

〈기술논문〉

## 패들형 유동층 건조기 상품화를 위한 기초적 연구

금성민<sup>†</sup> · 이광철\* · 공민석\* · 유병훈\* · 이현구\*\* · 이창언\*\*\*

(2005년 12월 21일 접수, 2006년 4월 4일 심사완료)

### A Study on the Development and Performance Test of the Paddle-type Fluidized Dryer

Sung-Min Kum, Kwang-Cheol Lee, Min-Seog Kong,  
Byung-Hun Yoo, Hyun-Gu Lee and Chang-Eon Lee

**Key Words:** Dryer(건조기), 혼합기(Mixer), Paddle Mechanism(패들메커니즘), Moisture Content(함수율)

#### Abstract

The purpose of this study is to develop and commercialize a paddle-type fluidized dryer. The drying system, used in this study, was designed to attach a paddle-type fluidized mixer to a dryer. The drying system is based on the drying method to generate thermal contacts, as fluidized layers are generated due to a paddle mechanism. Accordingly, the time of drying is short and material damage is very little. Also, the drying system operates as a closer system, so it can be utilized not only for food and chemical materials, but also for environmental pollution materials. According to its performance test, the drying system is possible to dry low-moisture contents and its drying performance is outstanding. In conclusion, the drying system, designed for this study, is likely to have great potential for commercialization.

#### 1. 서론

열에 의해 피건조물중에 존재하는 수분을 증발 제거하는 건조는 열과 물질의 이동이 동시에 진행되는 열적 분리법의 하나이다. 특히 건조는 산업체의 제조공정이나 화공분야에서 많이 적용되는 대표적인 에너지 다소비 공정이기 때문에 열 사용설비의 효율적 관리측면에서 그 중요성<sup>(1-3)</sup>이 널리 인식되어 왔다.

건조공정에서는 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.<sup>(4)</sup>

국내에서 생산되고 있는 건조기는 크게 회전식, 열풍식 및 입자 부양식 등이 있으며 종류로는 약 20종에<sup>(1,2)</sup> 이르고 있다. 이들 중 통기식과 기류식 등이 국내 생산의 주류를 이루고 있으나 국내의 건조기 생산업체의 수준이나 재무구조가 매우 열악하여 자체 기술개발보다는 대부분 외국에서 설계도면을 도입하여 단순 모방하는 단계에 불과하다. 특히 수요자 측면에서 볼 때 고부가가치형 건조장치는 국산품의 신뢰성 등의 문제로 대부분 수입에 의존하고 있는데 지금까지 국내에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한라대학교 기계자동차공학부

E-mail : smkum@hit.halla.ac.kr

TEL : (033)760-1217 FAX : (033)760-1211

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* (주)세지테크

\*\*\* 회원, 인하대학교 기계공학과

서 생산되고 있는 건조기의 취약점은 다량의 수분을 함유한 원료의 수분함유량을 1%미만으로 정밀하게 건조시키는 건조기 설계기술이 취약하고,<sup>(5,6)</sup> 혼합기능이 없고 단순한 건조만 가능하며, 개방식이기 때문에 열풍 배기에 의한 환경유해물질이 대기로 방출 될 수도 있으며, 코팅 등과 같은 공정은 후처리 공정으로 처리해야하기 때문에 부수적인 설비가 필요하다

본 연구는 피건조물을 저함수율까지 균일하게 건조할 수 있고, 환경유해분진이 대기중으로 방출되지 않도록 건조공정을 밀폐시스템내에서 작동할 수 있으며, 소량 다품종 재료의 건조가 가능한 새로운 형태의 건조기를 개발하고 상품화하여 보급하기 위한 것이다.

본 연구에서 개발한 건조기는 기존 패들형 유동층 혼합기에 건조장치를 개발 장착한 것으로서 혼합기의 패들 메커니즘(paddle mechanism)에 의해 유동층이 형성될 때 피건조물이 열풍과 접촉함으로써 피건조물이 손상 없이 단시간에 건조가 진행 완료되며, 건조공정이 밀폐된 시스템 내에서 진행되므로 식품, 화학원료 뿐 아니라 환경오염물질 등을 건조시킬 때에도 적용될 수 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치의 구조

Fig. 1은 개발한 패들형 유동층 건조기의 개략도로서 크게 혼합기와 건조제어부로 나눌 수 있다.

