

Application of an Infrared Drying to Drying Process for Red Pepper

高學均*, 趙鏞珍*, 姜錫元*,
H. K. Koh, Y. J. Cho, S. W. Kang

Summary

This study was conducted to investigate the possibility of application of an infrared drying to drying process for red pepper. The performance of ceramic heaters and the variation of temperature and moisture content of red pepper were analyzed during an infrared drying of red peppers. Also, the quality of dried red pepper was analyzed.

The following results were obtained from this study.

1. The surface temperature of infrared heaters and the rising time required for steady state were mainly affected by electrical power consumed.
2. The heat energy required for heating red pepper was proposed to be calculated by the equation in terms of enthalpy of air and net heat flux by infrared heater in a drying chamber. The statistical model for net heat flux was developed.
3. The performance of the infrared heater used for heating red pepper was much affected by the distance of radiation, and the difference of temperatures appeared between the radiated surface and the inside of red pepper.
4. Electrical capacity of the infrared heater had a significant effect on the heating of red pepper. However, the effect of shape of heater on heating was not significant.
5. The variation of temperature of red pepper largely appeared in the range of 30 to 60% (db) in moisture content. The temperature of red pepper was almost constant at low moisture content.
6. The temperature of red pepper and heating time had significant effects on the quality for radiant heating.
7. When the electrical capacity of infrared heater and the distance of radiation are carefully designed in a dryer with the insulated drying chamber, infrared drying might be very effective in red pepper drying.

* 本 研究은 産學協同財團의 1989年度 研究費 支援에 의하여 遂行되었음.

* 서울大學校 農科大學 農工學科

1. 緒 論

고추의 대부분은 그 동안 농가 단위에서 乾燥된 후 별다른 가공없이 유통되었기 때문에 여러가지 문제점들이 제기되어 온 바 최근에는 건고추 및 분말 고추생산에 관련된 문제점들을 해결하기 위한 方案의 하나로 공장 단위에서 고추를 加工하려는 노력이 활발한 시점에 이르렀다.

고추를 공장 단위에서 加工하고자 할 때 여러가지 加工 工程이 필요한데, 특히 乾燥 工程은 많은 에너지와 시간이 필요한 工程이기 때문에 乾燥 工程에 대한 관심이 어느 때보다 커지고 있다. 여기서 공장 단위에서의 乾燥 工程이라고 할 때 수확 직후의 생고추와 농가 단위에서 1차 乾燥한 건고추의 두 가지 형태가 원료로서 사용될 수 있다는 가정하에 공장 단위에서 活用할 수 있는 乾燥 方法이 검토되어야 할 것이다.

우리나라에서는 지금까지 고추를 乾燥할 경우, 농가 단위에서 熱風에 의한 對流 乾燥法을 보편적으로 이용해 왔기 때문에 공장 단위에서 活用할 수 있는 다른 乾燥方法이 적극적으로 검토되어야 할 상황에 이르러 본 研究에서는 赤外線에 의한 輻射 乾燥法을 活用할 수 있는 가능성을 검토하고자 하는 것이다. 이미 高 등(1989)은 건고추를 再乾燥할 때 에너지의 효율적인 측면에서 赤外線에 의한 輻射 乾燥와 熱風에 의한 對流 乾燥를 비교한 바 있다. 그러나 아직 고추 乾燥에서 赤外線 乾燥法에 의한 工程 設計가 어려운 형편이다.

따라서, 본 研究는 우리나라에서 구입이 용이한 赤外線 電熱器의 성능을 분석하고 赤外線 乾燥法에 의한 고추의 乾燥 特性을 분석한 후 고추의 乾燥 工程에서 赤外線 乾燥法을 活用할 수 있는 가능성을 검토하고자 수행되었다.

2. 文獻概要

熱輻射(thermal radiation)는 전자기파 輻射(electromagnetic radiation)의 일종으로서 자외선의 일부 영역과 可視光線 그리고 赤外線 영역을 포함하는데 (Seigel과 Howell, 1981), 물질이 전자기

파를 흡수했을 때 赤外線 영역($0.7\sim 100\mu\text{m}$)에서 열로 잘 변환된다. (Hall, 1962).

赤外線의 흡수 스펙트럼(spectrum)은 물질의 화학적 特性인 분자 구조에 따라서 고유의 성질을 나타내므로 赤外線의 흡수 강도는 분자의 진동에 따른 쌍극자 능률의 변화 비율에 따라 정해진다.(白 등, 1977). 그러므로 물질의 종류에 따라 赤外線의 흡수 영역이 구분되는 특징이 있다. 산소와 수소에 의한 赤外線의 흡수는 무시될 정도이고, 수증기와 이산화탄소는 赤외선을 잘 흡수하는데 수증기에 의한 흡수 영역은 $2.24\sim 3.27$, $4.8\sim 8.5$ 및 $12\sim 25\mu\text{m}$ 이며 이산화탄소에 의한 흡수 영역은 $2.4\sim 3.0$, $4\sim 4.8$ 및 $12.5\sim 16.5\mu\text{m}$ 로 알려져 있다. (Hall, 1962). 이러한 결과로부터 매질이 공기인 경우 공기의 상대습도는 赤外線의 열전달 효과에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 被乾燥物의 함수율이 적외선의 흡수도에 영향을 미치는 바, Hall(1962)은 모래의 함수율이 증가할수록 赤外線 흡수도가 증가하는 것을 기존의 研究 결과를 고찰하여 예시하였다.

