

동결건조기의 에너지절약형 선반온도제어 시스템의 개발

남제풍 · 이승주
동국대학교 식품공학과

Development of Energy Saving Control System for Shelf Temperature of Freeze Dryer

Je Poong Nam and Seung Ju Lee

Department of food science and technology, Dongguk University

Abstract

A temperature control system was developed to save energy in freeze dryer. The objective part in the freeze dryer was a shelf with an electrical heater and cooling compressor. The shelf was a fluid circulation heat exchanger. The temperature control of the shelf is generally a feedback control by present and set values of the shelf temperature only, whereas in new control algorithm the circulating fluid temperature and fluid circulating speed were included as well. The control algorithm was based on a concept of refraining the heater and cooler from being in operation if unnecessary. Actuators in use were mainly thyristor for heater, relay for cooling compressor, inverter for fluid circulating pump, etc. Type of Interfaces were RS232C, and digital-analog converter and digital-output converter. Program language was Visual Basic 6.0. Finally, control performance by the new algorithm could be improved in terms of energy saving and accuracy.

Key words: temperature control, freeze dryer, shelf, heat exchanger

서 론

산업용 및 pilot용 동결건조기는 대표적으로 응축기, 진공펌프, 선반으로 구성되는데 작업자는 주로 선반의 온도를 피건조물의 종류 및 양에 따라 최적으로 조절한다(문준웅, 1987). 선반은 직접가열방식인 전기식 히터 또는 간접가열 및 냉각방식인 유체순환식의 경우 전기식 또는 스틱식 히터와 전기압축식 냉각기를 사용하는 것이 일반적이다(이병상, 1996; Oetjen, 1999). 히터는 가열의 세기로 조절되거나 냉각기는 on/off식으로 작동되고 더구나 선반은 금속 주물로 만들어져 그 온도 제어가 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

온도 목표치의 feedback제어에는 on/off, P, PI, PID 등의 방식이 적용되는데 제어 대상물의 환경에 따른 목표치의 수렴 여부와 fluctuation 에 따라 최적의 방식이 선택된다(Saguy, 1983; McFarlane, 1995). 동결건조기 선반제어의 경우 선반 주물의 큰 열용량에 따른 늦은 온도 변화로 인하여 선반 내부 유로를 흐르는 유체의 온도와는 큰 차이를 보일 수 있어서 단지 선반온도만을 측정값으로 하여 목표치와 비교하는 히터의 PID 및 냉각기의 on/off 방식 feedback 제어에는 개선의 여지가 있다(Fraade et al., 1983; Cameron, 1997; Oetjen, 1999).

따라서 본 연구에서는 동결건조기 유체순환식 선반의 feedback제어에 유체의 온도를 추가적으로 선반온도와 함께 고려하고 유체순환속도의 제어를 병행하여 히터와 냉각기의 가동을 최소화하면서 온도 제어 성능을 높일 수 있는 제어 시스템을 개발하였다.

Corresponding author: Seung Ju Lee, Professor, Department of food science and technology, Dongguk University, Seoul 100-715, Republic of Korea.
Phone: 02-2260-3372
E-mail: lseungju@dgu.edu

재료 및 방법

동결건조기의 구성

동결건조기(본디로 5070RR, (주)일신랩)는 유체의 온도에 의해 온도가 조절되는 유체순환식 선반과 선반이 부착된 건조실, 건조실내의 수증기를 응축시키는 응축기, 유체의 온도를 떨어뜨리는 냉각기 및 유체의 온도를 높이는 히터, 그리고 건조실 내부를 진공상태로 만들어 주는 진공펌프로 구성되었다. 히터는 전기식이고 냉각기는 압축식이며, 유체순환용 펌프가 설치되었다.

제어 하드웨어의 구성

동결건조기에 내장된 센서 입력 interface 카드, 컴퓨터로부터 신호 출력을 위한 digital to analog converter 및 각종 센서와 액츄에이터들을 연결하여 공정변수를 측정하고 시스템을 제어하도록 하드웨어를 구성하였다(Fig. 1).

온도 센서로 Thermistor(Pt100 Ω)를 선반 표면 및 유체의 유로에 부착하고 피건조물의 중앙에도 삽입하여 설치하였다. 온도 센서의 신호는 동결 건조기에 내장된 interface 보드의 whitstone bridge, 증폭기, RS232C 포트를 통하여 컴퓨터로 전달되었다.

선반의 히터 공급전력 및 냉각기 압축기의 모터 공급전력에 소요되는 에너지 측정 센서로 신호의 아날로그 출력이 가능한 전력계(Model 2433, Yokogawa, Japan)를 상기 interface 보드에서 whitstone bridge를 거치지 않고 직접 증폭기에 연결하였다.

