

## 밤의 화염박피 시스템 최적화에 관한 연구(Ⅱ)

- 화염박피 공정의 최적화 -

### Study on Optimization of Flame Peeling System for Chestnut (Ⅱ)

- Optimization of Flame Peeling Process for Chestnut -

김종훈 박재복 최창현 이충호  
정회원 정회원 정회원 정회원  
J. H. Kim J. B. Park C. H. Choi C. H. Lee

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate an optimization model to determine the operation conditions of the chestnuts flame peeling system. The results of this study were summarized as follows.

The optimization model was developed and evaluated to represent the flame peeling characteristics of the domestic chestnuts. When the heating depth was selected for various utilization of the peeled chestnuts, the model could determine the optimal conditions of the hardness of the chestnut shells, the flame temperature, and the flame time to get the maximum peeling ratio of the chestnut flame peeling system. When the heating depth was limited to 2.2 mm, the optimization model determined the proper operation conditions and the maximum peeling ratio such as 1594 g/mm<sup>2</sup> of the hardness of the chestnut shells, 780°C of the flame temperature, 29 second of the flame time, and 98.1 % of the peeling ratio.

**Keywords :** Chestnut, Flame peeling, Peeling system, Optimization.

#### 1. 서 론

농산물의 박피공정은 외관의 향상 및 식용하거나 가공하기 편하게 할 목적으로 껍질 등 필요 없는 부분을 제거하는 공정으로, 농산물을 가공하기 위한 전처리 공정으로 이용되거나 박피된 농산물을 소비자에게 직접 유통할 때 사용된다. 일반적으로 농산물의 박피작업의 목표는 박피된 농산물이 좋은 품질과 최소의 손실율로서 최대 박피율을 가지는 것이다.

화염박피 방법은 대량처리가 가능하며 공정의 자동화가 쉽고, 밤과 같은 껍질이 단단한 시료의 박피에 효율적인 것으로 나타나고 있으나, 시료가 고온에 노출되므로 고온의 영향을 받게된다. 화염박피 방법에 의한 밤의 박피공정에서 박피율이 증가하면 화염박피 열침투 깊이

도 증가하는 것으로 나타났다(김 등 1997). 이러한 열침투 깊이는 화염박피 밤의 사용용도에 따라 결정할 필요가 있다. 화염박피 방법으로 박피된 밤을 생울로 유통시에는 열침투 부분을 제거해야 하므로 열침투 깊이가 적을수록 손실율이 적게 나타난다. 그러므로 생울로 유통시에는 손실율을 고려하여 열침투 깊이를 선정해야 한다. 가공제품의 원료로 사용할 때에는 가공특성에 따라 열침투 깊이를 선정해야 한다. 잼 등의 원료로 이용시에는 열침투 깊이가 커져도 사용 가능할 것이며, 박피밤 상태에서 당침투가 필요한 마론그랏세 등의 가공제품에서는 열침투 깊이를 제한할 필요가 있다. 따라서 화염박피 방법을 이용한 박피공정에서 박피 밤의 사용용도에 따라 열침투 깊이의 범위를 결정하여, 이때 박피율이 최대가 되는 최적 작업조건을 설정하는 것이 중요한 문제이다.

The authors are Jong Hoon Kim, Senior Researcher, Je Bok Park, Principle Researcher, Korea Food Research Institute, Chang Hyun Choi, Professor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, and Chung Ho Lee, Associate Professor, Technology Innovation Center, Jeonju University. The corresponding author is J. H. Kim, Senior Researcher, Korea Food Research Institute, Songnam, 463-746, Korea. e-mail: <jhkim@kfri.re.kr>.

농산물이나 식품의 최적화 문제의 경우에는 재료와 공정해석이 매우 복잡하므로 대부분 제약조건이 있는 비선형 계획 문제로 표현된다. 이와같은 제한식을 가지고 있는 비선형 문제를 최적화하는 알고리즘으로는 Lagrange multiplier, Box의 Complex, Rosenbrock의 Hill, Rosen의 Prox, Fiacco와 McCormick의 Sumt, Powell의 Conmin 알고리즘 등이 알려져 있다(Kuester 등 1973). 이들 중 Box의 콤플렉스 알고리즘은 국외는 물론 국내에서도 이 등(1989), 금 등(1991), 김(1996)에 의해 농산물과 식품의 최적화 문제에 적용되어 강인성, 효율성 및 일반성이 입증되었고, 계산상 도함수가 불필요하고 알고리즘이 간단하여 사용이 편리한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 밤 화염박피 공정의 최적화를 위하여 콤플렉스 알고리즘을 이용하였다.