한편, 赤外線으로 물질을 가열할 때 赤外線의 침투 깊이는 물질의 가열 효과면에서 대단히 중요한 성질로서 Hallstrom(1988)은 Dagerskog와 Osters-trom (1979)의 研究 結果로부터, 감자의 경우 최고 파장이 $1.12\mu\text{m}$ 와 $1.24\mu\text{m}$ 인 赤外線源의 침투 깊이를 파장별로 예시한 바 있는데 파장범위가 $1.25\mu\text{m}$ 이하에서는 $1.12\mu\text{m}$ 의 최고파장을 가지는 赤外線源의 침투깊이는 4.76mm 이고 최고파장이 $1.24\mu\text{m}$ 인 赤外線源의 침투깊이는 4.17mm 이며 파장범위가 $1.25\sim 1.5\mu\text{m}$ 인 영역에서는 전자의 赤外線源의 경우는 0.48mm , 후자의 赤外線源의 경우에는 0.47mm 라고 소개하였다. 그리고 이와 같은 赤外線源들의 경우에서 파장범위가 $1.51\mu\text{m}$ 이상에서는 침투 깊이가 각각 0.33mm , 0.31mm 였다고 소개하였다. 이러한 결과로 부터 파장이 짧은 赤外線源일수록 赤外線의 침투깊이가 깊다는 사실을 알 수 있지만 한편으로는 赤外線의 침투깊이가 물질의 표면층 근처로 제한된다는 사실도 알 수 있는 바, Hasatani 등(1988)이 silica sand, brick 및 brown coal을 赤外線 輻射 및 熱風 對流의 혼합 가열에 의해 乾燥를 할 때 不透明乾燥模型(opaque drying model)이 乾燥現

象을 잘 설명할 수 있다고 하여 赤外線에 의한 열 전달이 표면가열을 이룬다고 해석한 결과와 비교적 일치하고 있다.

Person과 Sorenson(1962)은 赤外線 輻射에 의해 목초(alfalfa)를 乾燥한 결과 赤外線의 輻射강도가 크고 輻射時間이 길수록 목초의 乾燥率은 크게 나타났으며 최고파장이 각각 1.5, 3.0 및 5.0 μ m인 赤外線源 중에서 輻射강도가 같은 경우에는 3.0 μ m에서 최고에너지를 가지는 赤外線源이 이용될 때 乾燥率이 가장 크게 나타났다고 보고하였다. Kjelgaard(1963)는 석영관 赤外線 램프와 가스연소 赤外線발생기를 이용하여 목초를 乾燥한 결과 거의 같은 乾燥 능력을 보였고, 목초의 줄기를 기계적으로 압착하거나 목초를 짧게 절단하는 전처리를 했을 경우에는 각각 효과가 거의 없거나 乾燥率이 약간 향상되었으며, 1~2분간 가열한 후에는 표면이 타는 것을 방지하기 위해 교반이 필요하다고 보고하였다.

Headley와 Hall(1963)은 375W 赤外線 램프를 이용하여 옥수수 곡립을 乾燥할 때 풍향과 풍속이 크게 영향을 미치는 바 赤外線 放射 방향과 풍향이 일치할 때는 반대의 경우보다 乾燥 시간이 반감되었고 풍속이 지나치게 큰 경우에는 輻射에 의한 가열효과가 나타나지 않았다고 하였다. 또한 곡립층이 두꺼울 때 교반을 위해 진동을 주게 되면 가시적 손상없이 높은 에너지 강도의 赤외선을 이용할 수 있다고 하였다.

Masamura 等(1988)은 최근에 遠赤外線의 식품 산업에의 응용이 큰 관심의 대상이 되고 있음을 소개하고 감자의 乾燥 실험에 遠赤외선을 이용한 결과 輻射에너지의 강도가 클수록 乾燥率이 높게 나타났고, 遠赤外線 電熱器에 공급되는 전력이 클수록 乾燥率이 크게 나타났을 뿐만 아니라 恒率乾燥 期間이 짧아졌다고 보고하였다. 또한 遠赤外線 電熱器의 표면 온도는 흑체의 경우보다 낮게 나타났는데, 이는 對流에 의한 열손실이 있었기 때문이라고 하였다.

高等(1989)은 300W의 봉형과 판넬형, 500W의 판넬형 赤外線 電熱器를 이용하여 건조추를 再乾燥 하였을 때 고추 내부의 온도는 電熱器의 전기용량이 크고 輻射面積이 넓을수록 높게 나타났고, 공기

의 상대습도가 높을수록 고추의 온도는 약간 낮게 나타났으며, 放射거리가 짧을수록 고추의 온도는 높게 나타났다고 하였다. 그러나 고추의 輻射 전후면 사이에 온도 편차가 나타나므로 전표면이 균일하게 가열될 수 있는 方法이 필요하다고 하였다. 그리고 赤外線 輻射乾燥와 熱風 對流乾燥를 비교 실험한 결과 乾燥 유효성의 개념을 도입하였을 때 赤外線 輻射乾燥 方法이 熱風 對流乾燥 方法보다 에너지 이용 효율이 좋다고 보고하였다.

3. 材料 및 方法

가. 實驗材料

실험에 사용된 고추는 농촌진흥청 원예시험장에서 재배된 다복으로서 1989년 8월 7일부터 적숙과를 골라서 수확한 것으로서 수확은 양호한 적숙과를 획득할 수 있을 때까지 일정한 간격을 두면서 계속 이루어졌다. 표1은 수확한 고추의 초기조건을 평균치로 나타낸 것이다.

Table 1. Initial conditions of harvested red pepper (Dabog) for experiment

Property	Mean	SD
MC(%)	80.3	2.5
Weight(g)	7.5	2.0
Length(cm)	10.8	1.6
Thickness of pericarp(mm)	1.6	0.2

나. 實驗裝置

본 研究에 사용된 세라믹 赤外線 電熱器의 사양은 표2와 같고 赤外線 電熱器에 의해 발생되는 放射에너지의 순열 플럭스(net heat flux)를 측정하기 위하여 열류소자(heat flow sensor)가 사용되었으며 그 特性値는 표3과 같다.

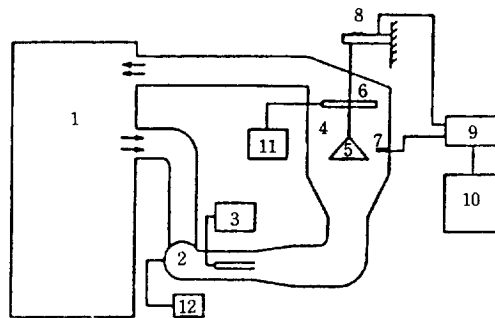
그림 1은 乾燥 實驗에 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것으로 乾燥室 내의 건조 온도과 상대 습도가 일정하게 제어될 수 있는 乾燥 장치가 사용되었으며 송풍관 및 乾燥室은 공기가 균일하게 유동할 수 있도록 설계되었다.

