

# 고추의 乾燥過程 最適化에 關한 研究

## Optimization for drying process of red pepper

趙 鏞 珍\*, 高 學 均\*\* 朴 在 福\*

Y. J. Cho\* H. K. Koh\*\* J. B. Park\*

### Summary

This study was performed to find out optimum drying conditions of red pepper to minimize energy consumption and drying time, respectively, under the quality constraint using Box's complex method.

The results from this study are summarized as follows.

1. From the optimization results for the drying process, energy consumption was minimized at the drying condition to minimize drying time.
2. The optimization results according to drying method was found out to be greatly affected by the quality constraint of red pepper. Especially, the turning point to change drying stage was a very important factor in the drying method with two stages.

### 1. 緒 論

고추는 乾燥過程을 거치는 동안 많은 에너지와 시간이 소요될 뿐만 아니라 품질도 저하된다. 그동안 고추 건조에 관하여 우수한 품질을 유지함과 동시에 乾燥時間과 에너지를 절감할 수 있는 방안을 모색하는 데 많은 노력을 기울여왔다. 그러한 노력에도 불구하고 아직 고추의 乾燥過程을 합리적으로 관리할 수 있는 乾燥條件은 제대로 제시되어 있지 않은 형편이다.

고추의 乾燥過程에 가장 적합한 乾燥條件을 규명하는 데 이용될 수 있는 방법은 여러가지가

있을 수 있다. 가장 중요하면서 기본이 되는 방법은 실험에 의한 방법이다. 그러나 실험적 방법은 수많은 시행착오를 각오해야 하기 때문에 많은 노력과 시간이 요구된다. 한편, 모의실험(simulation)에 의한 방법은 건조 모형을 이용하여 비교적 적은 노력과 시간을 들여서 수행할 수 있지만 효율적인 실험전략이 주어지지 않으면 시행착오법에 의존할 수 밖에 없게 된다.

이와 같이 실험에 의한 방법이나 모의실험 방법에서 나타날 수 있는 시행착오를 배제하여 보다 효율적으로 최적의 乾燥條件을 규명하기 위하여 최적화 방법을 이용할 수 있다. 最適化 방법은 건조 모형을 目的函數와 制限條件으로 나

\* 韓國食品開發研究院  
\*\* 서울大學校 農工學科

타내어 주어진 조건하에서 目的函數의 최대치 또는 최소치를 얻을 수 있는 조건을 찾는 것이다. 물론 여기서도 건조 모형이 건조 현상을 정확히 묘사할 수 있어야 하는 전제 조건을 만족해야 한다.

그런데, 최적화의 대상이 되는 문제가 다양한 만큼이나 최적화를 수행하는 방법도 다양하기 때문에 문제의 유형을 정확히 분류하고 그 유형에 가장 적합한 最適化 方法을 선택 또는 설계하는 것은 최적화를 성공적으로 수행하기 위하여 매우 중요하다. 최적의 乾燥條件을 규명하는데 最適化 方法이 효율적으로 이용 될 수 있지만 적합한 最適化 方法이 도입되지 않으면 결과가 왜곡될 수 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 특정한 건조시스템을 고려하기 전의 선행 연구로서 대류건조법에 의해 고추를 건조할 때 소요에너지와 건조소요시간에 대한 현상을 규명함으로써 고추의 乾燥過程을 합리적으로 관리할 수 있는 최적의 乾燥條件을 찾고자 고추의 乾燥過程에서 나타나는 현상들을 대상으로 최적화 목표를 설정하고, 그에 따른 目的函數 및 制限條件을 수립한 다음에, 최적화 프로그램을 개발한 후 고추의 건조과정시 소요되는 에너지 및 건조시간에 대해서 최적화를 수행하고 최적 건조조건을 찾고자 하였다.

## 2. 文獻概要

最適化(optimization)란 주어진 상황하에서 최선의 결과를 얻고자 하는 행위로서 문제를 함수의 형태로 표시했을 때 그 함수의 최소치 또는 최대치를 얻을 수 있는 조건을 찾는 과정으로 정의될 수 있다. 最適化의 개념에 내포되어 있는 바와 같이 最適化에는 두 가지 목표가 포함되어 있다. 하나는 최적치(optimum value)를 찾는 것이고 다른 하나는 최적치에 도달할 수 있는 최선의 과정을 획득하는 것이다.

그동안 최적화 문제에 사용된 최적화 기법은 수학적 프로그래밍 기법(mathematical programming technique), 確率的 實驗 技法(stochastic process technique), 圖解的 方法(graphical

method), 人工知能的 方法(artificial intelligence method) 등으로 대별될 수 있다.

Mishkin 등(1982)은 수분, 섬유소 및 아스코르브산으로 구성된 임의의 물질의 수학적 模型을 이용하여 乾燥過程時 아스코르브산의 잔존량을 최대화하는 온도 조건을 찾고자 Pontryagin의 continuous maximum principle과 Box의 complex method를 각각 적용한 결과 最適化의 응용이 가능하다고 보고하였다. 특히 complex method는 공정 개선을 위해 대단히 유용한 수단일 수 있다고 추천하였다.

