

식품동결건조기의 자동제어

이병상 · 이승주
동국대학교 식품공학과

Automatic Control of Food Freeze Dryer

Byung Sang Lee and Seung Ju Lee
Department of Food Science and Technology Dongguk University

Abstract

For automatic control of a freeze dryer of laboratory scale, a hardware was devised for data acquisition and control through RS-232C communication on-line, and a software for windows on personal computer was programmed such that even beginner without much experience of freeze drying can easily operate the freeze dryer. An artificial intelligence control method was developed to make samples dried at optimum condition of sublimation as the temperature of the samples was controlled during freeze drying according to an expert knowledge. Dried carrot showed high hydration capacity and good porous structure, whereas dried ham showed low hydration capacity and poor porous structure probably because of its fat-rich composition.

Key words: food freeze drying, automatic control, artificial intelligence

서 론

식품제조업의 생산성 향상, 품질 고급화, 노동력 절감을 위한 식품제조공정의 자동화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적인 자동제어의 과정으로 물질의 양, 온도, 압력, 농도 등과 같은 변수들을 계측하고, 모터나 펌프의 작동, 공정에 투입되는 물질의 온도, 질량, 밀도, 점도, 압력, pH, 습도 등의 변수를 제어한다. 단순히 비례제어, 적분/미분제어 등의 전통적인 제어방식 뿐만 아니라, 공정상태를 예측할 수 있는 계측변수와 제어변수의 함수관계를 적용하여 제어한다. 이와 같은 함수관계는 공정의 수학적모델링, 경험적 지식에 의한 전문가시스템, 퍼지전문가시스템, 회귀분석, 신경망이론 등에 의해 설정될 수 있다.

식품제조공정의 자동화에서 컴퓨터와 다양한 제어이론의 적용이 확대되고 있는 추세인데, 최(1985)는 PC를 이용하여 고추의 건조공정을 계측 제어하였으며, 원 등(1994)은 압출성형물의 두께를 실시간 측정하기 위해 영상처리 시스템을 이용하였으며, 이 등(1995)은 퍼지이론을 적용하여 압출성형공정을 제어

하는 모의실험을 수행하였고, 김 등(1995)은 제빵의 급기공정의 신경회로망 모형화에 관하여 연구하였다.

한편 동결건조는 식품, 의약, 제약 등의 원료를 동결 상태에서 승화와 탈수에 의해 물이나 용매류를 증기로 바뀌게 하는 건조방법으로서, 동결상태에서 건조가 이루어지므로 건조물의 열변성이 적고, 향기성분의 손실이 적으며, 다공성 구조가 보존되기 때문에 수화복원성이 우수하다. 반면에 낮은 열 및 물질전달속도 등의 이유로 건조속도가 늦고, 감압과 냉각장치를 요하므로 건조비용이 고가인 점이 큰 문제로 지적되고 있다(문, 1987).

동결건조는 제어변수가 많고 건조물의 물성을 실시간 측정하기 어렵기 때문에 최적의 건조방법과 소요 시간을 예측하는데 상당한 어려움이 따른다. Litchfield *et al.* (1981), Litchfield와 Liapis (1982), Liapis와 Marchello (1983), 박 등(1995) 등은 동결건조의 공정 변수와 물성, 열 및 물질전달 등의 관계를 단순화하는데 노력하였으나, 제어에 사용할 수 있는 수준의 모델링은 거의 불가능한 실정이다. 또한 동결건조 자체의 동작도 용이하지 않을 뿐 아니라 대부분의 조작이 사용자의 경험에 의해 수작업으로 이루어지고 있는 실정이며, PC를 이용한 동결건조시의 데이터 수집 및 제어에 관한 연구 또한 미진한 실정이다.

Corresponding author: Seung Ju Lee, Department of Food Science and Technology, Dongguk University, 26, Pil-Dong, 3-Ga, Chung-Ku, Seoul, 100-715 Korea

따라서 본 연구에서는 PC를 이용하여 실험실용 동결건조기의 작동을 계측 제어할 수 있는 하드웨어를 구축하고, 경험적 지식에 근거한 일종의 인공지능소프트웨어를 개발함으로써 무경험의 초보자라도 할지라도 동결건조기를 조작할 수 있도록 하였다. 또한 당근 및 햄을 자동으로 동결건조할 때 여러 계측제어변수의 변화와 최종 건조물의 물리적 성질을 검토하였다.