Table 2. The general properties of ceramic IR heaters

Type	Dimension (mm)	Surface area(m ²)	Main material	Surface color
Circular	17φ×245L	0.0131	Zirconium dioxide	Dark gray
Trough A	60W×245L	0.0294	Zirconium dioxide	White
Trough B	60W×245L	0.0294	Zirconium dioxide	Dark gray

Table 3. Characteristic values of the heat flow sensor

Sensitivity constant	Temperature range	Impedance	Material	Size (L×W×T)
0.017mV/(W/m ²)	-20 to 120°C	300Ω	polyester	80×20×1.5mm



1. Air conditioner
2. Motor and fan
3. Heater and controller
4. Drying chamber
5. Tray
6. Infrared generator
7. Temperature sensors
8. Load cell
9. Filter and amp.
10. Data acquisition system
11. Watt-hour meter
12. DC voltage controller

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for the drying test.

한편, 표 4는 실험 및 측정에 사용된 장치의 목록

을 나타낸 것이다.

Table 4. List of experimental and measuring equipments

Item	Specification & remarks
Air conditioner	Vol. 16-Refer Mitamura Riken (Japan)
Experimental dryer	Self-made Drying chamber : 40cm×40cm×60cm
Personal computer for measurement	NEC PC-8001 MK II(Japan)
Load cell	Rated output : 9.2825 mV/10 V Resolution : 1/5000
A/D converter	Conversion time : 25μs Resolution : 12 bit Channel : 8Ch
Filter & amp for load cell	Made by Hando Eng. (Korea)
Subsidiary heater & controller	Heater : 600 W Controller : DDF-120 R/E (Jung Kyung inst.)
Motor & fan	Motor : DC 100W Fan : Centrifugal type
Watt-hour meter	220V, single phase
Temperature sensor & amp.	I) Sensor : Pt 100 Ω Amp. : made by Hando Eng. (Korea) II) CA thermocouple and indicator
Anemometer	Hot wire type
Electric balance	Accuracy : 0.01 gr
Color meter	Double-beam color analyzer, Tokyo Denshoku

다. 實驗方法

赤外線 電熱器의 성능을 평가하기 위하여 먼저 電熱器의 소비 전력, 표면온도, 정상 상태 도달시간 등의 일반 성질을 측정하였고, 열류 소자에 의해 소비 전력에 따른 赤外線 電熱器의 放射 에너지를 매

질(공기)의 온도, 상대습도 및 유속별 뿐만 아니라 매질의 두께(방사거리)별로 측정하였다. 이때의 放射 에너지는 순열플럭스를 의미한다. 표5는 매질의 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 5. Experimental conditions of medium of air

Factor	Range of value
Thickness of medium(h)	0.3~0.5m
Air velocity(v)	0.2~1.0m/s
Dry bulb temperature of air(T)	40.0~80.0℃
Relative humidity of air (RH)	14.5~83.0%

乾燥實驗은 3가지 종류의 赤外線 電熱器에 의해 가열되는 고추의 무게 변화와 온도 변화를 측정하는 方法에 의해 수행되었고 이때의 放射거리는 30 cm로 하였으며 공기의 유속은 0.5m/s로 일정하게 하였다. 乾燥後의 품질을 평가하기 위하여 Capsai-

cin 함량(HPLC法)과 색도를 측정하였으며 熱風에 의해 乾燥된 고추의 품질과 비교 하였다.

4. 結果 및 考察

가. 赤外線 電熱器의 性能

1) 赤外線 電熱器의 一般 性質

赤外線 電熱器의 放射 強度(radiant intensity)는 電熱器의 소비전력과 표면 온도에 의해 영향을 받는다 (Hasatani 등, 1988)고 알려져 있기 때문에 電熱器의 소비 전력, 표면온도, 정상상태 도달 시간을 측정하여 표 6에 나타내었다.

Table 6. The general properties of ceramic IR heaters

Type	P _e (kW)	t _{ss} (min)	T _s (℃)	Remarks
Circular	0.25	13	370	Environmental conditions of stagnant air: 29.9℃ 40% RH
Trough A	0.25	15	320	
Trough B	0.43	10	450	

Notes) P_e : Consumed electrical power
t_{ss} : Rising time for steady state
T_s : Surface temperature of IR heater

표6에서 보는 바와 같이 소비전력이 동일한 電熱器의 경우 電熱器의 表面積이 큰 트로프 A형 (trough A type)에서 정상상태 도달시간이 원형(circular type)보다 길고 표면 온도는 낮게 나타났다. 이러한 원인은 Hasatani 등(1988)이 지적한 것과 유사한 현상으로 電熱器 表面積의 차이로 인하여 電熱器의 표면에서 對流에 의한 열손실이 다르게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 동일한 형상과 크기를 가지는 赤外線 電熱器의 경우에는 소비전력이 큰 電熱器의 표면온도가 당연히 높게 나타났으며 정상상태 도달시간은 짧게 나타났다.

개방 포함)에서 赤外線 電熱器가 상단에 설치되어 있을 때 공기의 조건에 따라서 전달되는 순열플럭스를 측정하는 데 편리하게 사용될 수 있다.

만약 乾燥室 안에서 공기의 유동만 있다면 被乾燥物에 제공되는 에너지는 공기의 엔탈피로 계산될 수 있다. 그러나, 이러한 경우 乾燥室內에 열류소자를 설치하여 순열플럭스를 측정하면 이상적으로 그 값은 0이 된다. 즉, 열류소자의 上下面 온도가 같게 되어 다음 (1)식과 같은 관계를 갖게 된다.

$$T_2 = T_1$$

$$\therefore q_n = \frac{1}{R} (T_2 - T_1) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 q_n : 열류소자에 의해 측정된 순열플럭스 (W/m²)

R : 열저항(m²℃ / W)
T₁ : 열류소자 하면의 온도(℃)
T₂ : 열류소자 상면의 온도(℃)

2) 赤外線 電熱器의 放射에너지

가) 순열플럭스에 관한 考察

열류소자는 열전달의 3가지 유형, 즉, 輻射, 對流 및 전도에 의한 순열플럭스(net heat flux)를 측정하는 소자로서, 乾燥室과 같이 폐쇄된 공간(부분

