

밤의 화염박피시스템 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**	김재민**
정회원	정회원	정회원	정회원
J. H. Kim	J. B. Park	C. H. Choi	J. M. Kim

1. 서론

일반적으로 농산물의 박피작업의 목표는 박피된 농산물이 좋은 품질과 최소의 손실율로서 최대의 박피효율을 가지는 것이다. 밤의 화염박피 경우에는 제 1보 화염박피 특성에서 알 수 있듯이 박피율이 증가하면 화염박피 밤의 품질과 생울로 유통시에는 손실율과 밀접한 관계를 가지는 열침투 깊이도 증가한다. 이러한 열침투 깊이는 화염박피 밤의 사용용도에 따라 다르게 나타난다. 화염박피 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 마른그랫세 등의 가공제품에서는 열침투 깊이를 제한할 필요가 있다.

본 연구는 국내산 밤 박피를 위하여 개발된 화염박피 시스템의 최적 박피조건을 구명하기 위한 제 2보로서 제 1보에서 구명된 국내산 밤의 화염박피 특성 예측모델을 토대로 최적화 기법을 이용하여 주어진 열침투 깊이를 만족하면서 최대 박피율을 나타내는 화염박피 공정의 최적조건을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 화염박피 시스템

최적화 모델 검증실험에 사용된 화염박피 시스템은 제 1보와 동일한 시스템으로서 1997년 김 등이 발표한 시스템이다.

나. 최적화 알고리즘

농산물이나 식품의 최적화 문제의 경우에는 재료와 공정해석이 매우 복잡하므로 대부분 제약조건이 있는 비선형계획 문제로 표현된다. 이와같은 제한식을 가지고 있는 비선형 문제

* 한국식품개발연구원 식품유통연구본부 공정개발팀

** 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

를 최적화하는 알고리즘으로는 Lagrange multiplier, Box의 Complex, Rosenbrock의 Hill, Rosen의 Projg, 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. 그러므로 본 연구에서는 콤플렉스 알고리즘을 이용하여 박피공정의 최적 조건을 구명하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 목적함수 및 제한조건

최적화 목표 및 목적함수

화염박피 공정의 최적화 목표는 주어진 명시적 제한조건과 암시적 제한조건을 만족하면서 박피율이 최대가 되도록 하는 것이다. 목적함수는 제 1보에서 화염박피 특성의 중요한 요인으로 밝혀진 밤 외피의 경도, 연소온도, 연소시간을 독립변수로 하는 박피율 방정식으로, 식 (1)과 같다.

$$\text{Maximum } Y = F(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

where, Y : peeling ratio (%), X_1 : hardness of the chestnut shells (g/mm²),
 X_2 : flame temperature (°C), X_3 : flame time (sec)

제한조건

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/mm², 연소온도는 600~800°C, 연소시간은 5~30초를 제한범위로 하였다.

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. 화염박피 밤의 사용용도에 따라 열침투 깊이의 범위를 다르게 설정할 필요가 있다. 즉 생울로 유통시에는 손실율을 최소화하기 위하여 열침투 깊이를 작게 설정하여야 하나, 밤 가공제품의 원료로 이용시에는 가공제품의 제조특성에 따라 열침투 범위가 조정될 수 있을 것이다. 이러한 열침투 깊이의 범위는 최적화 프로그램에서 입력 데이터로 하여 열침투 깊이에 따른 최적 화염박피 조건을 선정하도록 하였다.

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 되어있다. 그림 1은 최적화 프로그램에서 최적치를 찾는 흐름도를 나타낸 것이다.

다. 최적화 모델 검증

개발된 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.

표 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. RMS 오차는 최적화 결과값과 박피실험 결과값의 오차를 나타내고 있으며, 식 (2)에 의하여 구하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{optimization value} - \text{measured value})^2}{N}} \quad (2)$$

열침투 깊이를 1.0 mm로 제한할 때 최적 박피조건은 밤 외피 경도가 1739 g/mm², 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.

그림 2와 그림 3은 최적화 결과와 검증실험 결과의 박피율과 열침투 깊이를 나타낸 것으로, 최적화 결과와 검증실험 결과의 회귀분석에서 박피율과 열침투 깊이는 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 이들의 결정계수(R²)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.

라. 최적 박피조건

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

표 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 선정할 수 있다.