본 연구의 목적은 국내산 밤 박피를 위하여 개발된 화염박피 시스템의 최적 박피조건을 구명하기 위하여 국내산 밤의 화염박피 특성 예측모델을 토대로 최적화기법을 이용하여 제한된 열침투 깊이의 범위에서 최대 박피율을 나타내는 화염박피 공정의 최적조건을 구명하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 화염박피 시스템

본 연구에 사용된 화염박피 시스템은 밤의 화염박피 시스템 최적화에 관한 연구의 제 1보와 동일한 시스템으로 밤 시료를 일정한 속도로 고온의 화로에 투입하기 위하여 원료밤 이송 콘베어와 진동 공급기를 설치하였으며, 이송 공급 장치로부터 공급된 밤에 화염을 분사하여 밤의 내외피를 순간적으로 연소시키는 화염박피 장치(flame peeling machine) 및 화염박피 장치에서 내외피가 연소된 밤의 내외피를 마찰력을 이용하여 제거하여 주는 연속 마찰식 내외피 제거장치(continuous frictional skin peeler)로 구성되어 있다.

### 나. 공시재료

시료는 충남 공주시 임업협동조합에서 구입한 은기 품종의 중율로서 생울을 육안과 비중선별을 통하여 상처과, 해충과, 비정상과를 제거하고 정상과를 본 실험의 재료로 사용하였다.

### 다. 최적화 알고리즘

콤플렉스 알고리즘은 1965년 M. J. Box가 simplex 알고리즘을 개선하여 발표하였으며, 이 알고리즘은 부등식으로 이루어진 비선형 방정식을 제한조건으로 하는 다변수의 비선형 방정식의 최적해를 구하는데 효율적인 알고리즘이다. 제한조건에는 암시적 제한조건과 명시적 제한조건으로 구분되는데, 명시적 제한조건은 목적함수의 독립변수들의 제한범위를 지정한 것이고, 암시적 제한조건은 목적함수의 독립변수로 이루어진 새로운 방정식의 제한범위를 지정한 것이다. 콤플렉스 알고리즘은 우선 유용한 지역(feasible region)내의 임의의 점을 초기치로 가정하고, 초기점으로부터 보통 2배에 해당하는 콤플렉스 점(complex point)을 만들어 이들중 목적함수에 열등한 점을 새로운 점으로 교체하면서 최적값을 찾아가는 연속적인 탐색방법으로서, 암시적 제한조건은 없어도 무관하지만 명시적 제한조건은 반드시 필요하다. 또한 제한식의 상·하한값은 상수나 목적함수의 독립변수로 이루어진 방정식이어야 한다.

콤플렉스 알고리즘을 이용하여 최적해를 찾는 방정식의 형태는 식 (1)과 같이 목적함수와 제한식으로 구성되며, 최적해를 찾는 절차는 6단계로 이루어진다(Kuester, 1973).

$$\text{Object function } F(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } G_M \leq X_M \leq H_M$$

where, N : number of independent variables

M : number of constraints

### 라. 최적화 모델 검증

최적화 모델을 검증하기 위하여 암시적 제한조건인 열침투 깊이의 제한조건이 1.0, 1.4, 1.8, 2.2 mm일 때 최적화 결과와 화염박피 실험결과를 비교하였다. 박피실험은 최적화 결과의 최적 박피조건에서 3회 반복 실험하였으며, 매회 100개의 원료밤을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 목적함수 및 제한조건

#### (1) 최적화 목표 및 목적함수

화염박피 공정의 최적화 목표는 주어진 명시적 제한조

건과 암시적 제한조건을 만족하면서 박피율이 최대가 되도록 하는 것이다. 밤의 화염박피에서 중요한 요인의 하나로 알려진 밤 외피 경도는 김 등(1998)이 발표한 건조 처리에 따른 밤 외피의 경도 방정식을 이용하여 화염박피의 전처리 건조공정에서 조절한다. 따라서 목적함수는 화염박피 특성의 중요한 요인으로 밝혀진 밤 외피의 경도, 연소온도, 연소시간을 독립변수로 하는 박피율 방정식으로, 식 (2)와 같다.

$$\text{Maximum } Y = F(X_1, X_2, X_3) \quad (2)$$

where, Y : peeling ratio (%)

