요구된다고 할 수 있다.

특히 대부분의 건조장치는 피건조물과 접촉한 열풍이 대기중으로 방출되기 때문에 건조과정에서 발생한 분진이나 환경유해분진의 포집과 제어를 완벽하게 할 수 있는 시스템을 제작하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 소량 다품종 재료의 건조를 목적으로

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 한라대학교 기계공학부

*** 인하대학교 기계·항공자동차공학부

로 피건조물을 저함수율까지 균일하게 건조할 수 있으며, 환경유해분진이 대기중으로 방출되지 않도록 위해 건조공정을 밀폐시스템내에서 진행될 수 있는 새로운 형태의 건조기를 설계 제작하는 것이다.

본 연구에서 개발한 건조기는 무중력 혼합기에 건조장치를 개발 장착한 것으로서 무중력 혼합기의 패들 메커니즘(paddle mechanism)에 의해 유동층을 형성할 때 열접촉이 발생하게 되므로 원료에 손상 없이 건조가 단시간에 진행 완료되며 건조공정이 밀폐된 시스템 내에서 진행되므로 식품, 화학원료 뿐 아니라 유독성 폐기물을 건조시킬 때에도 적용될 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 구조

Fig. 1은 개발한 무중력 유동층 건조기의 개략도로써 크게 혼합기와 건조제어부로 나눌 수 있다. Fig. 2는 혼합기를 나타낸 것으로 작업부피를 약 20~25리터(전체부피는 약 40리터)로 설계하였으며 내부 크기는 470×400×500, 재질은 스테인레스 304(5t)이며 단열을 위해 이중구조로 되어 있다.

원료는 혼합기의 윗부분에서 투입되며, 하부 경사면에 설계된 배출구를 통해 배출된다. 혼합기의 양쪽 측면에는 열풍을 혼합기의 입구로부터 밑부분으로 유동시키기 위한 가이드패널이 설치

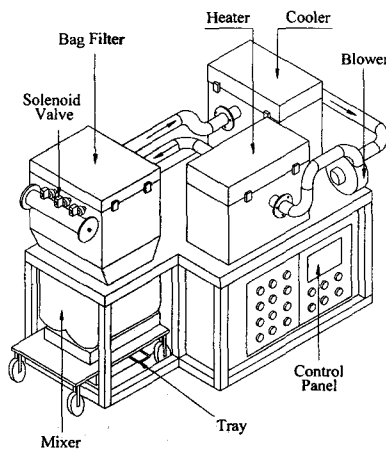


Fig. 1 Schematic diagram of non-gravity fluidized dryer

되어 있는데, 이 패널은 열풍의 속도와 혼합기내의 온도분포를 결정하는 중요한 요소가 될 수 있기 때문에 기초실험을 위해 가변되도록 제작하였다.

혼합실내에는 두 개의 회전축이 있으며 한 개의 회전축에 14개의 패들이 상호 중첩되도록 설계되었고 축의 회전속도는 85rpm이다. 두개의 패들축은 서로 반대방향으로 회전하며 피건조물을 각각 다른 방향으로 분산시켜 유동층 영역을 만든다. 이때 피건조물 이동은 혼합기 바닥에서 중앙 상층부로 집중되며 이에 따라 혼합실의 유효부피는 증가하고 피건조물은 유효부피가 증가함에 따라 상호간의 충돌 및 마찰이 감소한다.

본 무중력 유동층 건조기는 기본적으로 밀폐시스템을 채택하여 열풍은 밀폐된 시스템내를 순환하게 되어 있으며 건조조건에 따라 오픈시스템을 겸용할 수 있도록 제작하였다.

공기가열을 위한 히터는 일반 산업용 원료는 물론 고부가가치 원료 및 소량 다품종 원료 건조에 적합하도록 열원의 청정도, 온도조절 및 설비비를 고려하여 전기히터를 선정^(3, 6)하였고 밀폐시스템에 적합하도록 박스형으로 제작하였다.

Fig. 3은 백필터의 형상을 나타낸 것으로 백필터에 의한 여과집진은 포집성능이 뛰어난 집진방식중의 하나로 알려져 있다.