한편, 乾燥室의 상단에 赤外線 電熱器를 설치할 경우 赤外線 電熱器와 마주보는 면과 반대편 면 사이에는 온도의 차이가 있기 때문에 열류소자에는 순열플럭스가 존재하게 되어 다음 (2)식으로 표현된다.

$$T_2 > T_1$$

$$\therefore q_n = \frac{1}{R} (T_2 - T_1) > 0 \dots\dots\dots (2)$$

그러므로 乾燥室의 상단에 赤外線 電熱器가 설치되어 있을 때 電熱器와 마주보는 면에서 받을 수 있는 열에너지는 다음 (3)식으로 표현된다.

$$\therefore q_n = \frac{1}{R} (T_2 - T_0) = \frac{1}{R} (T_1 - T_0) + q_n \dots (3)$$

여기서 q_n : 電熱器와 마주보는 면에서 받는 열플럭스 (W/m^2)

T_0 : 임의의 기준온도($^{\circ}C$)

(3)식에서 $\frac{1}{R} (T_1 - T_0)$ 은 공기의 유동으로 인하여 직접 주어지는 양이 대부분이므로 근사적으로 공기의 엔탈피로부터 계산가능하다고 가정할 수 있다. 따라서 (3)식은 다음 (4)식과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$q_n = h \cdot V/v + q_n \dots\dots\dots (4)$$

여기서 h : 공기의 엔탈피(J/kg)

v : 공기의 비체적(m^3/kg)

V : 공기의 속도(m/s)

결국 (4)식의 관계에서 알 수 있듯이 공기의 조건과 소비전력에 따른 赤外線 전열기의 순열플럭스를 안다면 乾燥室 내에서 얻을 수 있는 열에너지를 구할 수 있게 된다.

나) 공기 조건에 따른 赤外線 電熱器의 순열플럭스

일반적으로 赤外線의 輻射에너지는 매질의 조건에 의해 영향을 받는다 (Hall, 1962). 본 研究에서는 소비전력에 따른 赤外線 電熱器의 순열플럭스가 매질(공기)의 조건에 의해 받는 영향을 중회귀분석을 통하여 수식화하였다. 먼저 순열플럭스에 영향을 주는 요인으로 매질의 두께, 건구온도, 상대습도 및 유속을 선택하여 예비분석을 한 결과 온도의 영향이 미약하게 나타났기 때문에 온도 요인을 제외하고 나머지 3가지 요인과 그들의 상호작용에 의한 영향을 분석하고자 하였다. 표 7은 각 요인들은 나열하고 조합 가능한 중회귀 모형의 수를 표시한 것이다.

Table 7. Factors included in statistical models and number of possible combinations

Factors	h, V, RH, h×V, h×RH, V×RH
No. of combinations	33

Notes) h : thickness of medium(m)

V : air velocity (m/s)

RH : relative humidity of air (dec.)

표 7에 나타난 요인들에 의해 구성되는 중회귀모형의 변수 선택은 SAS/STAT(version 6.04)의 RS-SQUARE procedure를 이용하여 분석한 결과 결정계

수와 Mallows의 C_p 값에 의해 표8과 같이 이루어졌다. 여기서 결정계수는 큰 값일수록, C_p 값은 작을수록 좋은 모형이 될 가능성이 크게 된다.

Table 8. Selected variables for multiple regression models

Selected variables	R^2	C_p
$f_1(V, RH, h \times RH, V \times RH)$	0.9047	4.095
$f_2(h, V, RH, h \times RH, V \times RH)$	0.9048	6.000
$f_3(V, RH, h \times RH)$	0.8881	20.128

표 8에 나타난 변수들로 구성되는 3가지 중회귀 모형에 대해서 모수(parameters)를 추정하고 가장 적합한 모형을 선택하기 위하여 SAS/STAT의 REG procedure에 의해 중회귀분석을 실시한 결과 매질의 조건에 따른 赤外線 電熱器의 순열플럭스는 다음 (5)식과 같이 표시되었다. 여기서 소비전력이 430W인 赤外線 電熱器가 사용되었다.

$$q_{nn} = 2.542 - 1.268V + 1.891RH - 8.312h \cdot RH + 1.117 \cdot RH \dots\dots\dots (5)$$

(adjusted R²=0.9010)

여기서 q_{nn} : 단위 소비전력당 赤外線 電熱器의 순열플럭스(W/Wm²)
 V : 공기의 속도(m/s)
 RH : 공기의 상대습도(dec.)
 h : 매질의 두께(放射거리) (m)

한편, 赤外線 電熱器의 소비전력은 방사 강도에 영향을 미치는데 250W의 전기용량을 갖는 원형과 트로프 A형의 경우 형상에 따른 방사강도의 차이는 별로 발견되지 않았고 전기용량에 따라 거의 비례적으로 방사강도가 나타났기 때문에 (5)식을 이용하여 순열플럭스를 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 2~4는 각각 공기의 두께, 상대습도 및 속도가 단위 소비전력당 赤外線 電熱器의 순열플럭스에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 각각의 요인의 값이 증가할수록 순열플럭스는 감소하는 경향을 보였으나 그들의 상호 작용에 의해 약간 증가하는 경우도 발생하였다.

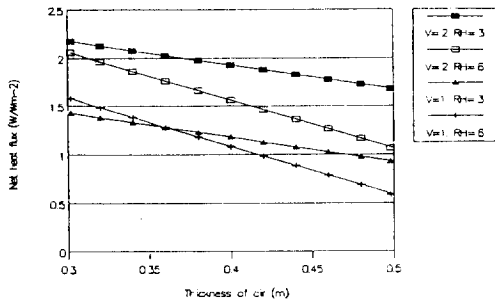


Fig. 2. The effect of thickness of air on net heat flux of ceramic IR heater per unit consumed electrical power.

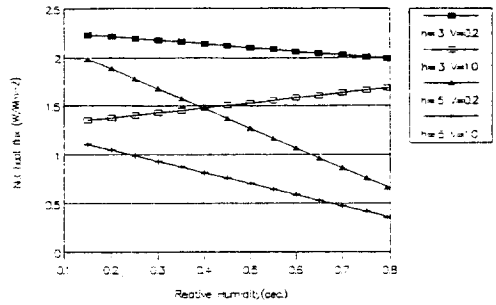


Fig. 3. The effect of relative humidity of air on net heat flux of ceramic IR heater per unit consumed electrical power.