X<sub>1</sub> : hardness of the chestnut shells (g/mm<sup>2</sup>)

X<sub>2</sub> : flame temperature (°C)

X<sub>3</sub> : flame time (sec)

#### (2) 제한조건

제한조건은 명시적 제한조건과 암시적 제한조건으로 구분할 수 있다. 명시적 제한조건은 목적함수의 독립변수인 밤 외피의 경도, 연소온도, 연소시간의 제한범위를 지정한 것으로, 본 연구의 국내산 밤의 박피특성 실험결과에서 밝혀진 적정범위를 제한범위로 선정하였다. 밤 외피의 경도는 1300 ~ 2100 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도는 600 ~ 800°C, 연소시간은 5 ~ 30초를 제한범위로 하였다. 식 (3)은 명시적 제한조건을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} 1500 &\leq X_1 \leq 2100 \\ 600 &\leq X_2 \leq 800 \\ 5 &\leq X_3 \leq 30 \end{aligned} \quad (3)$$

where, X<sub>1</sub> : hardness of the chestnut shells (g/mm<sup>2</sup>)

X<sub>2</sub> : flame temperature (°C)

X<sub>3</sub> : flame time (sec)

암시적 제한조건은 화염박피 밤에 나타나는 열침투 깊이를 사용하였다. 열침투 깊이는 열침투가 깊어지면 밤의 가공특성이 나빠지고, 생울로 유통 시에는 열침투 부분을 제거하여야 하므로 손실율과 밀접한 관계를 가지고 있어 박피조건을 결정하는 중요한 평가 기준이다. 이러한 열침투 깊이의 범위는 최적화 프로그램에서 입력 데이터로 하여 열침투 깊이에 따른 최적 화염박피 조건을 선정하도록 하였다. 식 (4)는 암시적

제한조건을 나타낸 것이다.

$$n_1 \leq G(X_1, X_2, X_3) \leq n_2 \quad (4)$$

where, G(X) : equation of the heating depth

X<sub>1</sub> : hardness of the chestnut shells (g/mm<sup>2</sup>)

X<sub>2</sub> : flame temperature (°C)

X<sub>3</sub> : flame time (sec)

n<sub>1</sub> : minimum value of the heating depth (mm)

n<sub>2</sub> : maximum value of the heating depth (mm)

#### 나. 최적화 프로그램

최적화 프로그램은 포트란(fortran) 77로 작성하였으며, 1개의 주 프로그램(main program)과 BOX, CONSX, CHECK, CENTER, FUNC, CONST의 6개 부 프로그램(subroutine subprogram)으로 이루어져 있다. 주 프로그램에서는 프로그램에 사용되는 변수들의 정의와 최대 반복수, 수렴조건 등을 지정하고, 제어변수의 초기값 가정 및 암시적 제한조건인 열침투 깊이의 범위를 지정하도록 되어 있다. BOX 부 프로그램은 CONSX 부 프로그램을 관리하며, 컴플렉스 알고리즘에 의하여 구한 최적값들을 출력한다. CONSX 부 프로그램은 CHECK, CENTER, FUNC, CONST의 부 프로그램을 관리하면서 최적해를 찾아가는 과정을 수행한다. CHECK 부 프로그램은 최적해를 찾는 과정의 모든 값의 제한조건을 검토하여, 제한조건에 위반되는 점들은 제한조건에 맞도록 수정해준다. CENTER 부 프로그램은 제어변수마다 K개로 구성된 컴플렉스의 중간값을 계산한다. FUNC 부 프로그램은 목적함수인 박피율 방정식을 정의하고 계산한다. CONST 부 프로그램은 명시적 제한조건과 암시적 제한조건의 범위를 지정하고, 암시적 제한조건인 열침투 깊이를 계산한다. Fig. 1은 최적화 프로그램에서 최적치를 찾는 흐름도를 나타낸 것이다.

#### 다. 최적화 모델 검증

Table 1은 검증실험 결과를 나타낸 것으로, 암시적 제한조건인 열침투 깊이의 제한조건이 1.0, 1.4, 1.8, 2.2 mm일 때 박피율과 열침투 깊이에 대하여 최적화 결과, 박피실험 결과, RMS(root mean squares) 오차를 나타내었다.