따라서 포집성능, 내열성, 경제성 및 교체용이성 등을 고려하여 Woven Fiberglass(#6255, 미국 TETRATEC사)를 선정하였는데 열풍의 통기를 원활하게 하기 위해 입체적 구조를 갖도록 사각의 필터케이지 (540×400×40mm)를 제작하고 필터케이지 바깥부분에 Woven Fiberglass를 씌운 형태이다. 건조과정중 백필터에 붙은 분진을 털

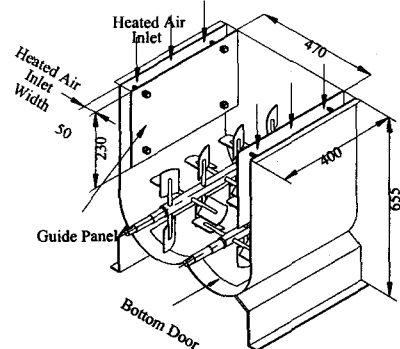


Fig. 2 Detail diagram of mixer

어주기 위해 펄스제트방식을 채택하였으며 4초 간격으로 고압공기가 3개의 제트분사관을 통해 백필터에 분사되도록 되어있다.

2.2 실험방법

본 건조기의 유로체계를 살펴보면 밀폐시스템인 경우, 공기는 원심식 송풍기에 의해 전기히터로 보내지며 가열된다. 히터는 단열처리된 알루미늄 박스 안에 내장되어 있고, 공기는 알루미늄 박스 안으로 유입되면서 가열된다. 이 알루미늄 박스 안에는 온도계측기가 부착되어 있고 이것은 컨트롤패널에 연결되어 히터 출구온도 설정에 따라 히터의 발열량을 제어한다.

가열된 열풍은 혼합기의 양쪽 유로를 통해 혼합기내부로 유입되는데 이때 습도계에 의해 습도가 측정되고 열전대로 온도가 측정된다.

혼합기내부로 유입된 열풍은 피건조물과 접촉한 후 혼합기 위에 설치된 백필터를 통과하면서 분진이 제거된후 배출구를 통해 쿨러로 유입되며 쿨러를 통과하면서 습기가 제거되고 다시 송풍기로 보내져 밀폐사이클을 이루게 된다. 쿨러입구에는 습도계와 열전대가 부착되어 있어 습도와 온도가 체크된다. 실험장치의 모든 온도는 데이터로거(HP 3852A)로 측정하였다.

오픈시스템인 경우에는 백필터를 통과한 열풍이 대기중으로 배출되도록 하기 위해 백필터 출

구의 유로를 대기에 개방시켰으며 열풍이 유동하는 유로는 내부직경이 100mm인 STS304 파이프를 사용하였다.

피건조물의 함수율 측정은 건조기내에서 건조되는 과정중 2분 간격으로 혼합기의 샘플채취구를 통해 샘플을 채취한 후 모이슈처 발란스(SARTORIUS, MA30)를 이용해 측정하였다.

실험은 기본적으로 밀폐시스템으로 수행하였으며 특정조건에서는 오픈시스템에서도 실험을 수행하여 두 결과를 비교하였다.

특히 본 건조기의 구조를 최종적으로 확정하기 위해 혼합기의 열풍 유입 폭 결정을 위한 실험과 수치해석을 병행하였으며, 기초실험⁽¹⁰⁾을 수행하여 외국의 유사 건조기의 성능과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열풍유입구 폭의 결정

혼합기 내부에서의 열풍흐름과 온도분포는 건조기의 건조성능에 영향을 주는 중요한 변수이다. 본 건조기에서 열풍은 Fig. 2와 같이 혼합기의 내벽과 가이드패널 사이로 유입되어 혼합기의 밑부분으로부터 상부로 유동하는 구조로 되어있다.

본 연구에서는 열풍유입구 폭을 결정하기 위해 폭을 30, 40, 50mm로 변화시키면서 Fig. 4와 같은 위치에서 열풍의 온도를 측정하였다. 특히 실험을 통해 혼합기 내부 전영역에서 속도 및 온도