재료 및 방법

하드웨어의 구성

실험실용 동결건조기(본디로, (주)일신랩)는 가열/냉각용 선반, 응축기, 진공펌프로 구성되며, 승화열은 시료가 놓인 선반으로부터의 열전도와 그 위의 선반으로부터 열복사의 형태로 공급된다. 선반의 전기가열기와 냉각기, 응축기, 진공펌프를 PC로 구동하기 위하여 DAC 접속카드(AX5414, Axiom co., 대만)를 PC의 확장 슬롯에 장착하였다(Fig. 1). 전기가열기의 thyristor (TPR-2P-25MP, 한영전기)에는 4~20 mV의 전류를 인가하였으며, 냉각기, 응축기 및 진공펌프의 경우에는 0, 5 V를 출력하여 릴레이에 의해 on/off로 작동되도록 하였다.

온도와 압력의 측정용으로 Pt-100 센서와 진공 게이지를 사용하였다. 선반, 시료(#1, #2, #3), 건조실, 응축기의 온도 센서와 진공 게이지를 RS232C 통신용 보드(ISE-107, 108, 109, 일신랩)에 각각 연결하여, 이 보드로부터 각 계측값에 상응하는 디지털값들이 PC의 통신 포트에 직렬 전송되어 각 온도값 및 압력값이 산출되도록 하였다.

소프트웨어의 구성

Visual Basic (version4.0)을 이용하여 GUI (graphic

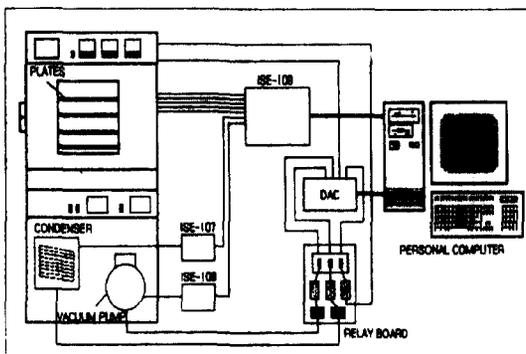


Fig. 1. Schematic diagram of automatic controlling system for freeze dryer.

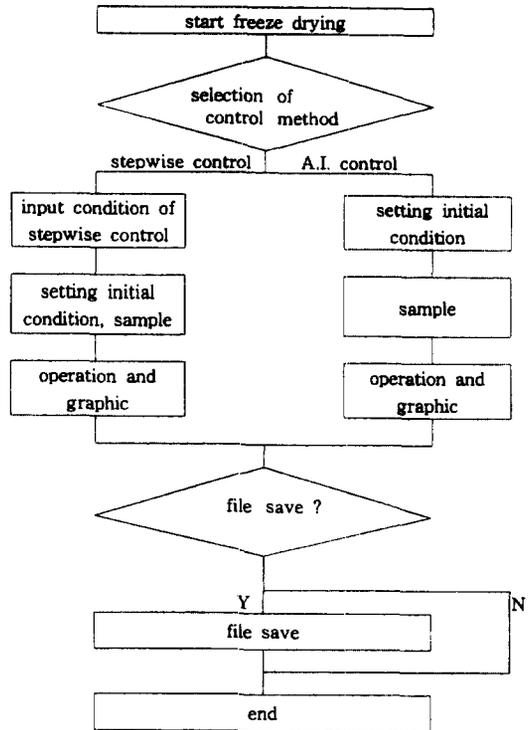


Fig. 2. Flow chart of computer program for automatic control of freeze dryer.

user interface) 형식의 프로그램을 작성하였다. 사용자는 단순히 PC화면에 나타난 지시에 따라 조작하면 되도록 복잡한 동결건조조작을 간소화하였다. 전체 프로그램의 구성은 Fig. 2와 같다.