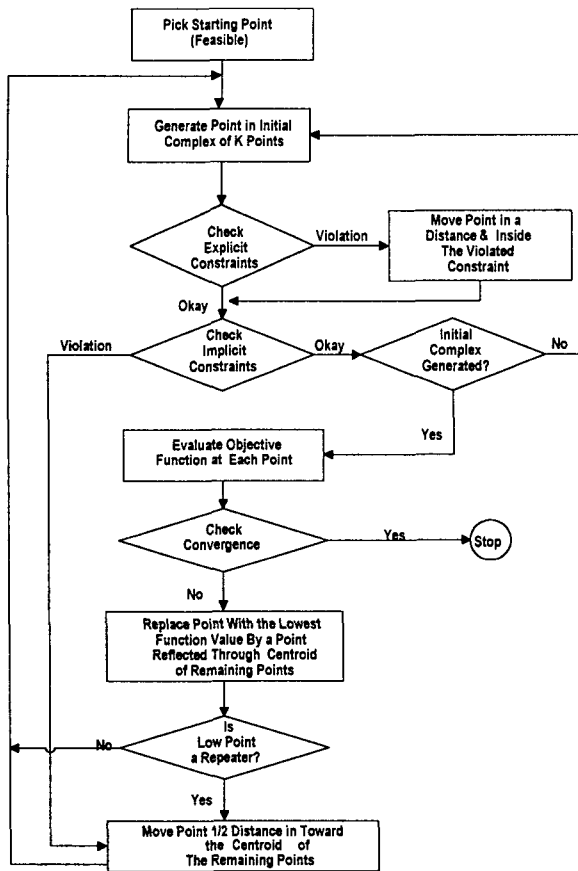


Fig. 1 Flowchart of optimization program for flame peeling of chestnut.

열침투 깊이를 1.0 mm로 제한할 때 최적 박피조건은 밤 외피 경도가 1,739 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도가 606℃, 연소시간이 21 초로 나타났다. 최적화 결과와 검증실험 결과의 박피율은 41.7%, 42.8%, 열침투 깊이는 0.99 mm, 1.02 mm로 각각 나타났다. 열침투 깊이를 2.2 mm로 제한할 때

최적화 결과와 검증실험 결과의 박피율은 90.3%, 89.3%, 열침투 깊이는 2.19 mm, 2.14 mm로 각각 나타났다. 최적화 결과와 검증실험 결과의 RMS 오차는 열침투 깊이의 제한조건이 1.0 mm일 때 박피율이 2.7%, 열침투 깊이가 0.02 mm로 나타났고, 열침투 깊이 제한값이 1.4 mm일 때는 박피율은 3.9%, 열침투 깊이는 0.02 mm, 열침투 깊이 제한값이 1.8 mm일 때는 박피율은 4.4%, 열침투 깊이는 0.05 mm, 열침투 깊이 제한값이 2.2 mm일 때 박피율은 2.7%, 열침투 깊이는 0.07 mm로 각각 나타났다.

Fig. 2와 Fig. 3은 최적화 결과와 검증실험 결과의 박피율과 열침투 깊이를 나타낸 것으로, 최적화 결과와 검증실험 결과의 회귀분석에서 박피율과 열침투 깊이는 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 이들의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.97과 0.99로 매우 높게 나타났다. 그러므로 본 연구에서 개발한 국내산 밤의 최적 화염박피 모델은 국내산 밤의 화염박피에서 최대 박피율을 나타내는 최적 박피공정을 구하는데 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

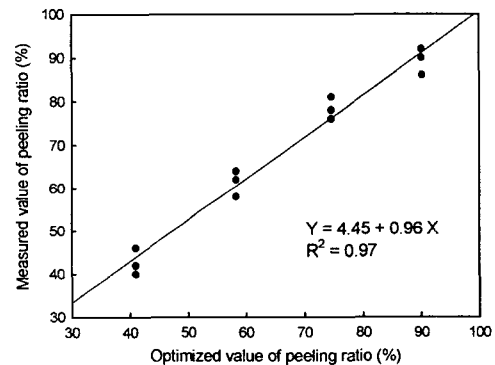


Fig. 2 Relationship between measured and optimized value of peeling ratio.