Mishkin 등(1983)은 감자를 건조할 때 갈변을 최소화하는 최적 건조조건을 찾고자 complex method를 근간으로 한 모의실험 및 最適化(simulation-optimization)를 사용한 결과 감자의 함수율이 0.1~0.2 g/g-solid의 범위에 도달할 때 건조 온도를 낮추어야 한다고 하였다. 이때 국소함수율과 평균함수율을 각각 기준으로 하여 건조 온도를 설정하여 비교한 두 결과는 매우 잘 일치하였다고 보고하였다.

Ouhab와 Le Pourhiet(1985)는 곡물의 乾燥過程을 5단계 乾燥過程으로 상사시켜 規模化하고 불연속 동적 계획법(discrete dynamic programming)을 이용하여 最適化를 수행한 결과 단계별 최적 건조 온도를 찾을 수 있었다고 보고하였다. 이때 건조시간과 에너지 소비에 관하여 표시한 비용함수를 목적함수로 채택하고, 한편으로 동적 계획법에는 건조시간에 관한 항을 0으로 두고 총건조시간을 몇 가지로 가정한 상황하에서 에너지함수를 목적함수로 사용한 다음, 건조시간별 최적 에너지함수를 그림으로 나타내어 최종적으로 최적 건조온도를 찾는 방법을 사용하였다.

李(1987)는 무우 절편을 회분식 캐비닛건조기와 연속식 터널건조기를 이용하여 건조할 때 아스코르브산의 잔존량과 갈변도를 제한조건으로 설정하고 에너지소비를 최소화할 수 있는 건조 공정의 最適化에 Box의 complex method와 Pontryagin의 minimum principle을 응용한 결과 회분식 건조에서는 열풍온도, 열풍의 순환을 및 풍량을 시간에 대해서 동적으로 변화시킴으로써

시간에 대해서 일정한 건조 조건을 갖는 경우에 비하여 에너지 소비를 6~10% 절감할 수 있었다고 보고하였다.

李와朴(1989)은 고추를 건조할 때 품질을最適化하기 위한 최적 건조조건을 찾고자 Box의 complex method를 이용한 결과 2단계 건조조건으로 상대습도는 약 10%의 하한값을 취하면서 1단계의 건조온도는 50°C의 하한 온도를 취하고 2단계의 건조온도를 고온으로 상승시켰을 때 최적 품질을 얻을 수 있었다고 보고하였다. 이때 카로테노이드의 잔존량과 갈변도를 품질의 평가요인으로 각각 설정하여 비교한 결과 두 경우의 최적 건조조건은 거의 일치하였다고 보고하였다.

李等(1989)은 고추 건조기의 최적 운전조건을 찾고자 카로테노이드 잔존량을 제한조건으로 설정하고 에너지 소비를 목적함수로 하여 Box의 complex method를 이용한 결과 풍량을 일정하게 고정하고 열풍의 온도와 재순환율을 2단계로 변화시키는 건조 방식이 에너지 소비를 더욱 감소시킬 수 있었다고 하였다. 이러한 2단계 건조 방식에서 단계의 이동은 전체 건조시간의 약 1/3이 경과하였을 때 이루어져야 한다고 보고하였다.

### 3. 目的函數 및 數學的 模型

#### 가. 目的函數 및 制限條件

最適化 目標에 성공적으로 도달하기 위해서는 최적화 문제를 정형화 하였을 때 目的函數 및 制限條件이 명확히 정의되어 있어야 한다. 첫번째 최적화 목표로서 특정한 수준의 품질을 갖는 건고추를 생산하고자 할 때 소요에너지를 최소화하고, 그에 따른 制御變數를 찾기 위한 目的函數 및 制限條件을 정의하며, 두번째 최적화 목표로서 건조소요시간을 최소화하고, 그에 따른 制御變數를 찾기 위한 目的函數 및 制限條件을 정의하고자 한다.

한편, 段階別 乾燥法에서 2段階 및 3段階 乾燥法의 경우에는 단계의 전환이 요구되는데 단계

의 전환에 대해서 고찰하면 다음과 같다.

3段階 乾燥法: 3段階 乾燥法에서는 고추를 초기함수율부터 최종함수율까지 건조하는 동안 2회의 건조 조건 전환이 요구되며, 전환점은 고추의 건조특성으로부터 주어져야 한다. 그런데, 고추의 건조특성을 고찰한 바에 의하면, 시간에 따른 건조율을 분석하여 전환점을 찾는 방법은 전환점을 명확하게 규정하기가 어려울 뿐만 아니라 乾燥條件에 따라 전환점이 유동적으로 나타날 수 있기 때문에 실현성이 결여될 우려가 있다. 따라서, 본 연구에서는 임의의 乾燥條件에서도 고정적인 전환점이 될 수 있으며 전환점의 규정이 비교적 명확한 증발잠열 특성과 Newton 방정식의 가열상수 특성을 고려하여 결정된 바, 趙(1991)의 분석 결과에 근거하여 고추의 함수율이 50 및 250% (db) 일 때, 그 함수율을 각각 건조조건 전환점으로 취하였다.

2段階 乾燥法: 2段階 乾燥法에서는 3段階 乾燥法에서 고려한 전환점 중에서 하나를 선택적으로 취하였다.

1段階 乾燥法: 초기함수율부터 최종함수율까지 乾燥條件의 전환이 주어지지 않는다.