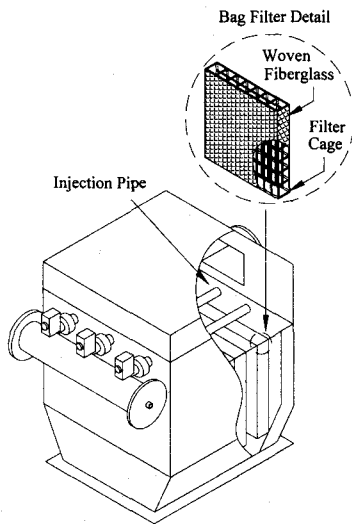


Fig. 3 Schematic diagram of filter

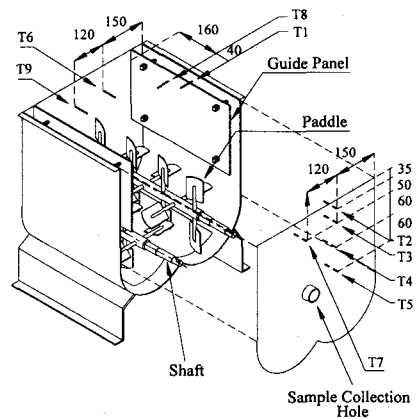


Fig. 4 Temperature measurement position of mixer

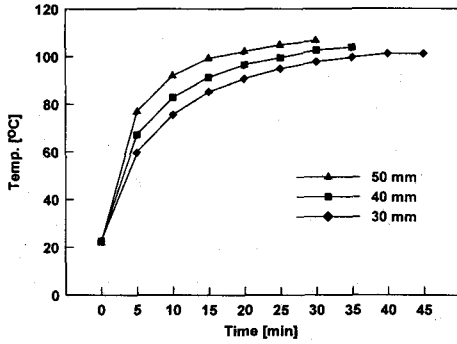
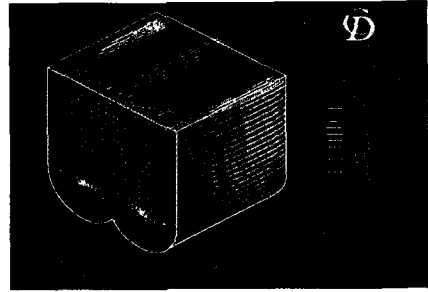


Fig. 5 Average temperature distribution in mixer

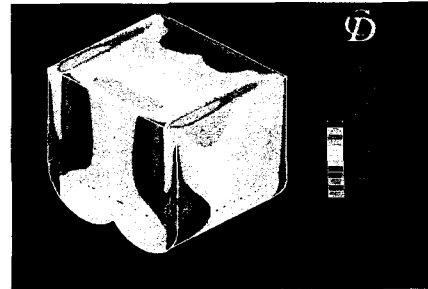
분포를 확인한다는 것은 실질적으로 불가능하기 때문에 기초 실험조건을 근거로 상용 프로그램인 Star-CD를 이용하여 혼합기 내부에서 속도와 온도분포에 대한 전반적인 경향을 알아보고 기초 실험 결과와 비교하여 열풍유입구 폭을 결정하였다.

Fig. 5는 유입구에서 속도분포 결과를 근거로 열풍온도를 150°C, 혼합기입구 평균유속이 1.2m/s인 경우 열풍유입구 폭을 각각 30, 40, 50mm로 변화시키면서 시간경과에 따른 혼합기 내부의 위치별(Fig. 4 참조) 열풍 평균 온도분포를 나타낸 것으로, 시간이 경과함에 따라 혼합기 내부의 위치별 온도증가 경향은 전체적으로 유사하지만 열풍유입구 폭이 클수록 최고온도(약 110°C)에 도달하는 시간은 단축되며 실험 결과 열풍유입구 폭이 50mm인 경우가 30, 40mm인 경우보다 위치별 온도차이도 비교적 작게 나타났다. 따라서 혼합기내 유속분포에 대한 실험결과와 연계해서 고려해 볼 때 열풍유입구 폭은 50mm가 적절할것으로 판단된다

Fig. 6은 초기온도 150°C, 벽면온도가 10°C, 열풍유입구 폭이 50mm일때 혼합기 내부의 속도 및 온도분포에 대한 수치해석 결과이다. 지면상 생략하였으나 (a)의 속도분포를 보면 30, 40mm일때와 비교하여 전체적으로 균일한 흐름을 유지하고 있으며 (b)는 혼합기 내부에서의 온도분포를 나타낸 것으로 30, 40mm와 비교해 보면 중앙부분의 온도차이가 비교적 작게 나타나며 내부의 온도분포도 전체적으로 높게 나타난다. 이상과 같은 수치계산결과 열풍유입구 폭이 50mm일 때 가 다른조건에 비해 혼합기내부에서의 열풍흐름



(a) Velocity



(b) Temperature

Fig. 6 Variation of velocity and temperature in mixer

과 온도분포가 비교적 균일한 것으로 판명되었다.

3.2 건조기의 예비실험

본 연구에서는 건조기의 최종성능평가에 앞서 건조기의 작동상태를 점검하고 외국의 유사 건조기(노르웨이 FORBERG사)⁽¹¹⁾와의 건조성능을 간접 비교하기 위해 예비실험을 수행하였다.