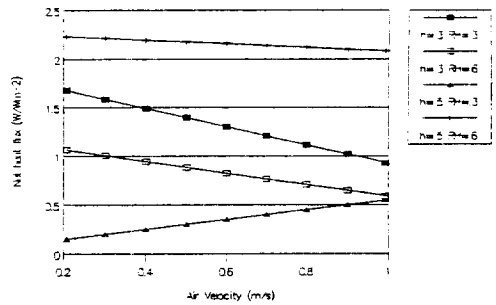


Fig. 4. The effect of air velocity on net heat flux of ceramic IR heater per unit consumed electrical power.

나. 고추의 乾燥 特性

1) 輻射거리에 따른 고추의 온도 변화

被乾燥物의 乾燥常數는 被乾燥物의 온도에 의해 영향을 받는다. (趙와 高, 1986). 赤外線 輻射에 의해 고추가 가열될 때 고추의 온도 변화는 乾燥特性과 밀접한 관계를 가지기 때문에 여기에 대해서 살펴보고자 한다.

표 9는 실온에서 赤外線 電熱器에 의해 輻射 거리가 고추의 온도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 輻射거리에 따른 고추의 가열 효과는 큰 차이를 나타낸 바 輻射거리가 짧을수록 고추의 온도는 크게 상승하였을 뿐만 아니라 고추 표면과 내부의 온도차이가 크게 발생하였다. 한편 赤外線 電熱器의 형상이 다르더라도 전기 용량이 같을 경우에 고추의 가열 효과는 차이를 거의 보이지 않았고, 전기 용량이 다른 경우 고추의 가열 효과는 큰 차이를 보였다. 그리고 赤外線 輻射에 의

Table 9. The effect of distance of IR radiation on the temperature of red pepper in the room temperature.

Distance	Type of IR heater	mc	T _{so}	T _{io}	T _{se}	T _{ie}	t
40 cm	Circular	81.7	29.8	28.9	54.8	52.6	30
	Trough A	80.5	29.4	29.2	54.4	52.9	30
	Trough B	80.4	30.1	29.6	62.9	58.5	30
30 cm	Circular	76.8	30.3	30.3	59.5	55.4	30
	Trough A	83.5	29.4	28.9	60.0	55.9	30
	Trough B	80.5	30.2	29.7	77.7	72.6	30
20 cm	Circular	82.0	30.0	29.5	68.6	61.6	30
	Trough A	79.8	29.0	28.8	71.0	64.1	30
	Trough B	81.2	29.3	29.0	92.1	81.9	30

Notes) mc : moisture content (% wb)
 T : temperature (°C)
 t : elapsed time(min.)
 sub s : upper surface of red pepper
 sub i : inside of red pepper
 sub o : initial
 sub e : after t

해 30분 동안 고추를 가열한 후 고추의 표면 색도를 육안으로 관찰한 결과, 트로프 B형의 赤外線 電熱器가 사용되었을 때 輻射거리가 30cm와 20cm인 경우 고추의 표면 색도는 흑적색으로 변하는 상태를 보였고, 원형과 트로프 A형의 赤外線 전열기가 사용되었을 때는 輻射거리가 20cm인 경우에만 흑적색으로 변하는 상태를 보였다. 이러한 결과로부터 고추의 품질을 고려한다면 赤外線 電熱器의 전기용량에 따라서 輻射거리가 제한되어야 함을 알 수 있다.

2) 고추의 溫度 變化

건조과정시 고추에 투입되는 열에너지는 고추의 온도 상승과 수분 증발에 이용되므로 예열기간을 지난 고추는 假定常狀態(pseudo-steady state)에 도달하게 된다. 여기서 假定常狀態라고 하는 것은 예열기간을 지난 고추의 온도가 일정한 온도를 계속 유지하는 것이 아니라 시간이 경과함에 따라 함유 수율이 감소함으로써 수분 증발에 소요되는 증발잠열이 점점 감소하게 되는 만큼 고추의 온도는 점점 증가되는 상태를 의미한다.

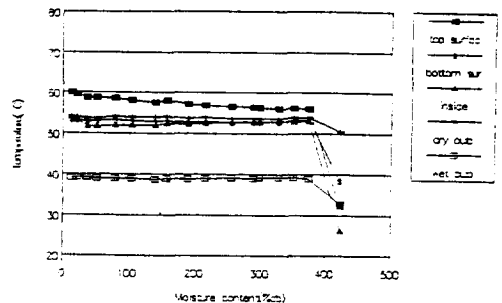


Fig. 5. Variation of temperature of each section with respect to moisture content in red pepper during heating by circular type IR heater (radiation distance=30cm).

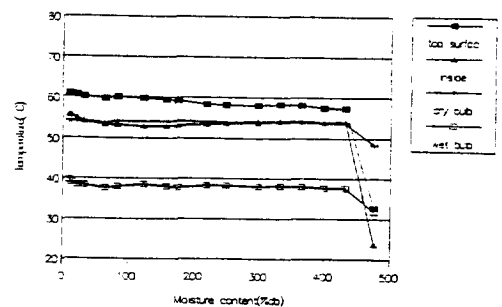


Fig. 6. Variation of temperature of each section with respect to moisture content in red pepper during heating by trough A type IR heater (radiation distance=30cm).