따라서, 目的函數 및 制限條件을 3段階 乾燥法을 대상으로 수식으로 표시하면 (1)식에서부터 (6)식까지와 같다. 한편, 1段階 및 2段階 乾燥法의 경우에도 단계의 전환을 제외하면 3段階 乾燥法의 경우와 유사하게 표시할 수 있다.

3段階 乾燥法에서의 目的函數:

For  $M_{m0} \rightarrow M_{m1} \rightarrow M_{m2} \rightarrow M_{mf}$ ,

$$E_t = H(T_{a0}, T_{a1}, T_{a2}, RH_0, RH_1, RH_2) \dots (1)$$

$$\text{or } t_t = F(T_{a0}, T_{a1}, T_{a2}, RH_0, RH_1, RH_2) \dots (2)$$

制限條件:

㉠ 明示的 制限條件

$$T_{a1} \leq T_{a0}, T_{a1}, T_{a2}, \leq T_{a0}, \dots (3)$$

$$RH_1 \leq RH_0, RH_1, RH_2, \leq RH_{0w}, \dots (4)$$

㉡ 暗示的 制限條件

$$C_t \leq C \leq C_w, \dots (5)$$

$$C = G(T_m, M_m) \dots (6)$$

t: 건조소요시간

E: 고추의 온도 상승 및 수분 증발에 소요되는 에너지의 합

C : 고추의 카로테노이드 함량  
 M<sub>m</sub> : 고추의 함수율  
 T<sub>m</sub> : 고추의 온도  
 T<sub>a</sub> : 공기의 온도  
 RH : 공기의 상대습도

T<sub>m</sub> : 고추의 온도 (°C)  
 RH : 공기의 상대습도 (dec.)  
 m<sub>b</sub> : 고추의 乾物重量 (g)

Subscript 0 : 최초의 상태

- 1 : 첫번째 乾燥條件 전환점 이후의 상태
- 2 : 두번째 乾燥條件 전환점 이후의 상태
- f : 최종 상태
- 1 : 制限條件의 하한값
- u : 制限條件의 상한값

여기서, (5)식과 같이 표시한 暗示的 制限條件에서 상한값은 고추의 초기 카로테노이드 함량을 의미하고 하한값은 특정한 乾燥條件에서 건조된 고추의 최종 카로테노이드 함량을 의미한다.

나. 數學的 模型

(1), (2) 및 (6)식으로 표시된 함수의 값을 결정하기 위하여 趙(1991)가 제시한 고추의 함수율 모형 및 온도 모형, 그리고 Lee와 Kim(1989)이 제시한 고추의 카로테노이드 모형을 이용하였으며, 각각의 수학적 모형은 다음과 같다.

i) 고추의 함수율 모형

$$\frac{dM_m}{dt} = - \frac{3D_e}{d^2} (M_m - M_e) \dots\dots\dots (7)$$

$$D_e = A M_m^B \dots\dots\dots (7-1)$$

$$A = 0.000041492 (1 - RH) \exp(0.0405465 T_m) \dots\dots\dots (7-2)$$

$$B = 0.295258 + 0.00738769 T_m \dots\dots\dots (7-3)$$

$$d = 0.01898 + 0.02684 M_m - 0.002270 \dots\dots\dots (7-4)$$

$$M_m^2 + 0.01186 M_m m_b \dots\dots\dots (7-4)$$

M<sub>m</sub> : 고추의 함수율 (dec. db)  
 M<sub>e</sub> : 平衡含水率 (dec. db)  
 t : 건조시간 (hr)

D<sub>e</sub> : 고추의 有效水分擴散係數 (cm<sup>2</sup>/hr)

A, B : 계수

d : 고추의 果皮두께 (cm)

ii) 고추의 온도 모형

$$T_m = T_a + (T_{m0} - T_a) \exp(-\alpha t) + \frac{m_b L}{h A_s} \frac{dM_m}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

$$\alpha = \frac{h A_s}{m_b(1 + M_m) C_m} \dots\dots\dots (8-1)$$

$$h = 24.914 \dots\dots\dots (8-2)$$

$$A_s = 3.74 + 23.62m_b - 1.76m_b^2 \dots\dots\dots (8-3)$$

$$C_m = (1.441 + 4.187 M_m) / (1 + M_m) \dots\dots\dots (8-4)$$

$$\frac{L}{L'} = 1 + (4.6033 - 2.1080/m_b) \exp(-16.78 M_m) \dots\dots\dots (8-5)$$

T<sub>m</sub> : 고추의 온도 (°C)  
 T<sub>m0</sub> : 고추의 초기온도 (°C)  
 T<sub>a</sub> : 공기의 온도 (°C)  
 t : 시간 (hr)  
 h : 대류열전달계수 (J/cm<sup>2</sup> °C hr)  
 A<sub>s</sub> : 고추의 表面積 (cm<sup>2</sup>/a dry pepper)  
 C<sub>m</sub> : 고추의 熱容量 (J/g °C)  
 L : 고추내 수분의 蒸發潛熱 (J/g)  
 L' : 자유수의 蒸發潛熱 (J/g)  
 m<sub>b</sub> : 고추의 乾物重量 (g)  
 M<sub>m</sub> : 고추의 함수율 (dec. db)

iii) 고추의 카로테노이드함량 모형

$$\frac{dC}{dt} = -kC \dots\dots\dots (9)$$

$$k = k_o \exp(-E_{ac}/R T_m) \dots\dots\dots (9-1)$$

$$\ln(k_o) = 4.1879 - 1.9466 M_m + 3.2619 M_m^2 \dots\dots\dots (9-2)$$

$$E_{ac} = 7698.3 - 692.58 M_m + 1911.2 M_m^2 \dots\dots\dots (9-3)$$

C : 카로테노이드 함량(mg/100g dry solid)

t : 시간(min)