선반 히터와 냉각기, 유체순환펌프의 회전속도를 제

어하기 위하여 컴퓨터에 DAC(digital-analog converter), DOC(digital-output converter) (AX5414, Axiom, Taiwan)를 연결하였다. AX5414보드를 설치할 때 dip 스위치를 사용하여 PC내의 다른 장치들과 port번지의 충돌이 일어나지 않도록 I/O port 번지(address)를 설정하였다. 히터에는 thyristor, 냉각기에는 relay, 유체순환펌프에는 inverter(VFD-M, Delta Electronics, Taiwan)를 연결하여 DAC와 DOC로부터 오는 신호에 의하여 작동되도록 하였다.

제어 소프트웨어

기존의 제어 방식은 선반의 온도만을 고려하여 선반내부 순환 유체를 가열하거나 냉각하였다. 그 결과 선반의 온도는 설정온도에서 벗어나는 범위가 크고 에너지 소비도 많게 된다. 이점을 개선하기 위하여 선반의 온도와 유체의 온도를 동시에 고려하고 유체순환속도까지도 조절하여 온도 제어의 정확성과 에너지 절약효과가 개선된 제어 알고리즘을 개발하였다.

컴퓨터는 IBM호환 기종의 개인용 컴퓨터(Pentium-100MHz, 32RAM)를 사용하였으며, 제어 및 사용자 인터페이스를 위한 프로그램은 Visual Basic(version 6.0)을 이용하여 작성하였다.

성능 평가

본 연구에서 개발한 제어 알고리즘과 비교 평가하기 위한 기존의 제어 방식으로는 선반온도를 측정변수로 한 히터의 PID제어, 냉각기의 on/off제어를 선택하였다. 먼저, 새로이 도입된 유체순환속도

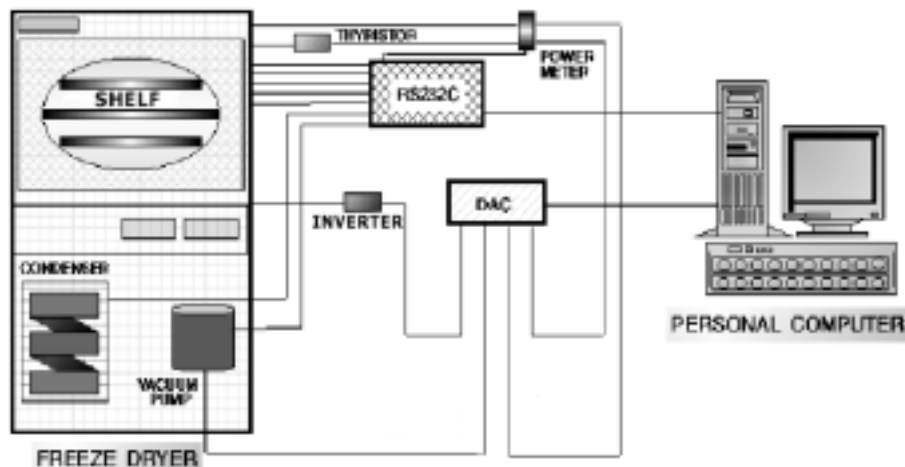


Fig. 1. Schematic representation of the energy saving control system for shelf temperature of freeze dryer.

의 효과를 보기 위하여 피건조물을 동결건조기에 넣지 않은 채로 유체순환속도에 따른 선반의 온도 변화를 실험하였다. 동결건조기는 항상 약 1시간 동안 예비 가동한 후, 실험을 실시하였다.

성능평가에 사용된 피건조물은 커피용액으로서 시중에서 구입 가능한 동일 종류의 인스턴트 커피를 구입, 물에 20%로 용해시켜 온도 센서가 연결된 300 mm × 340 mm × 30 mm의 stainless steel 용기에 담아 -45°C의 심온동결기에 10시간 예비동결 하였다. 시료가 -45°C의 심온동결기에서 동결건조기로 옮겨졌을 때 시료가 녹는 것을 방지하기 위해 선반 온도를 -5°C로 맞추었고, 건조실 내 압력이 진공상태에 도달하면 선반온도를 20°C 또는 35°C로 설정하여 새로운 알고리즘을 적용한 방식과 기존의 방식으로 제어하였다.

결과 및 고찰

제어 알고리즘

본 연구에서 개발된 feedback 제어 알고리즘의 핵심 내용은 불필요한 히터와 냉각기의 가동을 줄이고 유체순환속도의 조절을 추가한데 있었다(Table 1).