사용자가 아무런 공정조건을 입력하지 않아도 자동으로 작동되는 '인공지능제어' 방식과 동결건조의 단계별 조건을 직접 입력해야 작동하는 '단순제어' 방식을 제시하였다. 작동중 온도, 진공도, 경과시간 등을 PC화면에 표와 그래프 형태로 나타내어 사용자가 동결건조 상황을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

제어 알고리즘

인공지능제어방식으로 시료의 온도를 시료 중심부의 온도로 정하여 다음과 같이 제어하였다. Fig. 3에서와 같이 제어가 시작되면 'a' 지점에서 먼저 응축기가 작동하고 선반의 온도가 떨어지기 시작해 -3°C에 도달한다('b'지점). 'b' 지점에서 화면의 지시에 따라 사용자가 시료 중심부에 온도센서를 꽂고 건조실 문을 닫은 후 '계속' 단추를 선택하면 진공펌프가 가동되기 시작한다. 진공도가 충분히 떨어진 'c' 지점 이후에는 선반의 가열기가 식 (1)에 의해 작동되며 냉각기는

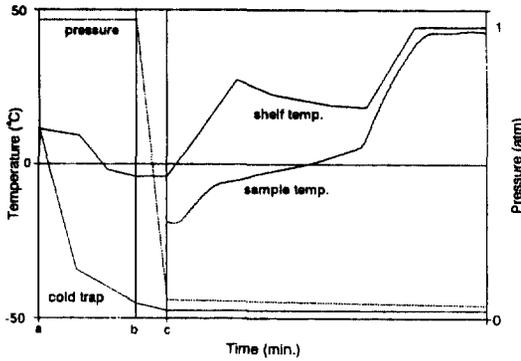


Fig. 3. Process of artificial intelligence control of freeze dryer.

Table 1. Cases of artificial intelligence control and their corresponding temperature of A-B and B-C boundaries¹⁾

Case	Boundary temperature (°C)	
	Ta (A-B)	Tb (B-C)
Case I	-5	5
Case II	0	10
Case III	-10	0

¹⁾A, B, C, Ta, Tb are shown in Fig. 6

off로 유지된다.

출력전류값=비례상수

$$\times (\text{시료온도의 목표값} - \text{시료온도의 현재값}) \quad (1)$$

여기서 출력전류값은 4~20 mA이며 시료온도의 목표값은 결과 및 고찰에서 언급되었다(Table 1). 가열기는 시료온도가 목표값에 도달한 후에는 꺼진 상태로 방치되다가 다음 목표값의 명령이 주어지면 다시 위와 같이 작동된다.

단순제어방식으로는 단계별로 선반의 온도를 다음과 같이 제어하였다. 먼저 사용자가 단계별 선반온도

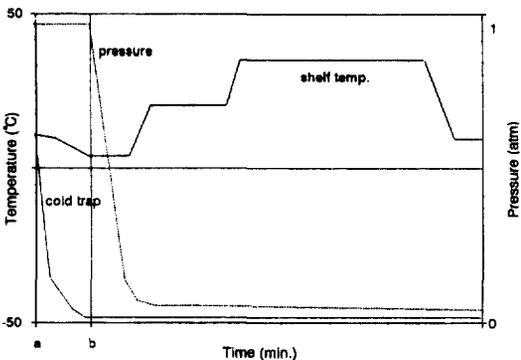


Fig. 4. Process of stepwise control of freeze dryer.

의 목표치와 그 유지시간을 입력하면 그 후에 자동으로 응축기가 작동을 시작하고 첫째 단계의 목표치에 선반온도가 도달하면(Fig. 4, 'b'지점) 지시에 따라 시료를 넣고 건조실 문을 닫은 후 '계속' 단추를 선택하면 진공펌프가 가동하기 시작한다. 그 후에는 단순히 단계별 입력된 목표치로 선반의 온도가 제어된다.