- k : 반응상수(1/min)
- $k_0$  : 카로테노이드 파괴의 빈도 요인(1/min)
- $E_{ac}$  : 카로테노이드 파괴의 활성화에너지 (cal/mol)
- R : 기체상수(1.987 cal/mol K)
- $T_m$  : 고추의 온도(°C)
- $M_m$  : 고추의 평균함수율(g water/g dry solid)

#### 4. 最適化 프로그램 開發

##### 가. 目的函數의 最小치 탐색 알고리즘

본 연구에서 最適化의 대상이 되는 문제의 유형을 살펴 보면, 目的函數는 비선형 함수의 형태를 가지고 있고, 制限條件은 부등식의 관계식으로 주어지는 明示的 制限條件과 暗示的 制限條

件 모두를 포함하고 있다. 또한 暗示的 制限條件은 비선형의 함수로서 주어지고 있다.

이와 같은 最適化 문제의 目的函數에 대해서 最小치를 구하는 경우에는 널리 알려진 여러가지 비선형 알고리즘들 중에서 Box의 complex method가 가장 적합한 것으로 판단되었다. complex method는 휴리스틱 탐색(heuristic search)의 구조를 갖는 알고리즘으로서 비선형의 부등식으로 주어지는 制限條件하에서 다변수 비선형 목적 함수의 범최소치(global minimum)을 구하는 문제에 대해서 매우 효과적이다. 또한 complex method는 계산상 도함수가 필요하지 않고, 알고리즘이 매우 간단하다는 특징을 가지고 있다.

본 연구에 사용된 complex method의 알고리즘은 그림1과 같다.

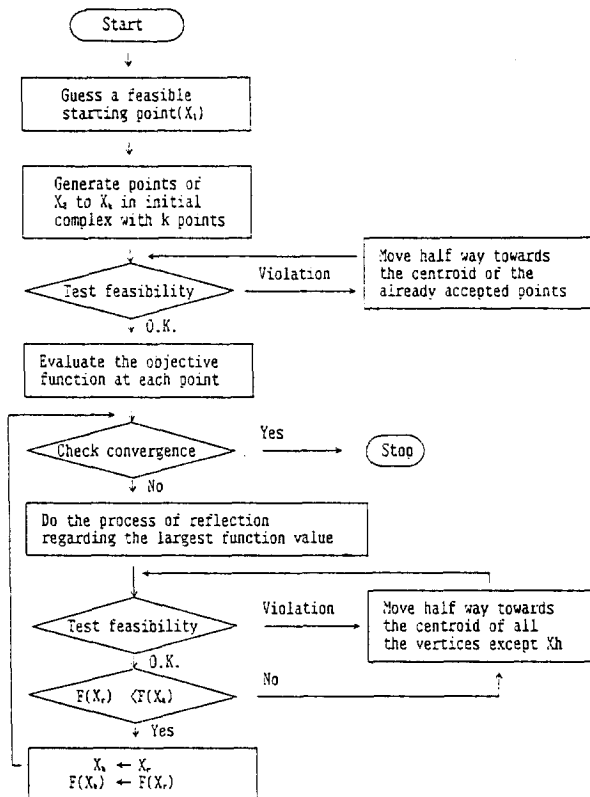


Fig. 1. Algorithm of complex method of Box.

나. 最適化 프로그램 開發

고추의 乾燥過程時 여러가지 乾燥條件下에서 小要에너지와 乾燥時間을 最小化시키기 위하여 Box의 complex method를 근간으로 하는 最適化 알고리즘을 設定하고 이를 실행하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

그림 2는 고추의 乾燥過程을 最適化하기 위한 알고리즘을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주어진 건조조건하에서 목적함수 및 암시적 제한조건에 관한 함수를 평가하기 위하여 이미 개발된 건조모형을 이용하여 고추의 乾燥過程을 시뮬레이션 하였다. 여기서 乾燥條件은 그림 2에서 보는 바와 같으나, 1段階 乾燥法에서는 상대습도에 관한 制限條件의 상한값을 70%로 設定하였고, 2段階 및 3段階 乾燥法에서는 최종 건조 단계에서만 70%의 상한값을 設定하였다.

한편, 그림 2와 같이 設定한 最適化 알고리즘을 구현하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 개발하

였다. 最適化 프로그램은 C언어로 작성된 하나의 독립된 난수발생 프로그램을 비롯하여, 포트란 언어로 작성된 1개의 주프로그램과 16개의 부프로그램으로 개발되었는 바, 프로그램의 구성도는 그림 3과 같다.