Fig. 7은 초기함수율이 6.1%인 모래를 함수율이 0.6%이하를 목표로, 히터 설정온도 200°C, 열풍속도가 0.6m/s일 때 시간경과에 따른 혼합기내 피건조물의 온도와 함수율 변화를 나타낸 것이다. 실험수행시 대기온도는 약 13°C이었고, 히터 출력의 열풍온도가 초기 설정온도까지 도달하는 데는 약 10분 정도 소요된다. 혼합기 출구에서 배출되는 열풍온도는 건조시작후 증가하기 시작하여 약 102°C 까지 상승하며 모래의 온도도 점차 증가하기 시작해 건조종료시에는 약 40°C로 나타났다. 피건조물의 함수율 변화는 5분 간격으로 측정하였는데 건조시작 후 거의 일정한 비율로 감소하여 목표함수율인 0.6%까지 도달하는데에는 약 35분이 소요된다.

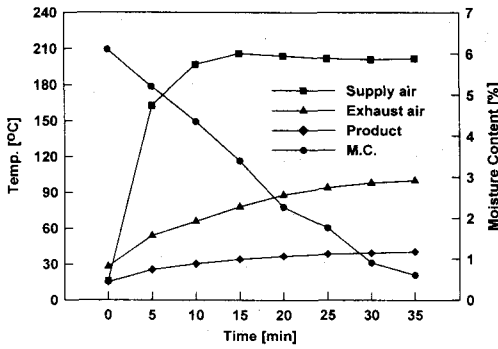


Fig. 7 Moisture content and temperature for drying time

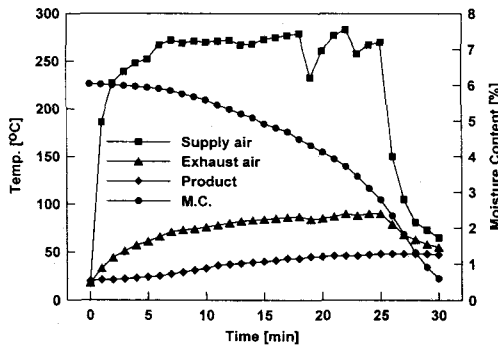


Fig. 8 Moisture content and temperature for drying time(FORBERG data)

Fig. 8은 FORBERG사 건조기의 데이터를 근거로 작성한 것이다. 본 실험조건과 비교하면 피건조물의 종류, 초기함수율, 목표함수율은 동일하고, 히터출구의 초기설정온도, 건조기의 용량이 다르다.

먼저 히터출구 설정온도 270°C까지 도달하기까지는 약 7분 정도 소요되며, 25분이 지난 후 히터를 끈것으로 예측된다. 혼합기 출구에서 배출되는 배기열풍의 온도는 최고 약 90°C이며 피건조물의 온도는 건조가 완료될 때 약 50°C이었다. 피건조물이 목표함수율까지 도달하는데는 약 30분 정도가 소요되는 것으로 나타났다.

이상과 같이 비록 간접비교이긴 하지만 두 건조기의 성능을 비교한 결과 본 연구에서 제작한 건조기의 성능은 충분히 만족할만하다고 판단된다.

3.3 건조기 성능실험

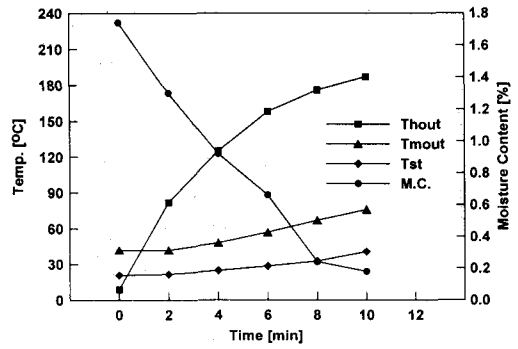


Fig. 9 Moisture content vs. time(closed)

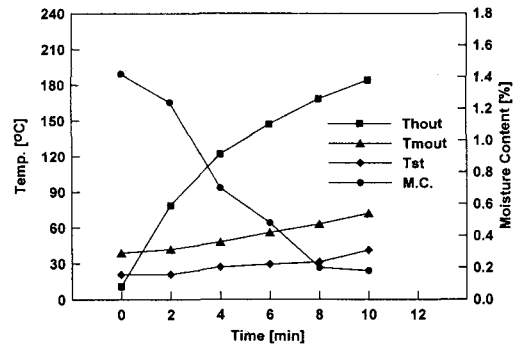


Fig. 10 Moisture content vs. time(open)

예비실험결과를 근거로 건조기의 최종성능실험을 위해 시료는 설탕을 선택하고 열풍온도, 유속 및 초기함수율을 변화시키면서 실험을 하였다.