Table 1 Result of test for verification

Condition <sup>1)</sup>			Peeling ratio (%)			Heating depth (mm)		
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Optimization	Measured <sup>2)</sup>	RMSE <sup>3)</sup>	Optimization	Measured	RMSE
1739	606	21	41.7	42.7 ± 3.1	2.7	0.99	1.02 ± 0.01	0.02
1664	641	24	58.3	61.3 ± 3.1	3.9	1.39	1.41 ± 0.03	0.02
1657	730	24	74.4	78.3 ± 2.5	4.4	1.79	1.82 ± 0.05	0.05
1614	760	27	90.3	89.3 ± 3.1	2.7	2.19	2.14 ± 0.03	0.07

<sup>1)</sup> X<sub>1</sub> : hardness of the chestnut shells(g/mm<sup>2</sup>), X<sub>2</sub> : flame temperature(℃), X<sub>3</sub> : flame time(sec).

<sup>2)</sup> Mean of three replication ± standard deviation.

<sup>3)</sup>  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum (optimization\ value - measured\ value)^2}{N}}$

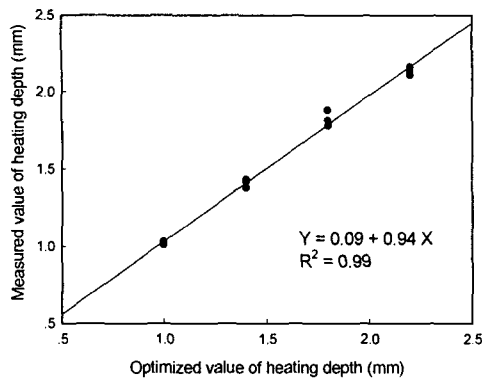


Fig. 3 Relationship between measured and optimized value of heating depth.

라. 최적 박피조건

암시적 제한조건인 화염박피 밤의 열침투 깊이에 따른 화염박피 공정의 최적화를 수행하였다. 최적화 결과는 Table 2와 Fig. 4에 나타내었으며, 최적화 결과는 암시적 제한조건인 열침투 깊이에 따라 제한조건을 만족하는 최대 박피율과 박피 시스템의 최적 박피작업 조건을 결정한다.

Table 2는 열침투 깊이를 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4 mm로 제한할 때 최대 박피율과 최적 박피작업 조건으로 밤 외피의 경도, 연소온도, 연소시간 등을 나타낸 것이다. 이때 밤 외피 경도는 밤 외피 예측 방정식을 이용하여 최적 건조처리 조건을 선정할 수 있으며, 연소온도와 연소시간은 박피 시스템의 최적 작업조건을 선정

할 수 있다. 열침투 깊이를 1.2 mm로 제한할 때 최대 박피율은 58.3%로 나타났으며, 박피조건은 밤 외피의 경도는 1,714 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도는 632℃, 연소시간은 22초로 나타났다. 열침투 깊이의 제한조건이 1.6 mm일 때 최대 박피율은 66.6%로 나타났으며, 이때 박피조건은 밤 외피의 경도는 1,664 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도는 668℃, 연소시간은 26 초로 나타났다. 열침투 깊이의 제한조건이 2.0 mm일 때 최대 박피율은 82.4%로 나타났으며, 이때 박피조건은 밤 외피의 경도는 1,671 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도는 749℃, 연소시간은 26초로 나타났다. 열침투 깊이의 제한조건이 2.2 mm일 때 최대 박피율은 98.1%로 나타났으며, 이때 박피조건은 밤 외피의 경도는 1,594 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도는 780℃, 연소시간은 29초로 나타났다.

Fig. 4에서 열침투 깊이가 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 mm에서 박피율은 41.0, 45.4, 49.8, 54.1, 58.3, 62.5, 66.6, 70.6, 74.6, 78.6, 82.5, 86.3, 90.2, 93.9, 97.7%로 나타났으며, 열침투 깊이가 증가할수록 박피율이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 제한조건인 열침투 깊이 증가에 따른 박피율이 증가할 때 최적박피 조건에서 밤 외피 경도는 감소하였고, 연소온도와 연소시간은 증가하는 경향을 나타냈다. 이와같이 결과는 국내산 밤의 화염박피 특성분석 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

Table 2 Result of optimization for flame peeling process of chestnut

Implicit constraint <sup>1)</sup>	No of iteration	Peeling ratio (%)	Heating depth (mm)	Independent variables <sup>2)</sup>		
				X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1.0	96	41.7	0.99	1,739	606	21
1.2	125	50.0	1.20	1,714	632	22
1.4	39	58.3	1.39	1,664	641	24
1.6	56	66.6	1.59	1,664	668	26
1.8	127	74.4	1.79	1,657	730	24
2.0	52	82.4	1.99	1,671	749	26
2.2	102	90.3	2.19	1,614	760	27
2.4	76	98.1	2.39	1,594	780	29

<sup>1)</sup> high limit value of the heating depth(mm).