먼저 기존 방식을 보면 선반온도를 feedback 측정변수로 하여 히터는 PID제어, 냉각기는 on/off제어된다. PID제어의 특성상 현재온도가 설정온도보다 높은 경우에도 온도 수렴을 고려하여 히터가 약

하게라도 가동되는 경우가 일반적이다. 또한 냉각기는 단지 선반온도의 현재값에 따라 on/off되므로 그 가동 횟수가 클 수밖에 없게 되고 이는 에너지 소모량 증가 뿐아니라 냉각기 압축기의 특성상 모터에 상당한 무리를 일으켜 고장의 원인이 될 수 있다. 또한 선반온도만을 feedback에 고려하므로써 선반온도의 현재값은 설정값보다 낮지만 유체온도의 현재값은 설정값 보다 높은 경우, 또는 선반온도의 현재값은 설정값보다 높지만 유체온도의 현재값은 설정값보다 낮은 경우 등이 발생하여 히터 또는 냉각기의 불필요한 가동이 발생하게 된다.

이러한 기존 방식의 단점을 보완하기 위하여 유체온도를 feedback 변수에 추가하여 선반온도의 현재값은 설정값보다 낮지만 유체온도의 현재값이 설정값 보다 높을 경우라면 히터를 off하여 선반의 가열에 유체의 현열을 사용하도록 하며, 또는 선반온도의 현재값은 설정값보다 높지만 유체온도의 현재값이 설정값보다 낮을 때라면 냉각기를 off하여 역시 유체의 현열을 이용하여 선반 온도가 떨어지도록 하는 내용의 모든 경우를 Table 1과 같이 작성하였다. 또한 불필요한 히터 또는 냉각기의 가동을 중지시켜야 할 모든 경우에는 강제 대류에 의한 열 전달속도를 극대화하기 위하여 Table 1과 같이 유체순환속도가 최대로 가동되도록 하였다.

유체순환속도에 의한 열교환속도 효과

유체순환속도에 따른 열교환 속도를 보기 위하여 유체순환모터의 속도를 고속과 저속으로 하여 선반의 온도를 관찰하였다. 히터의 가동을 유지하며 선반온도의 상승을 관찰하였고, 냉각기의 가동을 유지하며 선반온도의 하강을 관찰하였다(Fig. 2, 3). 실험 결과 유체의 순환속도가 고속일 때 선반의 온도가 빨리 변화하는 것을 볼 수 있었다. 이로부터 유체의 순환 속도가 고속일수록 선반과 유체간의 열

Table 1. Comparison between the existing and the new algorithms for shelf temperature control of freeze dryer

Shelf temp.	Flow temp.	Heater		Cooler		Pump speed	
		I ¹⁾	II ²⁾	I	II	I	II
High ³⁾	High	PID	Off	On	On	High ⁵⁾	Low ⁶⁾
High	Low ⁴⁾	PID	Off	On	Off	High	High
Low	High	PID	Off	Off	Off	High	High
Low	Low	PID	On	Off	Off	High	Low
Equal	High	PID	Offs	Off	Off	High	Low
Equal	Low	PID	Off	Off	Off	High	Low

¹⁾Existing control algorithm.

²⁾New control algorithm for energy saving.

³⁾Means the measured temperature is higher than the set temperature.

⁴⁾Means the measured temperature is lower than the set temperature.

⁵⁾Pump speed at 60 Hz of inverter frequency.

⁶⁾Pump speed at 45 Hz of inverter frequency.

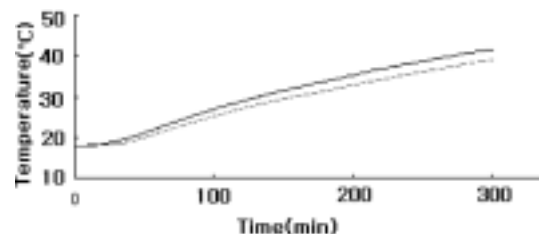


Fig. 2. Effect of fluid circulation speed inside shelf on shelf temperature in heating.

— : high speed, ...: low speed.

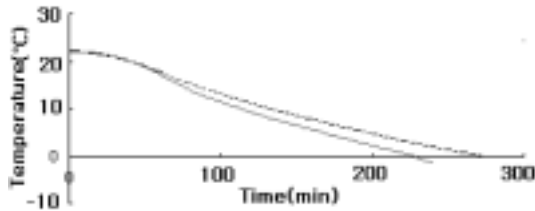


Fig. 3. Effect of fluid circulation speed inside shelf on shelf temperature in cooling.