출력전류값=비례상수

$$\times (\text{선반온도의 목표값} - \text{선반온도의 현재값}) \quad (2)$$

동결건조

본 실험에 사용된 당근 및 햄은 전량을 일시에 같은 종류로 구입하여 사용하였다. 당근(수분함량 87.5%)은 5 mm 두께로 원판형으로 절단하고 -60°C에서 12시간 예비 동결하였으며, 센서를 삽입하기 위하여 충분히 동결된 당근을 꺼내어 드릴(직경 2.5 mm)로 미리 구멍을 뚫은 후 다시 동결하였다. 햄(수분함량 78.6%)도 위와 동일한 방법으로 준비하였다. 예비 동결된 시료를 인공지능방식으로 각각 9시간 동결건조하였다. 건조가 끝난 시료는 지퍼백에 밀봉한 후 상온에서 실리카겔과 함께 데시케이터에 보관하였다.

동결건조물의 물성

수분측정기(MB 200, Ohaus, USA)로 건조물의 수분함량을 측정하였으며, 수분활성측정기(TH200, Novasina, Swiss)로 25°C에서의 수분활성도를 측정하였다.

TA-XT2 texture analyzer (SMS, UK)를 사용하여 건조물의 경도를 측정하였다. Probe의 직경은 2 mm, 이동 속도는 0.5 mm/sec이었으며, 측정된 힘 중 최대 peak에서의 힘을 경도로 간주하였다.

건조물의 수분흡수도는 시료를 60°C의 증류수에 1분간 침지한 후 종이여과지로 표면수를 제거한 후 무게를 측정하여 건조물에 대한 흡수된 수분의 무게(물 g/건조물g)로 나타내었다.

입체현미경(JOIF, China)을 이용하여 약 200확대배율에서 건조물의 표면을 관찰하였고, 특정 부위를 사진 촬영하였다.

위의 반복 실험된 데이터의 평균값은 SAS를 이용하여 Duncan다중비교하였다.

결과 및 고찰

자동제어

동결건조에 대한 지식이나 경험이 부족한 사용자라 할지라도 PC에서 제어프로그램을 시작한 이후에는

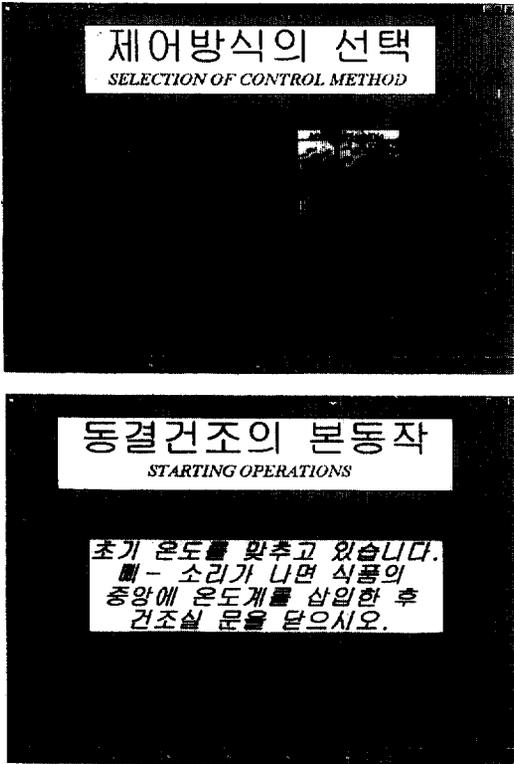


Fig. 5. Example of GUI screen on PC during automatic control of freeze dryer.

단순히 마우스를 사용하여 화면에 나타난 그림형식의 작동단추를 눌러주거나 메시지 박스에 지시되는 내용에 따라 프로그램을 사용할 수 있어 동결건조기를 쉽게 작동할 수 있었고 동결건조 중 각종 계측변수들의 변화를 그래프 및 표를 통하여 볼 수 있어 동결건조의 전 과정을 효율적으로 관찰할 수 있었다(Fig. 5). 데이터 수집은 1분 간격으로 행하였는데, 동결건조와 같이 계측변수들의 변화량이 크지 않은 상태에서는 충분한 수집 간격이라고 생각된다. 이 수집 간격은 프로그램상의 시간 지연 루프를 이용하여 행하였다. 동결건조가 끝난 후 계측변수들은 '파일저장' 화면에서 ASCII 파일로 저장함으로써 필요시 다른 스프레드 시트 (spread sheet) 프로그램을 이용하여 그래프를 그리거나 동결건조 중의 변화하는 계측변수들의 데이터를 사용자에게 제공하도록 하였다.