5. 結果 및 考察

가. 入力資料 및 制限條件

본 연구에서 분석한 바에 의하면, 고추의 건조 과정시에 소요되는 에너지는 고추의 종류 및 건조조건에 따라 상이하게 나타났다. 그러므로, 고추의 최종 품질에 관하여 制限條件이 주어질 때 최적의 건조조건은 고추의 종류 및 건조조건이 종합적으로 고려되어 제시되어야 함을 알 수 있다.

표 1은 고추의 건조과정시 소요되는 에너지를 最小化하고, 그에 따른 건조조건을 찾기 위하여

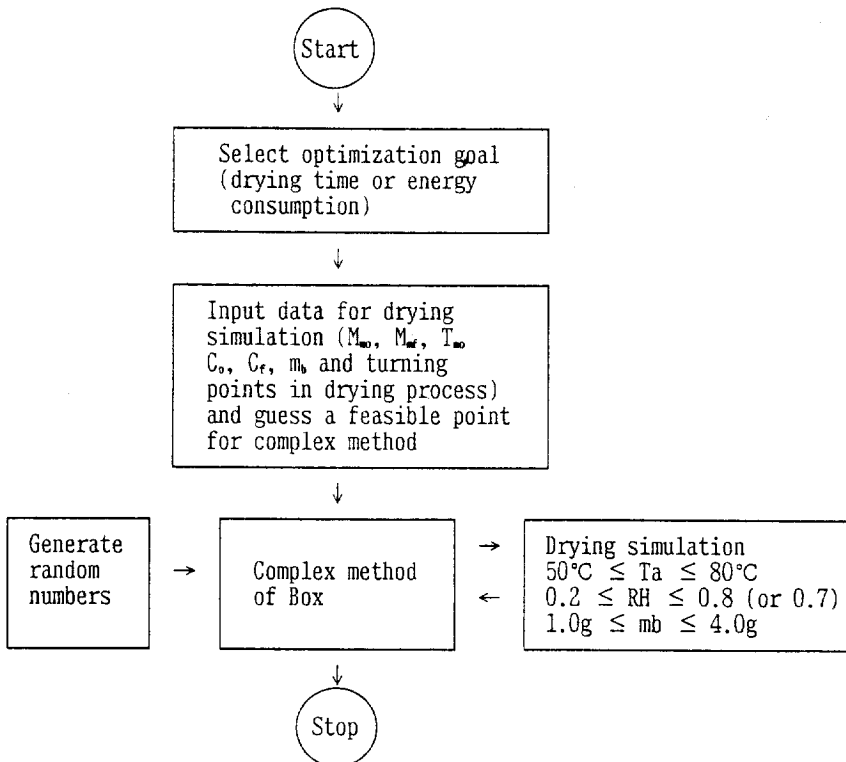
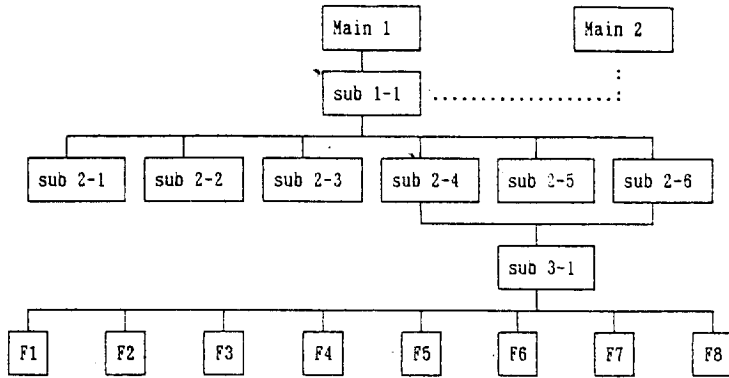


Fig. 2. Algorithm for optimization of red pepper drying process.



- Main 1 : Main program for optimization of red pepper drying process
- Main 2 : Program for generation of random numbers
- Sub 1-1 : Subroutine program for minimization by complex method of Box
- Sub 2-1 : Subroutine program for calculation of centroid of already accepted points in complex
- Sub 2-2 : Subroutine program for calculation of centroid of all vertices in complex
- Sub 2-3 : Subroutine program for calculation of centroid of all vertices except the vertice with the maximum value in complex
- Sub 2-4 : Subroutine program for evaluation of objective function
- Sub 2-5 : Subroutine program for explicit constraints
- Sub 2-6 : Subroutine program for implicit constraints
- Sub -1 : Subroutine program for calculation of moisture content, temperature and carotenoid content
- F 1 : Function subprogram for calculation of EMC
- F 2 : Function subprogram for calculation of effective diffusion coefficient
- F 3 : Function subprogram for calculation of pericarp thickness
- F 4 : Function subprogram for calculation of surface area of a red pepper
- F 5 : Function subprogram for calculation of heat capacity of red pepper
- F 6 : Function subprogram for calculation of latent heat for red pepper
- F 7 : Function subprogram for calculation of heating constant
- F 8 : Function subprogram for calculation of rate constant of carotenoid destruction

Fig. 3. Diagram of structure of programs for optimization of red pepper drying process.

최적화를 수행할 때 入力資料 및 품질에 관한 制限條件을 나타낸 것이다. 入力資料 중에서 고추의 초기 및 최종함수율, 초기 온도, 그리고 초기 카로테노이드 함량은 일정한 값을 부여하여 최적화 결과를 용이하게 비교할 수 있도록 하였다.