열침투 깊이를 1.2 mm로 제한할 때 최대 박피율은 58.3 %로 나타났으며, 박피조건은 밤 외피의 경도는 1714 g/mm², 연소온도는 632℃, 연소시간은 22 초로 나타났다. 열침투 깊이의 제한조건이 1.6 mm일 때 최대 박피율은 66.6 %로 나타났으며, 이때 박피조건은 밤 외피의 경도는 1664 g/mm², 연소온도는 668℃, 연소시간은 26 초로 나타났다. 열침투 깊이의 제한조건이 2.0 mm일 때 최대 박피율은 82.4 %로 나타났으며, 이때 박피조건은 밤 외피의 경도는 1671 g/mm², 연소온도는 749℃, 연소시간은 26 초로 나타났다. 열침투 깊이의 제한조건이 2.2 mm일 때 최대 박피율은 98.1 %로 나타났으며, 이때 박피조건은 밤 외피의 경도는 1594 g/mm², 연소온도는 780℃, 연소시간은 29 초로 나타났다.

그림 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 본 연구에서 개발한 국내산 밤의 최적 박피모델은 제 1보의 국내산 밤의 화염박피 특성분석 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

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

개발된 최적화 모델을 검증하기 위하여 암시적 제한조건인 열침투 깊이의 제한조건이 1.0, 1.4, 1.8, 2.2 mm일 때 최적화 결과와 화염박피 실험 결과를 비교하였다. 최적화 결과와 실험 결과는 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 회귀 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 1594 g/mm², 연소온도는 780℃, 연소시간은 29 초로 나타났다. 본 연구에서 개발한 국내산 밤의 최적 박피모델은 국내산 밤의 화염박피 특성을 잘 나타낼 수 있는 것으로 판단되며, 화염박피 밤의 사용용도에 따라 박피밤의 열침투 깊이를 선정하면 최대 박피율을 나타내는 화염박피 공정의 최적 조건을 구할 수 있다.

5. 참고문헌

1. 김종훈, 박재복, 최창현. 1999. 밤의 화염박피시스템 최적화에 관한 연구 (I) -국내산 밤의 화염박피특성 예측모델 개발-. 한국농업기계학회 1999 하계 학술대회 논문집.
2. 금동혁, 최창현, 김수연. 1991. 고추건조기의 최적화에 관한 연구 -시뮬레이션 및 최적화

- 한국농업기계학회지 21(1):44-51.

3. 김의웅. 1996. 청과물 차압예냉시스템의 최적화. 박사학위논문, 성균관대학교 대학원.
4. 이동선, 금동혁, 박노현, 박무현. 1989. Optimum Drying Condition of On-Farm Red Pepper Dryer. 한국식품과학회지 21(5):676-685.
5. Arora, J. S. 1994. Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill Book Co., Singapore.
6. Beightler, C. S., D. T. Phillips and D. J. Wilde. 1979. Foundations of Optimization. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
7. Beveridge, G. S. G. and R. S. Schechter. 1970. Optimization : Theory and Practice. McGraw-Hill Book Co., New York.
8. Kuester, J. L. and J. H. Mize. 1973. Optimization Techniques with Fortran. McGRAW-Hill Book Co., New York.

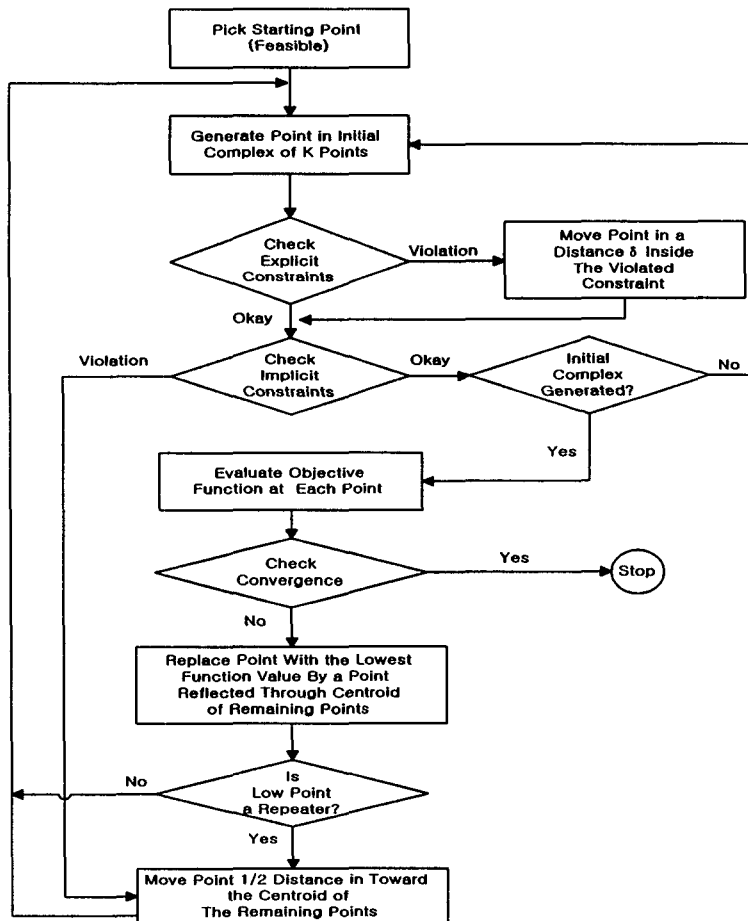


Fig. 1 Flowchart of optimization program for flame peeling of chestnut

Table 1 Result of test for verification

Condition ¹⁾			Peeling ratio (%)			Heating depth (mm)		
X ₁	X ₂	X ₃	optimization	measured ²⁾	RMSE ³⁾	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