일반적으로 동결건조의 조건으로 선반의 온도를 제어하지만, 실제로 승화가 일어나 동결건조되는 것은 식품 자체이므로 선반의 온도보다는 시료 중심부의 온도를 궁극적인 제어대상으로 설정하였다. 실제 동결건조기를 사용할 때는 시료의 모양, 선반에 놓인 위

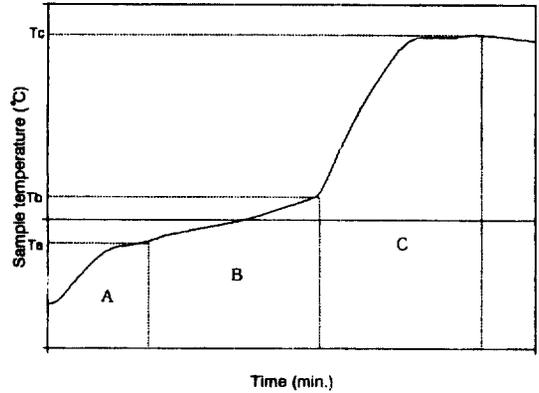


Fig. 6. Process of artificial intelligence control on sample temperature after time c in Fig. 3. A, B, C sections are defined according to Table 1.

치, 선반 간의 온도의 차이, 선반표면과 시료의 접촉상태, 열전도와 복사에 의한 열에너지 공급 등 그 조건이 매우 불균일하므로 단순히 가장 온도가 낮고 승화가 최후에 일어나는 시료 중심부의 온도를 승화가 양호한 상태로 유지되도록 제어하였다. 본 연구는 동결건조자동제어의 일차적인 시도로서 동결건조가 일어날 수 있는 다공성구조의 붕괴현상(collapse)은 고려하지 않고, 단지 수분의 승화조건에 맞추어 제어 알고리즘을 작성하였다.

동결건조시 진공도가 승화 조건에 미치는 영향을 고려를 한다면 진공도 역시 제어하는 것이 바람직하겠지만 실험실 수준의 소형 동결건조기의 경우 혹은 진공펌프의 성능이 우수할 경우에는 충분히 진공도가 유지되므로 본 연구에서 진공도는 제어 조건에서 제외하였다.

인공지능제어 방식으로 제어를 시작하면 자동으로 선반의 온도가 -3°C 로 맞춰지고 사용자가 시료를 삽입하고 건조실 문을 닫으면 자동으로 진공펌프가 작동되고 약 10분 후에 충분한 진공도에 도달하면 비로소 선반의 가열이 시작된다. 여기서 초기에 선반의 온도를 낮게 제어하는 이유는 대기압에서 예비 동결된 시료가 최초에 녹는 현상을 최대한 방지하기 위함이며, 충분히 진공펌프가 작동하여 일정한 수준의 진공도에 도달한 후부터 선반을 가열하기 시작하는 이유는 승화가 일어나는 진공도보다 높은 압력에서 시료가 높은 온도에 노출될 가능성을 최대한 억제하기 위함 이었다. 그 이후에 선반의 가열은 시료의 온도에 따라 크게 세 구간으로 나누어 제어하였다(Fig. 6). 첫째 구간(A)은 시료의 온도가 상당히 낮아 동결건조가 잘 일어나는 구간으로, 선반은 가열된다. 둘째 구간

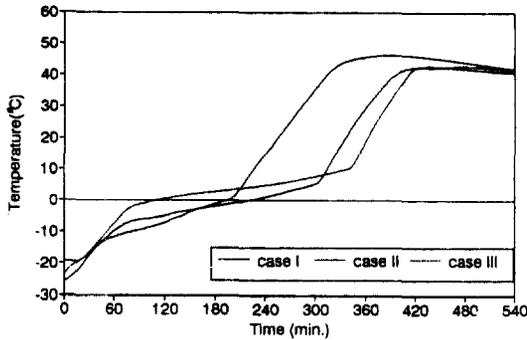


Fig. 7. Plot of sample temperature vs. drying time in freeze-drying carrot. Case I, II, III of artificial intelligence control are defined in Table 1.