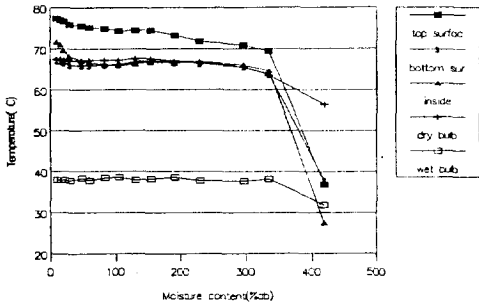
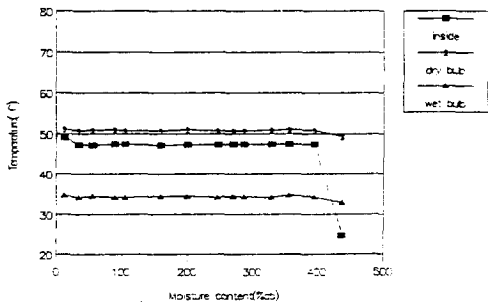
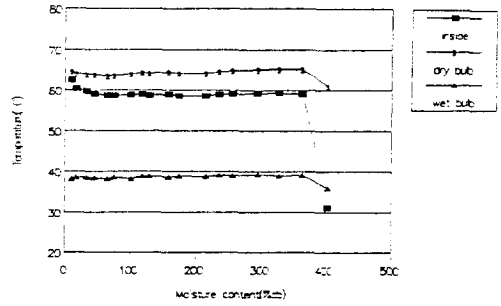


Fig. 7. Variation of temperature of each section with respect to moisture content in red pepper during heating by trough B type IR heater (radiation distance=30cm).

그림 5~7은 赤外線 電熱器에 의해 고추를 가열할 때 고추의 上面, 内部 및 下面온도를 함수율의 변화에 따라 나타낸 것이다. 고추 가열시 輻射거리 는 30cm, 공기의 유속은 0.5m/s이었다. 그림에서 보는 바와 같이 원형과 트로프 A형의 赤外線 電熱器에 의해 고추가 가열될 때 고추의 상면 온도는 乾燥室의 건구온도보다 평균 4°C 정도 높게 나타났으며 트로프 B형의 경우에는 약 7.5°C 높게 나타났다. 반면에 고추의 하면 온도는 어느 경우에서나 모두 乾燥室의 건구 온도와 거의 같은 온도로 유지되었다. 다만 고추의 내부 온도는 3가지 경우 모두 乾燥室의 건구온도보다 약간 낮은 수준을 유지하다가 함수율이 낮아지면서 오히려 높아지는 경향을 보였다. 그러나, 고추의 함수율이 30~60% (db) 이상의 고함수율에서는 함수율 변화에 따른 고추의 각 부위별 온도 변화는 완만한 경향을 보인 반면에 30~60% (db)의 함수율 범위에서는 함수율 변화에 따른 고추의 상면온도와 내부 온도의 변화는 크게 나타났고 특히 내부온도의 변화는 더욱 크게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 8. Variation of inside temperature of red pepper with respect to moisture content during heating by hot air.

한편, 그림 8은 熱風에 의해 고추를 가열할 때 함수율 변화에 따른 고추 내부의 온도 변화를 나타낸 것이다.

앞에서 살펴본 바에 의하면 함수율이 낮은 상태에서 고추의 내부 온도는 乾燥室의 건구온도보다 약간 높은 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 1차 乾燥된 고추를 再乾燥할 때 나타나는 고추의 온도변화를 살펴보고자 한다.

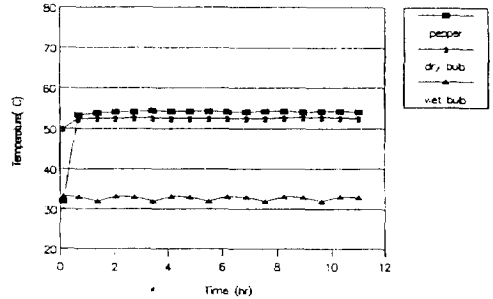


Fig. 9. Inside temperature of red pepper during heating by circular IR heater ($M_0=27.1\%$ db, $M_1=9.96\%$ db).

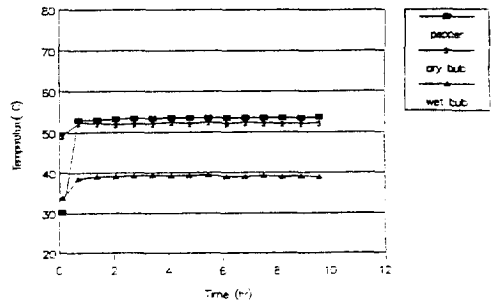


Fig. 10. Inside temperature of red pepper during heating by trough A IR heater ($M_0=25.7\%$ db, $M_1=9.80\%$ db).

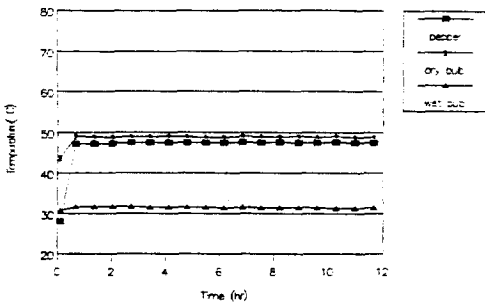


Fig. 11. Inside temperature of red pepper during heating by hot air ($M_o=26.8\%$ db, $M_f=10.8\%$ db).

그림 9와 10은 저함수율은 고추를 赤外線 輻射에

의해 가열할 때 고추의 내부 온도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간에 따른 고추의 온도 변화는 거의 나타나지 않았고 고추의 내부온도는 乾燥室의 건구온도보다 1.5~2.0°C 높은 상태를 유지하였다. 그림 11는 熱風에 의해 고추를 가열했을 때 고추의 내부온도를 나타낸 것이다.

3) 고추의 함수율 변화

乾燥特性은 加熱方法, 공기의 건습구 온도, 유속 등에 의해 결정된다. 赤外線 輻射 乾燥에 의한 乾燥特性을 살펴보고 熱風 對流 乾燥에 의한 결과와 비교해 보고자 표 10과 같은 乾燥 조건에서 乾燥 실험을 한 결과를 그림 11에 나타내었다.

Table 10. Drying conditions for the experiment

Test no	Energy source	Temperature of drying chamber		Moisture content		Air velocity (m/s)	Radiation distance (cm)
		dry bulb (°C)	wet bulb (°C)	Initial (% db)	Final (% db)		
1	Circular IR heat	54	39	422.9	10.6	0.5	30
2	Trough A IR heat	55	40	475.5	10.5	0.5	30
3	Trough B IR heat	69	46	419.4	4.7	0.5	30
4	Hot air	65	39	403.4	9.7	0.5	—
5	Hot air	50	35	437.0	12.8	0.5	—

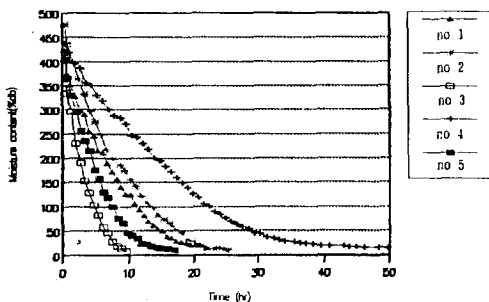


Fig. 12. Drying curves of red pepper under the various conditions.