— : low speed, ... : high speed.

교환 속도가 증가하는 사실을 확인하였다.

에너지 절감 효과

기존의 알고리즘과 새로운 알고리즘을 각각 적용하여 커피 용액을 동결건조하며 에너지를 측정 한 결과는 Fig. 4~7과 같았다. 기존 방식의 경우 에너지의 소모량이 새로운 방식에 비하여 크게 나타났다. 이는 새로운 알고리즘에 의하여 히터와 냉각기의 가동이 최대로 억제된 효과로 생각된다. 새로운 방식의 경우 에너지의 소모량이 계단식의 모양을 보이며 증가하였고 기존 방식의 경우 연속적인 양상으로 증가하였다. 이는 새로운 방식의 경우 근본적으로 on/off 제어를 근간으로 하는 반면 기존 방식

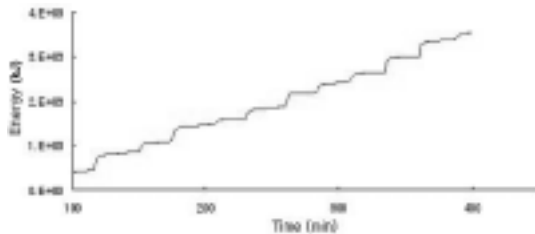


Fig. 4. Energy consumption during freeze drying of coffee solution at 20°C of shelf by new method.

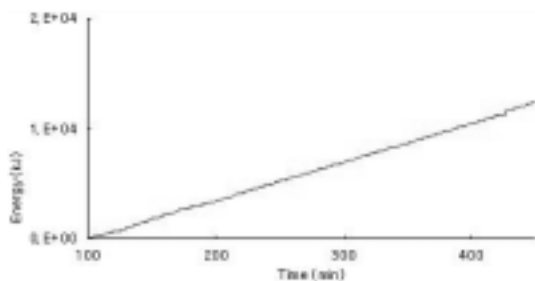


Fig. 5. Energy consumption during freeze drying of coffee solution at 20°C of shelf by existing method.

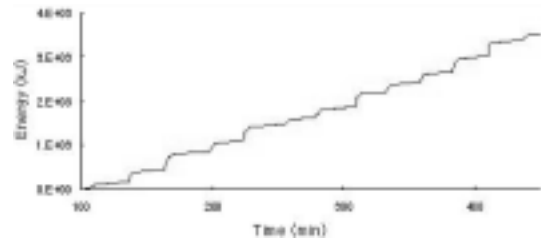


Fig. 6. Energy consumption during freeze drying of coffee solution at 35°C of shelf by new method.

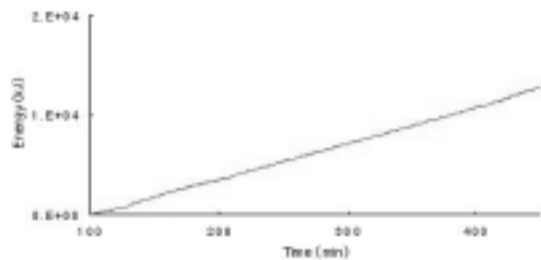


Fig. 7. Energy consumption during freeze drying of coffee solution at 35°C of shelf by existing method.

은 히터의 PID와 냉각기의 on/off에 의하기 때문으로 생각된다.

선반의 온도가 20°C와 35°C인 경우 에너지 소모량이 서로 비슷하게 측정되었다. 예상하기에 35°C의 소모 에너지가 더 크게 나타나지 않은 이유는 실험이 여름에 이루어져 오히려 20°C를 유지하는데 냉각기의 작동이 많았던 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 단열이 완벽한 동결건조기를 사용한다면 또 달라질 수 있을 것으로 추측할 수 있다.

온도 수렴 효과

Fig. 8~11에서와 같이 새로운 알고리즘을 적용한 선반제어 방식은 에너지 절약뿐만 아니라 설정온도의 수렴효과에 있어서도 향상된 효과를 보였다. 즉, 새로운 방식에서 초기 설정온도에 도달한 후 overshoot과 그 이후에 fluctuation이 더 작게 나타났다. 이러한 현상은 역시 불필요한 히터와 냉각기의 작동을 멈추고 가능한 한 유체의 에너지를 충분히 사용하도록 한 알고리즘에 의해서 나타난 결과라고 생각된다. 단, 설정온도에 도달하는 시간은 기존 방식이 약간 더 빠르게 보였다.