건조과정을 살펴보면 혼합기의 패들 메커니즘에 의해 피건조물이 하부에서 상부로 퍼 올려지면서 유동층이 생겨 원료의 표면적이 극대화되고, 이때 혼합기의 밑부분에서 유입된 열풍이 피건조물과 접촉하면서 건조가 이루어진다.

건조기의 유로체계를 살펴보면 공기는 송풍기에 의해 히터로 보내지며 온도감지센서에 의해 초기 설정온도까지 가열된다. 가열된 열풍은 혼합기의 양쪽 유로를 통해 혼합기내부로 유입되며, 혼합기 내부로 유입된 열풍은 피건조물과 접촉한 후 백필터를 통과하면서 분진이 제거된다. 백필터를 통과한 열풍은 쿨러에 의해 습기가 제거된 후 다시 송풍기로 보내지며 밀폐사이클을 이루게 되는데 건조조건에 따라 오픈시스템을 겸용할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 2는 혼합기를 나타낸 것으로 작업용량(설탕 혹은 분말형태 재료의 수용가능량)은 120kg, 크기는 840×720×1,030mm이고, 재질은 스테인레스 304(5T)이며 단열을 위해 이중구조로 되어있고 그 사이에는 유리섬유(두께 50mm)를 넣었다.

원료는 혼합기의 윗부분에서 투입되며, 하부 경사면에 설계된 배출구를 통해 배출된다. 혼합기의 양쪽 측면에는 열풍을 혼합기의 밑부분으로부터 상부로 유동시키기 위한 가이드패널이 설치되어 있는데, 이 패널은 열풍 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.

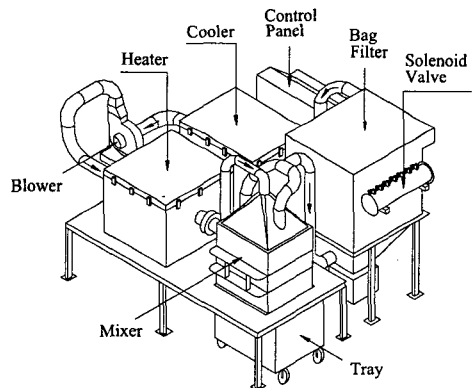


Fig. 1 Configuration of dryer

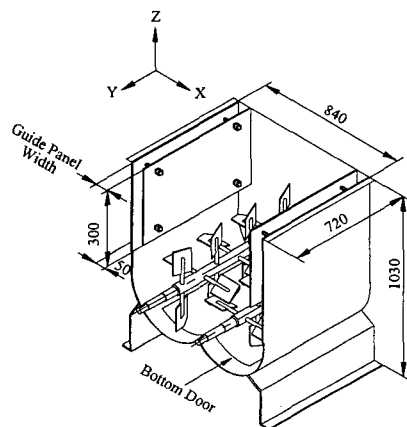


Fig. 2 Schematics of mixer

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 연구를 위해 제작한 혼합기는 (주)세지테크에서 노르웨이 "A"사의 혼합기를 기술 도입하여 지난 20여년동안 제작 판매하면서 수입 대체한 것으로 혼합성능에 대해서는 이미 그 우수성이 검증된바 있다.

공기가열을 위한 히터는 일반 산업용원료는 물론 고부가가치원료 및 소량 다품종원료 건조에 적합하도록 열원의 청정도, 온도조절의 용이성 등을 고려하여 전기히터를 선정<sup>(3,4)</sup>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 TETRATEC, 통기도 : 약  $2\text{cc}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ , 내열온도 :  $370^\circ\text{C}$ )를 선정하였는데 열풍의 통기를 원활하게 하기 위해 입체적 구조를 갖도록 원형의 필터케이지(직경 150mm, 높이 1,000mm)를 제작하고, 필터케이지 바깥부분에 Woven Fiberglass를 씌운 형태이다. 건조과정중 백필터에 붙은 분진을 털어주기 위해 펄스제트방식을 채택하였으며 4초 간격으로 고압공기가 제트분사관을 통해 백필터에 분사되도록 되어있다.