(B)은 시료의 온도가 0°C에 가까운 구간으로서 가열에 따른 시료 내부의 압력상승에 의하여 얼음이 물로 상 변화될 가능성이 높아지므로 선반의 가열은 중지된다. 마지막 구간(C)은 0°C 이상의 구간으로 승화가 아닌 감압건조가 일어나므로 선반은 다시 가열되기 시작한다. 선반의 온도가 너무 높을 경우에는 건조물이 열변성될 수 있으므로 임의로 선반의 온도는 45°C까지만 가열되도록 하였다(박 등, 1995). A-B, B-C 구간의 경계를 세가지 case로 정하여 자동제어하였다 (Table 1). 당근을 동결건조할 때 case I의 경우 구간 A를 경유하는 시간은 119분 정도였고 구간 B를 경유하는 시간은 299분 정도였다(Fig. 7). Case II는 case I 과 그 경향이 비슷했지만 구간 B의 시간이 약간 더 길게 나타났다. 그러나 case III에서는 구간 A와 B를 경유하는 시간이 약 80분 정도로 전자의 경우에 비해 상대적으로 짧고 반면에 0°C 이상의 기간이 길어서 선반의 온도가 높은 온도에서 장시간 머무르는 것으로 나타났다. 이에 관한 햄의 데이터는 본 논문상에 생략하였지만 그 경향이 당근의 경우와 유사하였다. 선반의 온도는 구간 A에서 높게 상승하다가 구간 B에서는 하강하며 구간 C 이후에는 다시 상승하여 45°C에 도달한다. 이때 구간 B에서 선반의 가열기가 작동하지

않음에도 불구하고 시료의 온도는 상승하고 선반의 온도는 하강하는 이유는 시료와 선반의 온도 차이로부터 열전달이 일어나기 때문이다(Fig. 3).

단순제어 방식에서 사용자가 단계별로 선반의 온도와 그 유지 시간을 입력하여 제어를 시작하면 단순히 선반의 온도가 그 목표치로 제어되며 기타 공정변수는 화면상에 그래프 및 표의 형태로 계속된다. 다수의 사용자들로부터 기존의 동결건조기(본되로, (주)일신랩)의 제어패널을 사용하는 것보다 PC상에서 단순제어를 행하는 것이 훨씬 더 효과적이라고 평가되었다.

건조물의 물성

동결건조된 당근의 수분함량은 인공지능제어방식의 case I에서 가장 높았고 case III에서 가장 낮게 나타났다(Table 2), 이는 선반의 온도가 높게 머무르는 시간이 길어질수록 건조가 많이 일어나기 때문이다. 모든 case에서 당근과 햄의 수분함량은 13% 이하로 건조되었다. 일반적인 건조식품의 수분함량에 비하여 덜 건조된 상태였으나 당근의 수분활성도는 최고 약 0.218, 햄은 약 0.389로 나타나 미생물학적 부패 면에서 안전한 건조물임을 확인할 수 있었다.

동결건조된 당근의 경도는 case I에서 가장 낮았으며 case III에서 가장 높게 나타났는데 이는 수분함량이 감소함에 따라 경도가 증가하기 때문이다. 햄의 경우도 당근과 같은 경향을 보였다.