한편, 그 동안의 연구 결과에 의하면(Lease 와 Lease, 1962 ; 金과 全, 1975 ; 朴, 1975), 건조로 인하여 고추의 품질이 크게 저하되는 것을 우려하여 건조온도의 제한을 제시하고 있다. 본 연구

에서는 특정한 수준의 품질을 갖는 건고추를 생산할 때 소요에너지를 最小化하고, 그에 따른 건조조건을 구명하고자 하는 바, 품질수준으로서 50°C, 60% RH의 건조조건으로 고추를 열풍 건조했을 때 나타나는 건고추의 카로테노이드 함량으로 표시되는 制限條件(제1형)과 65°C, 20% RH의 건조조건하에서 나타나는 카로테노이드 함량으로 표시되는 제한조건(제2형)을 채택하였다. 이와 같이 제1형의 制限條件을 설정한 이유는 실제로 건조시기인 여름철에 고추를 일광

Table 1. Input data and quality constraints for optimizing red pepper drying process.

Input item	data
Initial moisture content	3.5 (dec.db)
Final moisture content	0.2(dec.db)
Initial temperature of red pepper	20 (°C)
Initial carotenoid content	370 (mg/100g dry pepper)
Quality constraint : Type I (Final carotenoid content)	
For red pepper with $m_b=1.0g$	208.6 (mg/100g dry pepper)
For red pepper with $m_b=2.0g$	149.9 (mb/100g dry pepper)
For red pepper with $m_b=3.0g$	102.5 (mb/100g dry pepper)
For red pepper with $m_b=4.0g$	66.3 (mb/100g dry pepper)
Quality constraint : Type II (Final carotenoid content)	
For red pepper with $m_b=1.0g$	261.0 (mg/100g dry pepper)
For red pepper with $m_b=2.0g$	210.3 (mb/100g dry pepper)
For red pepper with $m_b=3.0g$	161.0 (mb/100g dry pepper)
For red pepper with $m_b=4.0g$	117.0 (mb/100g dry pepper)

Note)  $m_b$  : Bone dry weight of fruit

Type I : Quality of red pepper dried at the air condition of 50°C and 0.6RH

Type II : Quality of red pepper dried at the air condition of 65°C and 0.2RH

에 노출시켜 고추의 온도를 측정 한 결과, 최고 약 50°C에 이르렀으며 이때의 공기의 평균 상대습도는 약 60%로 나타났기 때문이다. 한편 제2형의 제한조건은 Lease와 Lease(1962), 金과 全(1975) 및 朴(1975)의 연구결과에 의하여 채택하였다.

나. 소요에너지 및 乾燥時間 最小化

1) 1段階 乾燥法

50°C, 60% RH와 65°C, 20% RH의 두 가지 건조조건으로 고추를 건조하였을 때 나타나는 고추의 최종 카로테노이드 함량을 품질의 制限條件으로 각각 설정한 경우, 건조조건을 일정하게 지속시키는 1段階 乾燥法에 의하여 고추를 건조할 때 소요에너지 및 건조시간에 대해서 최적화를 수행한 결과는 다음과 같다. 한편, 제1형과 2형의

품질 제한조건을 얻기 위하여 50°C, 60% RH 및 65°C, 20% RH의 건조조건으로 고추를 각각 건조하였을 때 소요되는 에너지 및 건조시간을, 최적화를 수행한 결과와 비교하기 위하여 표 2에 나타내었다.

표 3과 4는 각각 제1형과 2형의 품질 제한조건하에서 소요에너지 및 건조시간에 대해서 최적화를 수행한 결과를 나타낸 것이다. 최적화 결과에 의하면, 품질 제한조건의 유형에 관계없이 소요ener지를 최소화하는 건조조건은 건조시간을 최소화하는 건조조건과 동일하게 나타났다. 이러한 결과로부터 건조시간을 단축시키는 건조조건이 역시 소요ener지를 단축시키는 건조조건이 됨을 알 수 있다.

그런데, 표3과 4를 비교해 보면, 본 연구에서 주어진 공기 조건의 범위내에서는 제1형의 품질 제한조건하에서 소요에너지 및 건조시간을 최소화하는 공기 조건은 고추의 기체 건물중량에 따



Table 2. Energy consumption and drying time under the two air conditions in red pepper drying process.

Drying condition	$m_b$ (g)	E(kJ/g dry pepper)	t(hr)
50°C & 0.6RH	1.0	13.251	33.5
	2.0	14.182	52.0
	3.0	14.979	73.2
	4.0	15.844	97.5
65°C & 0.2RH	1.0	12.978	8.0
	2.0	13.926	12.0
	3.0	14.739	16.7
	4.0	15.623	22.2

Notes)  $m_b$  : Bone dry weight of fruit  
 E : Energy consumption per unit bone dry weight of fruit  
 t : drying time

Table 3. Optimization results from one stage drying method under the type I quality constraint.

$m_b$ (g)	$E_{min}$ (kJ/g dry pepper)	tmin(hr)	Optimum drying condition	
			Ta(°C)	RH(%)
1.0	12.686	4.4	80.0	20.0
2.0	13.674	6.8	78.8	20.0
3.0	14.507	9.7	77.9	20.0
4.0	15.414	13.5	76.6	20.0

Table 4. Optimization results from one stage drying method under the type II quality constraint.