본 건조기의 장점중 하나는 피건조물의 물성과 건조조건에 따라 밀폐시스템과 개방시스템을 겸

용할 수 있다는 것이다. 특히 환경유해물질과 같은 재료를 건조할 경우 환경오염 원인이 될 수 있으므로 이때의 건조시스템은 밀폐시스템이 필수적이라 할 수 있다. 즉 밀폐시스템에서 운전될 경우 혼합기에서 배출된 열풍은 쿨러에 의해 습기가 제거된 후 다시 송풍기에 의해 히터로 보내지면서 가열되도록 설계되었기 때문에 용량 10RT의 쿨러를 백필터와 송풍기 입구사이에 설치하였다.

## 2.2 실험절차 및 방법

패들형 유동층 건조기는 크게 혼합기와 건조제어부로 나눌 수 있는데 혼합기는 (주)세지테크에서 기술도입 후 제작하고 있는 형식을 수정 적용하였으며, 건조제어부는 자체 설계한 후 혼합기와 결합하는 방법을 채택하였다.

건조시스템에서 혼합기로 유입되는 열풍은 혼합기 양쪽 측면 열풍유입구(가이드패널과 혼합기 벽사이)로부터 혼합기의 밑에서 위로 유동하는 형태로 설계되었다. 혼합기로 유입되는 열풍은 가급적 유입구 전 영역에서 균일한 속도와 온도 분포가 요구되며 이것은 건조성능에 중요한 변수이기 때문에 열풍유입구 폭 결정은 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 열풍유입구 폭을 결정하기 위해 열풍유입구 폭이 30, 40, 50mm로 변할 때 혼합기 내부에서의 속도 및 온도분포에 대한 수치해석을 수행하고, 기초실험 및 수치해석 결과를 비교하여 열풍유입구 최적 폭을 결정하였다. 건조기를 제작한 후에는 모래를 원료로 하여 작동상태 점검 및 예비실험을 통해 노르웨이 "A"사 건조기와 간접적인 성능비교를 수행하였으며, 최종적으로 모래와 설탕을 원료로 성능시험을 수행하였다.

열풍유입구 폭 결정 및 혼합기 내부 온도분포를 측정하기 위해 혼합기 안쪽 상 하부에 7개의 열전대(T type)를 부착하여 데이터로거(HP 3852A)에 연결하였으며, 혼합기의 입출구에는 습도계를 부착하였고, 피건조물의 함수율 측정은 건조기내에서 건조되는 과정중 2-5분 간격으로 혼합기의 샘플채취구를 통해 샘플을 채취한 후 모이스처 발란스(SARTORIUS, MA30)를 이용해 측정하였다.

실험은 기본적으로 밀폐시스템으로 수행하였으

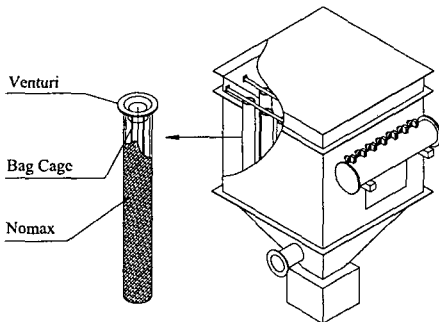


Fig. 3 Schematics of bag filter

며 특정조건에서는 오픈시스템에서도 실험을 수행하여 두 결과를 비교하였는데, 오픈시스템인 경우에는 백필터를 통과한 열풍이 대기중으로 배출되도록 하기 위해 백필터 출구의 유로를 대기에 개방시켰으며, 열풍이 유동하는 유로는 내부 직경이 150mm인 STS304 파이프를 사용하였다. 실험중 주요 측정치인 온도, 습도 및 유속의 불확실도는 1.86%, 1.94%, 8.39%이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 열풍유입구 폭의 결정

혼합기 내부에서의 열풍흐름과 온도분포는 건조기의 건조성능에 영향을 주는 중요한 변수로서 열풍은 혼합기 내벽과 가이드패널 사이로 유입되어 혼합기의 밑부분으로부터 상부로 유동하는 구조(Fig. 2 참조)로 되어있다.