그림 12에서 보는 바와 같이 열원에 따른 고추의 건조소요시간은 트로프 B형 전열기, 65°C의 熱風, 원형 赤外線 電熱器, 트로프 A형 赤外線 電熱器, 50

°C의 熱風의 순으로 짧게 나타났다. 일반적으로 被乾燥物의 온도가 높고 공기의 상대습도가 낮을수록 건조소요시간은 짧게 나타나는 바 여기서도 동일한 경향을 보였다. 다만 원형과 트로프 A형 사이에서 약간의 차이가 발생하는 것은 고추의 초기 함수율이 원형의 경우에서 트로프 A형의 경우보다 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 결국 고추의 乾燥特性은 고추의 온도와 乾燥室의 공기조건에 의해 결정된다고 추측되는 바 열원으로 熱風 대신 赤外線을 사용하면 에너지의 효율면에서 유리하리라 판단된다.

다. 품질에의 영향

乾燥과정시 赤外線 電熱器에 의해 가열된 고추의

품질을 평가하기 위하여 고추의 대표적인 신미성분인 캡사이신(capsaicin)의 함량을 HPLC法에 의해 정량하였고 고추의 외관 색도를 Hunter 방식에 의

해 측정하였으며 고추의 과피를 육안으로 관찰하였다.

Table 11. The capsaicin content after heating raw red pepper.

Heating method	Heated time(hr)	Capsaicin ($\mu\text{g/g}$)	Radiation distance(cm)
IR radiation (circular)	34.8	36.10	30
IR radiation (trough A)	17.2	102.91	30
IR radiation (trough A)	35.5	140.20	30
IR radiation (trough B)	25.6	15.76	30
Hot air convection (50°C)	54.0	275.18	—
Hot air convection (65°C)	18.0	94.57	—
Hot air convection (65°C)	32.0	86.37	—
Hot air convection (70°C)	10.0	60.21	—

표 10은 赤外線 輻射 및 열풍 對流에 의해 주어진 시간동안 가열한 고추의 캡사이신 함량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 고추를 높은 온도로 장시간 가열할수록 캡사이신의 함량은 감소하는 것으로 나타났다. 특히 트로프 B형의 赤外線 電熱器로

30cm의 輻射거리에서 장기간 가열할 경우 캡사이신의 함량은 크게 감소한 것을 알 수 있다. 다만 원형의 赤外線 電熱器로 가열했을 때 캡사이신의 함량이 매우 낮게 나타난 것은 오차와 다른 요인 때문인 것으로 판단되었다.

Table 12. The color of surface of red pepper after heating.

Heating method	Heated material	Heated time(hr)	ΔL	Δa	Δb
IR(circular)	raw red pepper	34.8	-67.18	10.50	3.62
IR(trough A)	raw red pepper	17.2	-66.72	12.14	4.84
IR(trough A)	raw red pepper	35.5	-64.84	12.07	5.65
IR(trough B)	raw red pepper	25.6	-67.77	8.83	3.31
Hot air(50°C)	raw red pepper	54.0	-66.41	12.64	4.88
Hot air(65°C)	raw red pepper	18.0	-67.00	9.32	3.33
Hot air(65°C)	raw red pepper	32.0	-67.21	9.96	3.57
Hot air(70°C)	raw red pepper	10.0	-68.48	11.09	4.13
IR(circular)	dried red pepper	11.2	-66.48	9.32	3.28
IR(trough A)	dried red pepper	9.6	-65.55	10.00	4.06
Hot air (50°C)	dried red pepper	11.8	-66.41	9.59	2.97

Notes) Δ : difference between standard and measured values

L : lightness

a : (+) fredness, (0) gray and (-) greenness

b : (+) yellowness, (0) gray and (-) blueness

dried red pepper : dried at 50°C in an air oven during 40 hrs

표 11은 赤外線 輻射 및 熱風 對流에 의해 주어진 시간 동안 가열한 고추의 표면 색도를 측정하여 나타낸 것이다. ΔL , Δa 및 Δb 값이 클수록 밝은 적색을 나타내므로 바람직한 고추의 외관 색도라 할 수 있다. 생고추를 熱風으로 가열할 경우 가열 온도가 낮을수록 밝은 적색을 띠는 것을 알 수 있다. 熱風의 온도가 70°C인 경우에는 적색도는 높은 반면에 ΔL 값이 작아져서 어두운 적색을 띠므로 바람직한 색도라도 보기는 어렵다. 赤外線 輻射에 의해 고추를 가열할 경우에는 원형과 트로프 A형의 赤外線 電熱器가 사용되었을 때의 색도는 50°C의 熱風의 경우와 비슷한 수준을 나타내었고 트로프 B형의 赤外線 電熱器가 사용되었을 때만 적색도 및 황색도의 수준이 떨어질 뿐만 아니라 명도도 낮아지는 것으로 나타났다. 한편, 1차 乾燥된 고추를 재가열할 경우에도 원형과 트로프 A형에 의한 赤外線 輻射와 50°C의 熱風 對流에 의한 가열시에 색도의 차이가 거의 나타나지 않았다.

그런데, 熱風 對流에 의해 고추를 가열할 경우 고추 표면의 색도는 全面積에서 고르게 나타나지만 赤外線 輻射에 의해 고추를 가열할 경우에는 赤外線 電熱器와 마주보는 고추의 輻射面과 후면 사이에서 색도의 차이가 발견되었다. 육안으로 관찰하였을 때 원형과 트로프 A형에 의해 30cm의 輻射거리에서 고추가 가열되었을 경우에는 그 차이가 무시할 정도였다. 다만 트로프 B형에 의해 30cm 輻射거리에서 가열되었을 경우에는 차이가 크게 나타났을 뿐만 아니라 輻射面의 색도는 심한 흑적색을 띄었다.