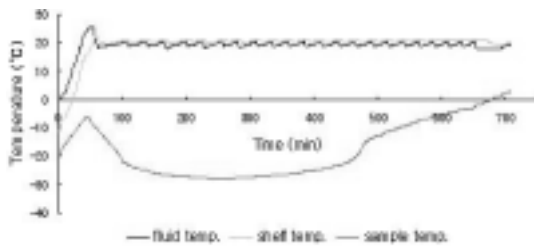


Fig. 8. Profile of process variables during freeze drying of coffee solution at 20°C of shelf by new method.

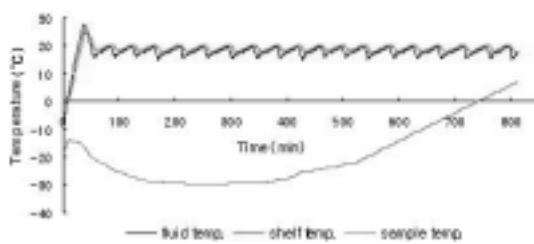


Fig. 9. Profile of process variables during freeze drying of coffee solution at 20°C of shelf by existing method.

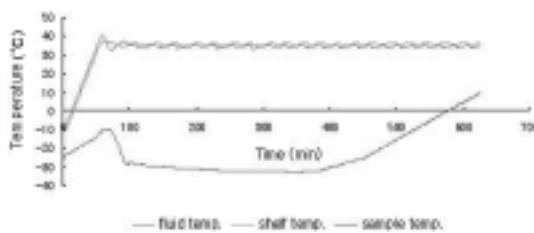


Fig. 10. Profile of process variables during freeze drying of coffee solution at 35°C of shelf by new method.

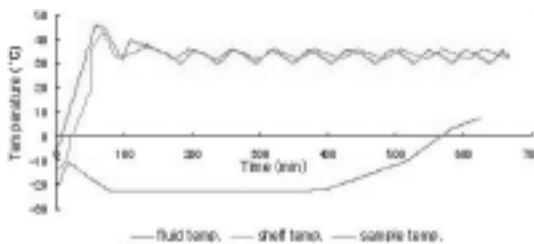


Fig. 11. Profile of process variables during freeze drying of coffee solution at 35°C of shelf by existing method.

요 약

동결건조기의 에너지 소모원으로 응축기, 선반의

가열 및 냉각기, 진공펌프를 들 수 있는데 본 연구에서는 유체순환식 선반의 가열 및 냉각기의 에너지 소모를 줄이고자 새로운 제어시스템을 개발하였다. 일반적인 유체순환식 선반의 온도제어방식은 선반온도를 측정하여 설정온도와의 편차에 의한 feedback 제어로 이루어지고 있으나, 본 제어방식에서는 선반온도 뿐만 아니라 순환유체의 온도도 측정 변수로 동시에 고려하고, 조절 대상으로 히터와 냉각기 뿐만 아니라 유체순환속도를 포함시켰다. 주된 제어 하드웨어로 히터에는 thyristor, 냉각기 compressor에는 relay, 순환펌프에는 inverter를 연결하였으며, 소프트웨어는 Visual Basic 6.0을 도구로 하여 프로그래밍 하였다. 데이터 수집은 동결건조기에 내장된 RS232C 통신보드, 제어 출력은 digital-analog, digital-output 변환기를 통하여 하였다. 성능 평가로부터 선반온도의 설정온도로의 정확성이 증가하며, 히터와 냉각기의 불필요한 가동이 억제되어 에너지 절약 효과가 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 동국대학교 논문게재연구비 지원으로 이루어진 결과로서 이에 감사드립니다.

문 헌

문준웅. 1987. 냉동건조기술의 발전과 식품산업에의 이용 현황. 식품과학 20(2): 38-43
 이병상. 1996. 동결건조기의 자동제어 및 동결건조 조건이 식품의 물리적 성질에 미치는 영향. 동국대학교 석사학위 논문
 Cameron, P. 1997. Good Pharmaceutical Freeze-Drying Practice. Interpharm Press, Inc., IL, USA
 Fraade, D.J., L.K. Hill and C.F. Riggs. 1983. Automation of pharmaceutical operations using programmable controllers. Advances in Instrumentation 38(2): 763-773
 McFarlane, I. 1995. Automatic Control of Food Manufacturing Processes. Blackie Academic & Professional, NY, USA
 Oetjen, G.W. 1999. Freeze-Drying. Wiley-VCH, NY, USA
 Saguy, I. 1983. Computer-Aided Techniques in Food Technology. Marcel Dekker, Inc., NY, USA