<sup>2)</sup> X<sub>1</sub> : hardness of the chestnut shells(g/mm<sup>2</sup>), X<sub>2</sub> : flame temperature(℃), X<sub>3</sub> : flame time(sec).

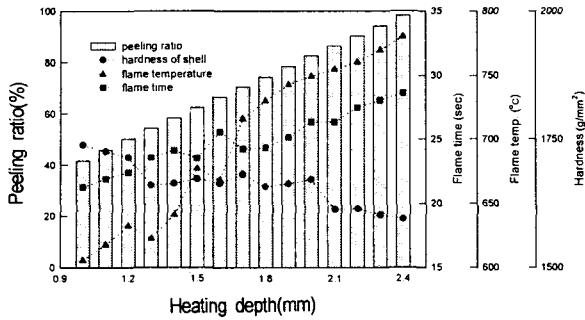


Fig. 4 Result of optimization for flame peeling process of chestnut.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 국내산 밤 박피를 위하여 개발된 화염박피 시스템의 최적 박피조건을 구명하기 위하여 국내산 밤의 화염박피 특성 예측모델을 토대로 최적화기법을 이용하여 제한된 열침투 깊이의 범위에서 최대 박피율을 나타내는 화염박피 공정의 최적조건을 구명하고자 하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

국내산 밤의 화염박피 작업에서 용도에 맞는 열침투 깊이를 선정하면, 개발된 화염박피 시스템에서 최대 박피율을 나타내는 최적 조건을 구할 수 있도록 밤의 화염박피 공정을 최적화하였다. 화염박피 시스템의 최적화 목표는 주어진 제한조건을 만족하면서 박피율이 최대가 되도록 하는 것으로 목적함수는 박피율 예측 방정식을 사용하였으며, 명시적 제한조건은 목적함수의 독립변수인 밤 외피의 경도, 연소온도, 연소시간의 제한범위를 지정하였고, 암시적 제한조건은 화염박피 밤에 나타나는 열침투 깊이의 제한범위를 사용하였다.

개발된 최적화 모델을 검증실험 결과에서 최적화 결과와 실험 결과는 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.97 이상으로 매우 높게 나타났다. 최적화 결과에서는 열침투 깊이의 제한조건이 2.2 mm일 때 최대 박피율은 98.1%로 나타났으며, 박피조건은 밤 외피의 경도는 1,594 g/mm<sup>2</sup>, 연소온도는 780°C, 연소시간은 29 초로 나타났다. 본 연구에서 개발한 국내산 밤의 최적 박피모델은 국내산 밤의 화염박피 특성을 잘 나타내고 있으며, 화염박피 밤의 사용용도에 따라 박피밤의 열침

투 깊이를 선정하면 최대 박피율을 나타내는 화염박피 공정의 최적 조건을 구할 수 있다.

#### 참고 문헌

1. Arora, J. S. 1994. Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill Book Co., Singapore.
2. Beightler, C. S., D. T. Phillips and D. J. Wilde. 1979. Foundations of Optimization. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
3. Beveridge, G. S. G. and R. S. Schechter. 1970. Optimization : Theory and Practice. McGraw-Hill Book Co., New York.
4. Keum, D. H., C. H. Choi and S. Y. Kim. 1991. Development of red pepper dryer - Simulation and optimization -. J. of the Korean Society or Agricultural Machinery 16(3):248-262. (In Korean)
5. Kim, J. H., J. B. Park and C. H. Choi. 1997. Development of chestnut peeling system. J. of the Korean Society or Agricultural Machinery 22(3):289-294. (In Korean)
6. Kim, J. H., J. B. Park, C. H. Choi and J. M. Kim. 1998. Effects of flame peeling characteristics on the hardness of the chestnut shells. J. of the Korean Society or Agricultural Machinery 23(4):351-358. (In Korean)
7. Kim, O. W. 1996. Optimization of pressure cooling system for fruits and vegetables. Paper, The Graduate School of Sungkyunkwan University. (In Korean)
8. Kuester, J. L. and J. H. Mize. 1973. Optimization Techniques with Fortran. McGRAW-Hill Book Co., New York.
9. Lee, D. S., D. H. Keum, N. H. Park and M. H. Park. 1989. Optimum drying condition of on-farm red pepper dryer. Korean J. Food Science Technology 21(5): 676-685. (In Korean)