결론적으로, 고추의 표면온도 및 내부온도 特性과 함께 종합적으로 고찰해 보면 고추가 약 70°C 이상의 고온으로 장시간 유지되면서 심각한 품질 변화를 초래할 우려가 있는 것으로 판단된다.

라. 赤外線 乾燥法の 活用 方案

赤外線 乾燥法은 被乾燥物의 가열 特性인 방향성과 표면층 가열로 인해 농산물 乾燥 분야에서의 活用이 제약을 받아 왔다. 그러나 赤外線 乾燥法은 에너지 이용효율이 우수하기 때문에 被乾燥物의 물리적 성질에 따라서 농산물의 乾燥에도 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

여기서는 研究結果로부터 고추의 乾燥 工程에 赤外線 乾燥法을 活用할 수 있는 方案에 대해서 검토하고자 한다. 고추는 과피, 씨, 태좌 및 줄기로 구성되어 있는 바 과피의 乾燥가 고추 전체의 乾燥를 지배하게 된다. 그런데 과피는 수확 직후의 두께가 2mm 내외이고 함수율이 감소할 수록 두께가 얇아지므로 赤外線의 침투 깊이 측면에서 매우 유리하다.

赤外線 電熱器의 전기용량을 선택할 때 輻射거리를 고려해야 한다. 研究결과에 의하면 250W의 赤外線 電熱器를 30cm의 輻射거리를 유지할 때 고추의 복사면 온도는 약 60°C를 유지하게 된다. 이때 고추의 가열은 赤外線 輻射뿐만 아니라 赤外線 電熱器에 의해 가열된 공기로 인해 對流 효과도 비교적 크게 나타나서 고추표면의 온도가 편차를 갖는 것을 줄이는 데 효과적이다. 그러므로 乾燥室의 벽면을 단열 처리하고 유동 공기가 赤外線 電熱器에 의해 충분히 가열된 후 고추를 통과할 수 있도록 乾燥室을 설계한다면 더욱 효과적이다.

고추의 수분이 낮은 상태 즉, 고추의 再乾燥 工程에 赤外線 乾燥法을 이용할 경우에는 특별한 교반 시설이 없이 赤外線 電熱器의 전기용량과 輻射거리를 적절히 선택하는 것만으로도 乾燥 과정을 수행할 수 있으나 초기함수율이 매우 높은 고추를 乾燥하고자 할 경우에는 고추의 전표면이 고르게 赤外線에 노출될 수 있도록 적의선 電熱器를 여러 방향으로 설치하든지 고추를 뒤집을 수 있는 교반시설을 설치하면 매우 효과적으로 乾燥 과정을 수행할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 고추의 乾燥 공정에서는 赤外線 乾燥法을 活用할 수 있는 방안을 모색하고자 수행되었다. 우선 赤外線 電熱器의 성능을 분석하고 赤外線 輻射에 의해 고추가 가열되었을 때 고추의 온도 및 함수율 변화, 품질을 분석한 바 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 赤外線 電熱器의 표면 온도, 정상상태 도달시간은 주로 소비전력에 의해 영향을 받았다.

2) 고추에 전달되는 열에너지는 乾燥室 공기의 엔탈피와 赤外線 電熱器에 의한 순열플럭스로 계산될 수 있도록 하였다. 이때 순열플럭스에 관한 식은 통계적 모형으로 제시되었다.

3) 輻射거리에 따른 고추의 가열 성능은 크게 영향을 받았을 뿐만 아니라 고추의 輻射面과 내부 사이에 온도 편차가 나타났다.

4) 고추의 가열 성능은 적외선 전열기의 전기용량에 의해 크게 영향을 받았지만 형상에 의한 영향은 무시될 정도였다.

5) 赤外線 輻射에 의한 고추 가열시 각 부위별 온도 변화는 함수율이 30~60% (db) 범위에서 크게 나타났으나 저함수율 수준에서 함수율에 따른 온도 변화는 거의 나타나지 않았다.

6) 赤外線 輻射乾燥에 의한 고추의 건조소요시간은 열풍 대류 乾燥의 경우와 마찬가지로 고추의 온도에 의해 영향을 받았다.

7) 赤外線 輻射에 의한 가열시 고추의 품질은 고추의 온도와 가열 시간에 의해 영향을 받았다.

8) 단열이 잘 된 乾燥室에서 赤外線 電熱器의 전기용량과 輻射거리를 유의깊게 선택한다면 赤外線 乾燥室을 고추 乾燥에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

nce. London.”)

5. Hall, C. W., 1962. Theory of infrared drying. Trans. of ASAE 5(1) : 14-16.
6. Hasatani, M., Y. Itaya and K. Miura. 1988. Hybrid drying of granular materials by combined radiative and convective heating. Drying Technology 6(1) : 43-68.
7. Headley, V. E. and C. W. Hall. 1963. Drying of shelled corn vibrated in an infrared source. Trans. of ASAE 6(2) : 148-150.
8. Kjeigaard, W. L., 1963. Hay Drying with selected infrared sources. Trans. of ASAE 6(3) : 324, 327.
9. Masamura, A. et al., 1988. Drying of potato by far infrared radiation. Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi 35(5) : 309-314.
10. Person, N. K. and J. W. Sorenson. 1962. Drying hay with infrared radiation. Agr. Eng. 43(4) : 204-207.
11. Siegel, R and J. R. Howell. 1981. Thermal radiation heat transfer. Hemisphere Publishing Corporation. Washington.

參 考 文 獻

1. 고헌균, 조용진, 박재복, 김용현, 강석원. 1989. 건고추의 재건조 공정에서 에너지의 효율적 이용 : 열풍 대류 및 적외선 복사건조. 韓國農業機械學會誌 14(4) : 262-271.
2. 白南豪 等(共譯). 1977. 大學機器分析. 서울.
3. 趙鏞珍, 高學均. 1986. 고추의 乾燥特性和 건조 모델에 관한 研究. 韓國農業機械學會誌. 11(1) : 52-63.
4. Dagerskog, M. and L. Osterstrom. 1979. Infrared radiation for food processing I : a study of the fundamental properties of infrared radiation. SIK (Swedish Food Institute). Gothenburg (In "Hallstrom, B. et al., 1988. Heat transfer and food products Elsevier Applied Scie-