동결건조물의 수분흡수력은 즉석 편의식품의 개발 및 이유식의 제조에 있어서 중요한 품질요인이 될 수 있다. 당근의 경우 case I에서 가장 높은 수분흡수도를 나타냈는데, 이는 수분함량이 낮을수록 수분흡수력이 높아지는 일반적인 경향과 일치하지 않는다. 이처럼 동결건조물의 수분흡수력은 단순히 원래의 수분함량에 근거하지 않고 재수화시 수분을 흡수하는 통로가 되는 내부의 다공성 구조에 기인하는 것으로 추측된다. 햄의 경우에는 전반적으로 매우 낮은 수분흡수도를 보이고 있는데 이는 햄 조직 중에 존재하는 지방들

Table 2. Physical properties¹⁾ of freeze-dried carrot and ham

	Case	Moisture content (%)	Aw	Hydration	Hardness
Carrot	Case I	12.87±0.058 ^a	0.218±0.0006 ^a	2.60±0.079 ^a	596.33±25.067 ^a
	Case II	12.40±0.100 ^b	0.208±0.0010 ^b	2.26±0.123 ^b	707.73±46.730 ^{ab}
	Case III	10.47±0.058 ^c	0.168±0.0006 ^c	2.04±0.158 ^b	770.90±86.658 ^b
Ham	Case I	12.17±0.175 ^a	0.389±0.0061 ^a	0.10±0.010 ^a	3085.76±146.943 ^a
	Case II	11.47±0.208 ^b	0.342±0.0045 ^b	0.08±0.013 ^b	3353.24±117.342 ^a
	Case III	8.17±0.153 ^c	0.213±0.0117 ^c	0.13±0.010 ^c	4229.46±97.465 ^b

¹⁾Mean±S.D.: Means with the same letter are not significantly different (p<0.05) and replications of moisture content, Aw, hydration capacity and hardness are 3, 3, 7 and 7, respectively.

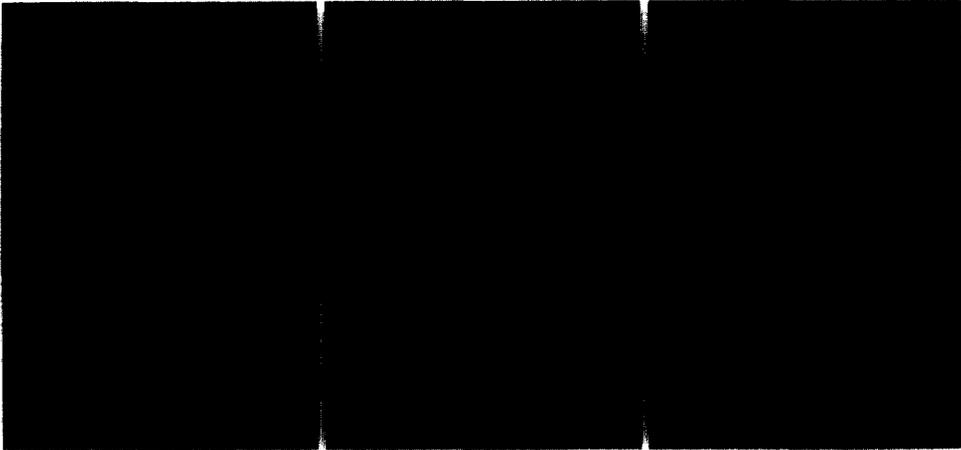


Fig. 8. Microstructure of carrot freeze-dried by case I(a), II(b), III(c) of artificial intelligence control defined in Table 1. Magnification is about 200 by stereoscope.

과 치밀한 육조직의 구조로 인하여 수분의 흡수가 방해되기 때문으로 생각된다.

입체현미경으로 건조물의 표면을 관찰한 결과 당근의 경우 case I에서 미세한 다공성 구조가 잘 형성된 것을 볼 수 있었고, case II, III에서는 비교적 커다란 구멍과 일부 파괴된 조직을 관찰할 수 있었다(Fig. 8). 이로부터 case I의 높은 수분흡수도는 그 미세구조에 근거함을 알 수 있었다. 여기서 case III에서 구간 B의 경계 온도를 제일 낮게 설정하였기 때문에 승화가 가장 많이 일어날 것처럼 보이나 구간 C에서는 시료의 온도가 다른 case보다 매우 높기 때문에 승화가 아닌 감압건조가 심하게 일어나서 case I보다 조직이 더 파괴되고 큰 구멍이 형성된 것으로 생각된다. 햄의 경우에는 그림을 본문에 나타내지는 않았지만 전반적으로 다공성 구조가 보이지 않았고 소수의 비교적 큰 구멍들이 관찰되었는데 이는 육류 단백질 섬유조직의 탄력성에 기인된 것으로 사료되나 앞으로 더 자세한 규명이 요구된다.