Fig. 9는 유로의 구성을 밀폐시스템으로 한 후 초기함수율이 1.6%일 때 함수율 0.2%이하를 목표로, 히터 설정온도 200°C, 열풍속도가 0.9m/s일 때 목표함수율까지의 건조시간을 나타낸 것으로 건조시작후 약 8분까지 함수율은 급격히 감소하며 목표함수율까지 걸리는 시간은 약 10분이다. 배출열풍의 온도는 계속 증가하여 건조가 완료되는 시점에서 약 75°C를 나타내며 시료의 최종온도는 약 42°C이다.

Fig. 10은 유로의 구성을 오픈시스템으로 한 후 실험한 결과로서 두가지 방식에 따른 건조성능에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 환경오염물질 등과 같은 특수한 조건이 아니면 쿨러의 사용이 필요없는 오픈시스템이 에너지절약 및 건조효율면에서 유리할것으로 생각된다.

Fig. 11은 열풍온도 및 열풍속도 변화시 건조시간에 따른 함수율변화를 나타낸 것으로 열풍속

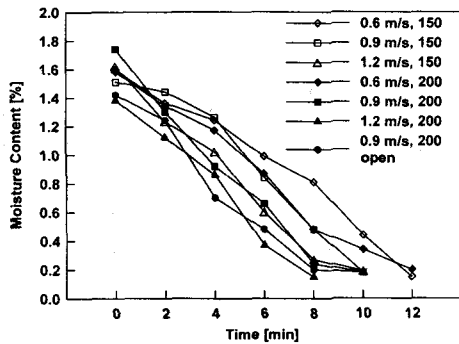


Fig. 11 Comparison of drying time for moisture content, heated air temperature and velocity

도 0.6m/s, 열풍온도가 200°C인 조건에서 목표함수율까지 도달하는데에는 약 12분이 소요되고, 열풍속도 1.2m/s, 열풍온도가 200°C인 조건에서는 약 8분 정도 걸리는 것으로 나타났으며 전체적으로 열풍온도가 높을수록, 열풍속도가 빠를수록 건조시간은 단축된다.

4. 결론

본 연구에서는 무중력 유동층 건조기에 대한 기초 및 개발 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험 결과 혼합기 및 건조제어부의 작동상태는 안정적이었고 구조상 문제점은 없었다.
- (2) 저함수율까지의 건조가 가능한 것으로 나타났다.
- (3) 전체적으로 피건조물별 열풍온도가 높을수록, 열풍속도가 빠를수록 건조시간은 단축된다.
- (4) 유로체계가 오픈시스템인 경우에도 밀폐시스템과 마찬가지로 혼합기내 온도분포 및 건조시간에는 큰 차이가 없었다..

후기

본 연구는 에너지관리공단에서 시행한 '99 에너지절약기술개발사업의 연구비로 수행되었으며 관계자 여러분과 (주)세지테크에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 통상산업부, 1997, “고효율 건조 시스템 개발을 위한 기획 연구”
- (2) 성진기, 박준택, 김명배, 2000, “산업용 건조기의 국내설치현황 및 기술개발 동향”, 제2회 건조기술 Workshop, 에너지기술연구회, pp. 3~25.
- (3) 박준택, “산업용 건조기의 선정”, 1996, 에너지관리, 제 236호, pp. 120~125
- (4) 박준택, “고효율 건조기의 최신 기술동향”, 1996, 에너지관리, 제 240호, pp. 140~147
- (5) 신기술편집부, 1994, “건조장치의 이론과 실제”
- (6) 임상근, 1998, “건조시스템 설계와 실무, 화학공업조사회
- (7) 김명배, “다종다양한 건조장치”, 1998, 에너지관리, 제 267호, pp. 118~121
- (8) 김충익, 1999, “외국의 건조기술 개발사례, 월간 화학장치, Vol. 7, No. 8, pp. 89~96
- (9) 김성식, 1999, “plant freshman을 위한 건조장치 개론” 월간 화학장치, Vol. 7, No. 4, pp. 69~97
- (10) 임상근, “건조시스템의 계산법”, 1998, 월간 화학장치, Vol. 6, No. 3, pp. 7~24
- (11) Forberg Co. 1992, “Forverg Drying System Test Report Summary” Vol. I