$m_b$ (g)	$E_{min}$ (kJ/g dry pepper)	tmin(hr)	Optimum drying condition	
			Ta(°C)	RH(%)
1.0	12.978	8.0	65.0	20.0
2.0	13.926	12.0	65.0	20.0
3.0	14.739	16.7	65.0	20.0
4.0	15.623	22.2	65.0	20.0

라 약간의 차이는 있지만 거의 최고의 건조잠재력을 가질 때 최적의 건조조건으로 나타난 반면, 품질 제한조건이 보다 엄격해진 제2형의 품질 제한조건하에서는 고추의 종류에 관계없이 65°C, 20%RH의 공기 조건이 최적의 건조조건으로 나타났다.

따라서, 표 3과 4의 결과를 표 2와 비교해 보면,

1단계 건조법에 의해 고추를 건조할 때 최종 품질의 수준에 따라서 1단계 건조법은 소요에너지 및 건조 시간을 최소화하기 위하여 효과적으로 이용될 수도 있음을 알 수 있다.

2) 2段階 乾燥法

2단계 건조법에서는 고추의 건조과정 동안에

건조조건을 1회 변경하였으며, 건조 단계의 전환점은 이미 앞에서 언급한 바와 같이 함수율이 50%(db), 200%(db), 그리고 250%(db)인 3가지 경우로 채택하였다. 한편, 여기서는 표 3의 결과로부터 추측할 수 있는 바와 같이 제1형의 품질 제한조건하에서는 2단계 이상의 다단계 건조법의 효과가 1단계 건조법의 효과와 거의 일치하는 것으로 나타났기 때문에 2단계 건조법에 의한 최적화 결과는 제2형의 품질 제한조건의 경우에만 나타내었다.

표 5는 개체 건물중량이 1.0g인 고추를 2단계 건조법으로 건조할 경우 제2형의 품질 제한조건하에서 건조 단계 전환점에 따른 최적화 결과를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 상

대습도는 모든 건조 단계에서 최저 수준을 유지하면서 온도는 첫번째 건조 단계에서 약 65°C로 유지하고 두번째 건조 단계에서는 약 80°C로 유지해야 하는 것으로 나타났는데, 3가지 수준의 건조 단계 전환점 중에서 함수율이 250%(db)일 때 건조 단계를 전환하는 경우에서 소요에너지 및 건조시간을 최소화하는 것으로 나타났다. 고추의 종류가 다른 경우에도 마찬가지로 결과가 나타났는데, 함수율이 250%(db)일 때 건조 단계를 전환하는 2단계 건조법으로 고추를 건조할 경우 제2형의 품질 제한조건하에서 고추의 종류에 따른 최적화 결과를 표 6에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 고추의 종류에 관계없이 소요에너지 및 건조시간을 최소화하기 위하여 최

Table 5. Optimization results depending on the turning point from two stage drying method under the type II quality constraint with the red pepper having mb=1.0g.

Turning point, Mm(dec. db)	Emin (kJ/g dry pepper)	tmin (hr)	Optimum drying condition		
			stage	Ta(°C)	RH(%)
0.5	12.907	7.0	1	65.4	20.0
			2	79.9	20.0
2.0	12.790	5.5	1	65.5	20.0
			2	79.9	20.0
2.5	12.731	5.2	1	64.0	20.0
			2	79.9	20.0

Table 6. Optimization results from two stage drying method with the turning point of 250% (db) under the type II quality constraint.

Turning point, Mm(dec. db)	Emin (kJ/g dry pepper)	tmin (hr)	Optimum drying condition		
			stage	Ta(°C)	RH(%)
1.0	12.731	5.2	1	64.0	20.0
			2	79.9	20.0
2.0	13.669	7.8	1	64.2	20.0
			2	80.0	20.0
3.0	14.474	11.0	1	64.1	20.0
			2	80.0	20.0
4.0	15.285	14.6	1	64.1	20.0
			2	80.0	20.0

저의 상대습도 조건과 함께 64°C 및 80°C의 온도 조건이 첫번째 및 두번째 단계에서 각각 주어져야 하는 것으로 나타났다.

### 3) 綜合 考察

고추의 건조과정에 단계별 건조법을 적용하여 최적화를 수행한 결과, 품질 제한조건 및 건조 단계 전환점에 따라서 소요에너지 및 건조시간의 감축 효과는 다르게 나타났다.

제1형의 품질 제한조건을 갖는 경우, 본 연구에서 주어진 공기 조건의 범위내에서는 건조 단계의 구분없이 즉, 1단계 건조법에 의하여 고추를 건조하더라도 소요에너지 및 건조시간을 최소화할 수 있는 것으로 나타났으며, 이때 공기 조건은 최고의 건조잠력을 가져야 하는 것으로 나타났다.