본 연구에서는 열풍유입구 폭을 결정하기 위해 폭을 30, 40, 50mm로 변화시키면서 혼합기내부의 열풍 온도를 측정하였다. 또한 실험을 통해 혼합기 내부 전영역에서 속도 및 온도분포를 확인한다는 것은 실질적으로 불가능하기 때문에 기초 실험조건을 근거로 상용 프로그램인 Star-CD를 이용하여 혼합기 내부에서 속도와 온도분포에 대한 전반적인 경향을 알아보고 기초실험 결과와 비교하여 열풍유입구 폭을 결정하였다.

Fig. 4는 열풍유입구에서 열풍온도를 120°C, 혼합기입구 평균유속이 1.2m/s인 경우 열풍유입구 폭을 각각 30, 40, 50mm로 변화시키면서 시간경과에 따른 혼합기내부의 열풍 평균 온도분포를 나타낸 것으로, 시간이 경과함에 따라 혼합기내부의 온도증가 경향은 전체적으로 유사하지만 열풍유입구 폭이 클수록 최고온도(약 110°C)에 도달하는 시간은 단축되는 것으로 나타났다. 이것은 열풍유입구의 폭이 클 경우 작은 경우보다 상대적으로 열풍의 유입이 원활하고, 내부에서의 압력손실도 작게 걸리기 때문으로 판단된다

Fig. 5 및 6은 상용프로그램인 Star-CD를 이용하여 혼합기 내부에서 속도와 온도분포에 대한 경향을 나타낸 것으로 초기조건은 Fig. 4와 동일하다.

Fig. 5에서 열풍유입구 폭이 30mm일 때 혼합기 상부와 측면에서의 속도분포가 불균일한 반면 폭이 50mm일 때는 전체적으로 균일한 속도분포

가 나타나고 있다(40mm인 결과는 50mm보다 불균일하여 지면상 생략함).

Fig. 6은 혼합기내부 온도분포를 나타낸 것으로, 폭이 50mm일 때가 30mm일 때 보다 혼합기 양쪽과 중앙부분의 온도차이가 비교적 작게 나타난다.

따라서 Fig. 4의 혼합기내부 평균 열풍온도분포

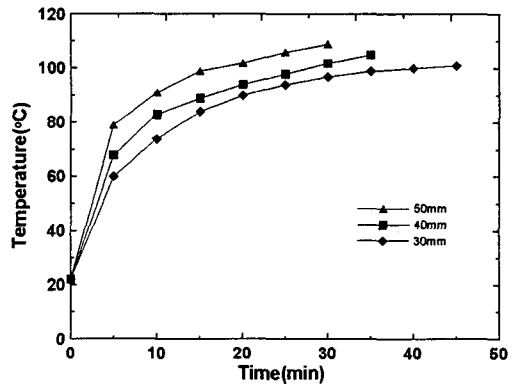
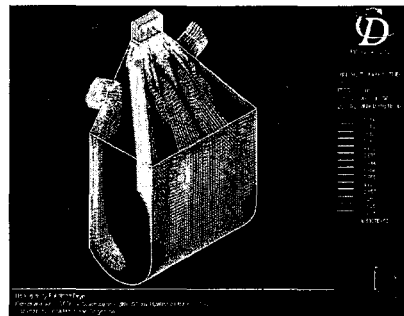
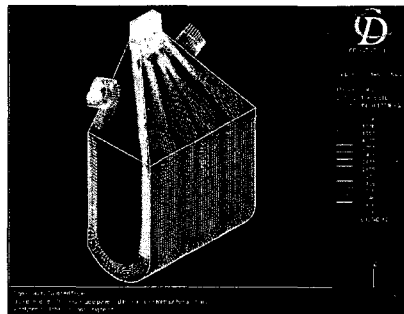


Fig. 4 Average temperature distribution in mixer

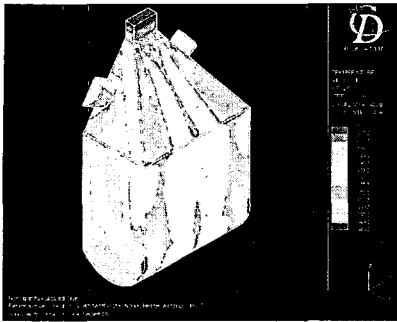


(a) Inlet width 30mm



(b) Inlet width 50mm

Fig. 5 Velocities distribution



(a) Inlet width 30mm



(b) Inlet width 50mm

Fig. 6 Temperature distribution

에 대한 실험결과와 연계해 볼 때 열풍유입구 폭은 50mm가 적절할 것으로 판단된다.