1) X₁ : hardness of the chestnut shells (g/mm²), X₂ : flame temperature (°C)
 X₃ : flame time (sec)

2) Mean of three replication ± standard deviation

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

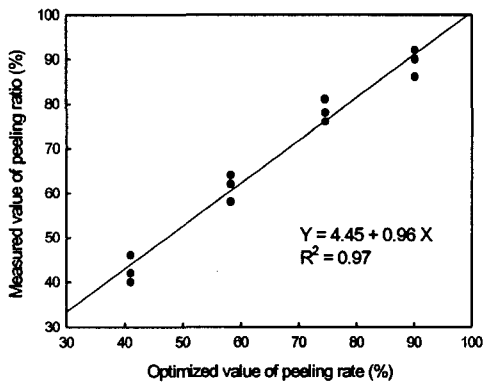


Fig. 2 Relationship between measured and optimized value of peeling ratio.

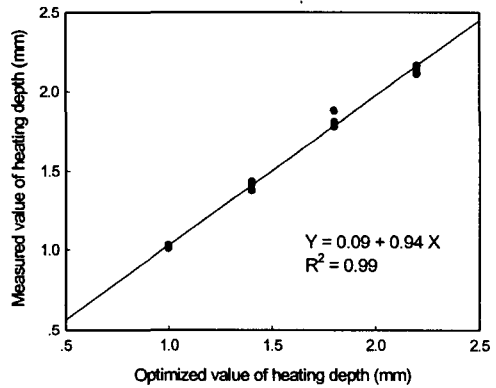


Fig. 3 Relationship between measured and optimized value of heating depth.

Table 5-3 Result of optimization for flame peeling process of chestnut

Implicit constraint ¹⁾	No of iteration	Peeling ratio (%)	Heating depth (mm)	Independent variables ²⁾		
				X ₁	X ₂	X ₃
1.0	96	41.7	0.99	1739	606	21
1.2	125	50.0	1.20	1714	632	22
1.4	39	58.3	1.30	1664	641	24
1.6	56	66.6	1.59	1664	668	26
1.8	127	74.4	1.79	1657	730	24
2.0	52	82.4	1.99	1671	749	26
2.2	102	90.3	2.19	1614	760	27
2.4	76	98.1	2.39	1594	780	29

1) high limit value of the heating depth (mm)

2) X₁ : hardness of the chestnut shells (g/mm²), X₂ : flame temperature (°C)

X₃ : flame time (sec)

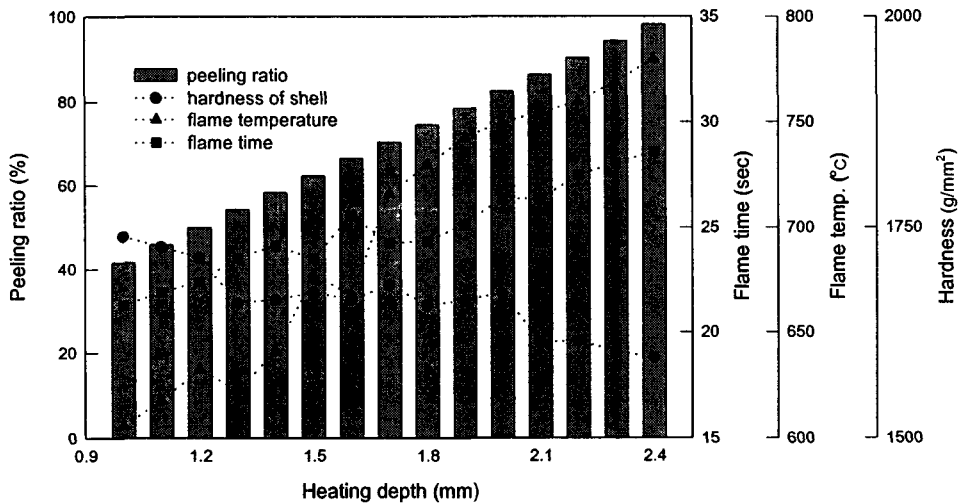


Fig. 4 Result of optimization for flame peeling process of chestnut.