반면, 제2형의 품질 제한조건하에서는 2단계 건조법으로 고추를 건조하는 것이 1단계 건조법으로 건조하는 것보다 유리한 것으로 나타났다. 이 경우 건조 단계를 전환하는 시기는 최적화 결과에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 제2형의 품질 제한조건하에서 3단계 건조법을 적용한 결과는 2단계 건조법의 결과와 거의 동일한 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터, 고추를 건조할 때 고추의 품질 수준에 따라서 단계별 건조법의 효과는 다르게 나타남을 알 수 있다. 한편, 허용되는 공기 조건의 범위가 확대된다면 다단계 건조법은 더욱 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 6. 結論 및 要約

고추는 품종 및 기타 요인에 따라 乾燥特性이 상이한 바, 고추의 종류에 따라서 건조과정을 가장 합리적으로 관리하기 위하여, 여러가지 건조 조건하에서 고추의 건조과정을 모의실험한 결과를 바탕으로 건조에 소요되는 에너지 및 시간에 대해서 각각 最適化를 수행하였다.

고추의 건조과정에 대한 最適化 결과는 다음과 같다.

① 고추의 건조과정을 최적화한 결과, 건조시간을 최소화하는 건조조건은 역시 소요에너지를 최소화하는 것으로 나타났다.

② 고추의 건조과정시 단계별 건조법의 효과는 품질 제한조건에 따라서 다르게 나타났으며, 품질 제한조건이 엄격한 경우에 다단계 건조법은 소요에너지 및 건조시간을 최소화하기 위하여 효과적인 것으로 파악되었다. 특히 2단계 건조법이 효과적인 경우에 건조 단계의 전환점은 매우 중요한 것으로 파악되었다.

### 參 考 文 獻

1. 金恭煥, 全在根. 1975. 고추의 熱風乾燥가 品質에 미치는 影響. 韓國食品科學會誌 7(2) : 69-73.
2. 朴春蘭. 1975. 고추의 乾燥方法에 따른 成分變化에 關한 研究 : 제1보 carotenoid, capsaicin, vitamin C의 變化. 韓國營養學會誌 8(4) : 27-32.
3. 이동선. 1987. 食品乾燥의 最適化 研究. 博士學位論文. 延世大學校 大學院.
4. 李元碩, 高學均, 盧祥夏, 趙鏞珍. 1988. 고추의 乾燥모델에 關한 研究. 서울大學校 農學研究 13(2) : 59-71.
5. 趙鏞珍. 1986. 고추의 乾燥特性과 乾燥모델에 關한 研究. 碩士學位論文. 서울大學校 大學院.
6. 趙鏞珍. 1991. 고추의 乾燥過程 模型化 및 最適化에 關한 研究. 博士學位論文. 서울大學校 大學院.
7. 趙鏞珍, 高學均. 1986. 고추의 乾燥特性과 乾燥모델에 關한 研究. 韓國農業機械學會誌 11(1) : 52-63.
8. 趙鏞珍, 高學均, 朴在福. 1991. 고추의 汎用 乾燥模型 開發에 關한 研究. 韓國農業機械學會誌 16(1) : 60-82.
9. Beightler, C. S., D. T. Phillips and D. J. Wilde. 1979. Foundation of optimization. 2nd ed.. United Publishing and Promotion, Seoul.

10. Bender, F. E., A. Kramer and G. Kahan. 1982. Linear programming and its applications in the food industry. *Food Technology* 36(7) : 94-96.
11. Davis, L.(ed.). 1987. Genetic algorithms and simulated annealing. Pitman Publishing, London.
12. Denn, M. M.. 1969. Optimization by variational methods. McGraw-Hill Company, New York.
13. Evans, L. B.. 1982. Optimization theory and its application in food processing. *Food Technology* 36(7) : 88-93, 96.
14. Floros, J. D. and M. S. Chinnan. 1988. Computer graphics-assisted optimization for product and process development. *Food Technology* 42(2) : 72-78, 84.
15. Goldberg, D. E.. 1989. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley Publishing, Reading.
16. Kuester, J. L. and J. H. Mize. 1973. Optimization techniques with fortran. McGraw-Hill, New York.
17. Lease, J. G. and E. J. Lease. 1962. Effect of drying conditions on initial color, color retention, and pungency of red peppers. *Food Technology* 16(11) : 104-106.
18. Lee, D. S. and H. K. Kim. 1989. Carotenoid destruction and nonenzymatic browning during red pepper drying as functions of average moisture content and temperature. *Korean J. Food Sci. Technol.* 21(3) : 425-429.
19. Lee, D. S. and M. H. Park. 1989. Quality optimization in red pepper drying. *Korean J. Food Sci. Technol.* 21(5) : 655-661.
20. Lee, D. S., D. H. Keum, N. H. Park and M. H. Park. 1989. Optimum drying conditions of on-farm red pepper drying. *Korean J. Food Sci. Technol.* 21(5) : 676-685.
21. Mishkin, M., M. Karel and I. Saguy. 1982. Application of optimization in food dehydration. *Food Technology* 36(7) : 101-109.
22. Mishkin, M., I. Saguy and M. Karel. 1983. Dynamic optimization of dehydration process : minimizing browning in dehydration of potatoes. *J. Food Science* 48 : 1617 - 1621.
23. Norback, J. P.. 1980. Techniques for optimization of food processes. *Food Technology* 34(2) : 86-88.
24. Ouhab, R. and A. Le Pourhiet. 1985. Optimal drying conditions of grains. In *Drying* 85, ed. by A. S. Mujumdar, pp. 428-433. Hemisphere Publishing corporation, Washington.
25. Rao. S. S.. 1979. Optimization : theory and applications. Wiley Eastern Limited, New Delhi.