3.2 건조기의 예비실험

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

Fig. 7은 초기함수율이 6.1%인 모래(약 28kg)에 대해 함수율이 0.6%이하를 목표로, 히터 설정 온도 200°C, 열풍속도가 0.6m/s일 때 시간경과에 따른 혼합기내 피건조물의 온도와 함수율 변화를 나타낸 것이다. 실험수행시 대기온도는 약 13°C 이었고, 히터출구의 열풍온도가 초기 설정온도까지 도달하는 데는 약 10분 정도 소요된다. 혼합기 출구에서 배출되는 열풍온도는 건조시작후 증가하기 시작하여 약 100°C 까지 상승하며, 모래의 온도도 점차 증가하기 시작해 건조종료시에는 약 40°C로 나타났다. 피건조물의 함수율 변화는 5분 간격으로 측정하였는데 건조시작 후 거의 일정한

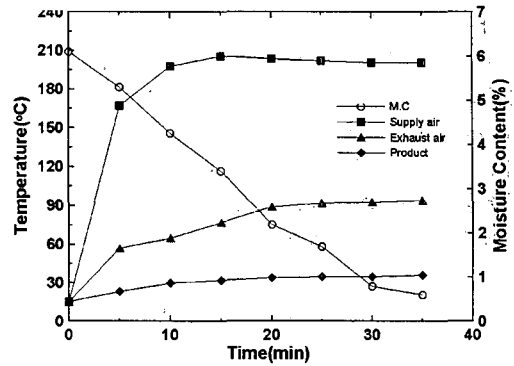


Fig. 7 Moisture content and temperature for drying time

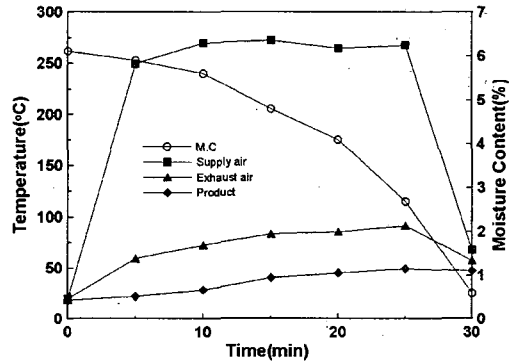


Fig. 8 Moisture content and temperature for drying time("A"Co. data)

비율로 감소하여 목표함수율인 0.6%까지 도달되는데에는 약 35분이 소요된다.

Fig. 8은 노르웨이 "A"사 건조기의 테크니컬 데이터를 입수하여 작성한 것이다. 본 실험조건과 비교하면 피건조물의 종류, 초기함수율, 목표함수율은 동일하고, 히터출구의 초기설정온도, 건조기의 용량은 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 도달하는 데는 약 30분 정도가 소요되는 것으로 나타났다.

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

3.3 건조기 성능실험

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

Fig. 9는 모래(120kg)에 대한 실험결과로서 초기함수율이 6.1%일 때 함수율 0.2%이하를 목표로, 히터 설정온도를 150, 200°C, 열풍 유속을 0.6, 0.9, 1.2m/s로 변화시킬때 각 조건에 대해 건조시간과 함수율변화를 나타낸 것으로 열풍온도가 동일할 때 열풍속도가 빠를수록 건조시간이 단축되는 것을 알 수 있다. 유로의 구성이 오픈시스템인 경우 밀폐시스템과 비교해 볼 때(열풍속도 : 0.9m/s, 열풍온도 : 200°C) 두가지 방식에 따른 건조성능에는 차이가 없었기 때문에 환경오

염물질 등과 같은 특수한 조건이 아니면 콜러의 사용이 필요없는 오픈시스템이 에너지절약면에서 유리할 것으로 생각된다.