결과적으로 동결건조시 공정변수를 실시간 계측함으로써 동결건조분석에 필요한 데이터를 제공받을 수 있는 수단을 마련하였고, 전문가(경험적) 지식에 근거한 인공지능제어의 한 예를 제시하였다. 본 인공지능 제어방식의 적용은 비교적 양호한 동결건조식품을 얻는데 한정하였으며 앞으로 최상의 품질을 갖는 건조물을 얻기 위해서는 건조 중 다공성구조의 붕괴현상까지도 고려한 전문가 지식에 근거하여 인공지능 제어방식을 개발해야 할 것이다. 즉, 인공지능제어란 그 성능이 천차만별일 수 있으므로 인간의 지능으로 비유

한다면 앞으로 더 머리 좋고 만능으로 사용될 수 있는 제어방식을 개발해야 한다. 또한 공장 규모의 동결건조기를 위해서는 진공도 등의 더 많은 제어조건이 고려 되어 할 것이다.

요 약

실험실용 동결건조기를 PC로 자동제어할 수 있는 RS232C 통신에 의한 하드웨어 시스템을 구성하였고, 사용자가 쉽게 동결건조기를 작동할 수 있는 window 용 소프트웨어를 개발하였다. 동결건조기는 인공지능 제어와 단순제어방식으로 작동된다. 경험적 지식에 근거한 인공지능제어방식은 최초 선반의 온도, 진공 펌프의 작동시기, 선반 가열기의 작동시기, 세 구간에 따른 선반의 가열에 대한 제어를 주요 관점으로 하여 개발하였다. 여기서 세 구간이란 시료의 온도가 상당히 낮아 동결건조가 잘 되는 구간, 시료의 온도가 0°C 부근의 구간, 동결건조가 아닌 단순한 감압건조가 일어나는 0°C 이상의 구간을 의미한다. 단순제어는 선반의 온도제어로 이루어지도록 하였다. 인공지능제어로 건조한 당근 및 햄의 품질은 수분흡수도, 수분함량 및 수분활성도, 경도, 미세구조의 관찰의 관점에서 비교적 양호하게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 (주)일신랩의 지원을 받아 수행된 연구 결과의 일부로서 이에 감사드리는 바입니다.

참고문헌

- 김승찬, 조성인, 전재근. 1995. 제빵굽기공정의 신경회로망 모형화. *한국식품과학회지* **27(4)**: 525-531.
- 문준용. 1987. 냉동건조기술의 발전과 식품산업에의 이용현황. *식품과학* **20(2)**: 38-43.
- 박노현, 김병삼, 배신철. 1993. 당근의 동결건조에서 승화건조시간 예측연구. *한국식품과학회지* **25(4)**: 313-320.
- 원치선, 이승주, 한억, 목철균. 1994. 압출성형물의 두께 측정을 위한 In-line 영상처리 시스템. *한국식품과학회지* **26(4)**: 448-452.
- 이승주, 원치선, 한억, 목철균, 이병상. 1995. 압출성형공정의 퍼지제어기의 모의실험. *한국식품과학회지* **27(2)**: 164-169.
- 최부들. 1985. 컴퓨터를 이용한 식품건조 공정변수의 자동수집 및 제어. 서울대학교 박사학위 논문.
- Litchfield, R.J., A.I. Liapis and F.A. Farhadpour. 1981. Cycled pressure and near-optimal pressure policies for a freeze dryer. *J. of Food Technology*, **16(6)**: 637-646.
- Litchfield, R.J. and A.I. Liapis. 1982. Optimal control of a freeze dryer. *Chemical Engineering Science*, **34(1)**: 45-55.
- Liapis, A.I. and J.M. Marchello. 1983. Freeze drying of a frozen liquid in a phial. *Drying Technology*, **2(2)**: 203-217.