Fig. 10은 설탕(72kg)에 대한 실험결과로서 초기함수율이 1.2%일 때 함수율 0.2%이하를 목표로, 히터 설정온도를 150, 200°C, 열풍 유속을 0.6, 0.9, 1.2m/s로 변화시킬때 각 조건에 대해 건조시간과 함수율변화를 나타낸 것으로 전체적으로 열풍온도가 높을수록, 열풍속도가 빠를수록 건조시간은 단축된다. 모래의 실험과 동일하게 유로의 구성이 오픈시스템인 경우 밀폐시스템과 비교해 볼 때(열풍속도 : 0.9m/s, 열풍온도 : 200°C) 두가지 방식에 따른 건조성능에는 차이가 없었다.

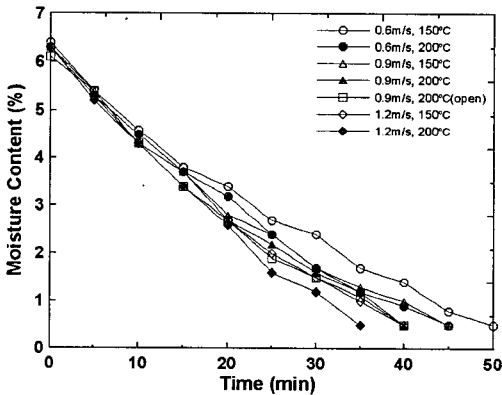


Fig. 9 Distribution of Moisture content for drying time(sand)

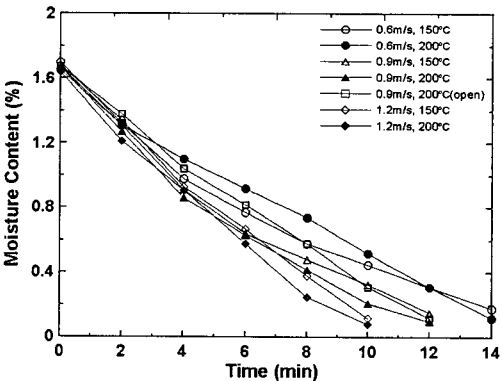


Fig. 10 Distribution of Moisture content for drying time(sugar)

4. 결론

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

- (1) 저함수율(0.2% 이하) 건조는 물론 균일한 건조가 가능하기 때문에 상품화 가치가 높을 것으로 예상된다.
- (2) 전체적으로 피건조물별 열풍온도가 높을수록, 열풍속도가 빠를수록 건조시간은 단축된다.
- (3) 유로체계가 오픈시스템인 경우에도 밀폐시스템과 마찬가지로 혼합기내 온도분포 및 건조시간에는 큰 차이가 없었다.
- (4) 실험 결과 혼합기 및 건조제어부의 작동상태는 안정적이었고 구조상 문제점은 없었지만 상품 보급화를 위해서는 충분한 내구성 테스트와 여러종류의 시료에 대한 데이터구축이 필요할 것으로 판단되어 코코아설탕 및 키토산소금 등과 같은 시료에 대한 실험을 완료하고 분석중이다.

참고문헌

- (1) Ministry of Commerce and Industry, 1977, "A Survey Report for the Development of Highly Efficient Drying System."
- (2) Sung J. K., Park J. T. and Kim M. B., 2000, "The Present Condition of Industrial Dryer and Technical Development Tendency(2th Drying Technology Workshop), Society for the Energy

- Research*, pp. 3~25.
- (3) Park J. T., 1996, "The Selection of Industrial Dryer," *J. of Energy Management*, Vol. 236, pp. 120~125.
- (4) Lim S. K., 1998, "Design and Practical Affairs of Drying system"
- (5) Kim C. I., 1999, Drying Technique and Development of the Overseas", *J. of Chemical Engineering and Equipment*, Vol. 7, pp. 89~96.
- (6) Kim M. B., 1998, A Diversity of Drying System, *J. of Energy Management*, Vol. 267, pp. 118~121.