

## 원적외선 가열에 의한 고추의 건조특성 Drying Characteristics of Red Peppers by Infrared Heating

배내경\*, 이종봉\*, 상희선\*\*  
Bae-Nae Kyung\*, Lee-Jong Bung\*, Sang-Hie Sun\*\*

### <Abstract>

Infrared heating has been traditionally used in industrial applications for processes such as dehydration of food industrial. This heating method involves the application of radiation in the wavelength range of 5~50 micrometers. In this work, simultaneous heat balance equations were developed to simulate the infrared radiation heating of red peppers. The equations assume that moisture diffuses to the outer boundaries of the material in liquid form and evaporation occurs at the surface of the red peppers. Energy for moisture evaporation is supplied by the infrared radiant energy. The equations were validated with experimental data on surface temperature and average moisture content of red peppers. Average deviations of predicted surface red peppers temperature and average red peppers moisture from experimental data were 323~353K and 50~80%, respectively. The spectral extinction coefficients in the wavelength range  $1.5 < \lambda < 27$  micrometer at 293K for Red Peppers were determined from results of reflection measurements and the four flux radiative heat transfer calculation. The radiation extinction coefficients were obtained from effective drying factor the temperature 373K.

**Key Words** : 4-Flux Model, Infrared Ray Drying, Red Pepper  
Extinction Coefficient Extinction Coefficient,

### 1. 서론

건조는 제조공정에서 품질의 고급화와 고속화에 절대적인 영향을 주는 설비중의 하나이다. 현재, 고추 건조기는 열풍대류 건조방식이 대부분이나

열풍의 대류현상에 따른 고온성충으로 효율이 낮고, 맛이 떨어지고, 복원력이 감소하는 등의 문제가 많다. 또한 원적외선에 대한 일반적인 서술 및 농·수산물, 종이 등의 건조에 대한 연구결과<sup>1)~10)</sup>는 많으나, 고추의 건조에 대한 연구는 적다. 현

\* 경남대학교 기계공학부  
631-701 경남 마산시 월영동 449  
E-mail : nkbbae@kiu.ac.kr

\*\* 경일대학교 산업시스템공학부 교수,  
712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33  
E-mail : Sanghs@kiu.ac.kr

재, 원적외선을 전열기구로 사용하는 기술은 식품 산업에 있어서 건조, 소성, 배소공정 등에 있어서 필수적이며, 가정용의 조리에도 폭넓게 이용되고 있다. 이러한 경우에 원적외선효과로써 단순히 전열효과뿐만이 아니고, 그 제품의 식감, 식미, 풍미가 중요시된다. 이들의 효과의 확인에는 충분히 신뢰할 수 있는 관능검사가 필요하게 되며, 무조건적인 원적외선의 효과라고 관련하여 설명하는 것은 무리다.

본 연구에서는 원적외선 고방사 세라믹스 재료를 코팅한 원적외선 건조시스템을 개발하여 고추 건조에 적용하여, 기존의 열풍대류 건조시스템과 비하여 기대이상의 성과를 얻었으므로 그 결과를 보고한다.

## 2. 실험 및 결과

원적외선 건조기는 연소장치, 원적외선 방사판 및 반사판, 온도제어기 등으로 구성되어 있으며, 원적외선 방사판과 반사판은 원적외선 고방사 세라믹스 재료를 코팅하여 원적외선 방사율의 파장이 0.5~15 $\mu$ m에서 0.93이상인 재질을 개발하여 사용하였으며, 판의 뒷면에는 열효율을 높이도록 제작하였다. 방사판과 반사판은 방사온도에 대한 복사율을 측정하여 고추의 열수지를 계산하였다.

### 2.1 실험장치

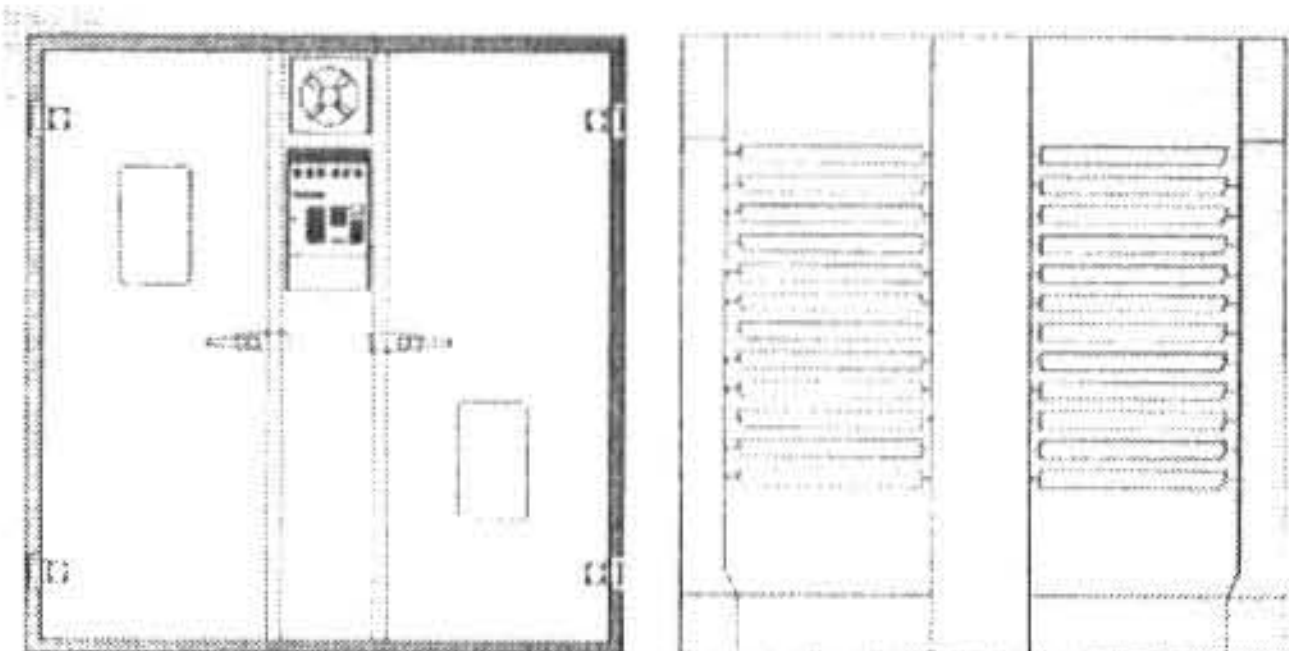


Photo. 1 Inner and outside of infrared ray dryer

건조시스템은 고추의 크기와 함수율에 따라서 건조를 조절할 수 있도록 방사판의 온도와 환풍량을 제어할 수 있도록 하였다. 또한 고추 건조시에 발생하는 수분을 건조기내의 습도가 설정이상 이 되면 배출하기 위하여 배기팬을 부착하였으며, 고추를 균일하게 가열하고, 초기온도 상승시간 단축 및 고추의 온도분포를 일정하게 하도록 원적

외선 방사판을 배치하였으며, 건조기의 외관 및 내면도는 다음사진과 같다.

본 고추 원적외선 건조기는 내부온도가 설정치에 도달하면 PID 제어기에 의하여 버너의 유량을 조절하여, 부하의 변동에 따라 연소량을 조절 되도록 하였으며, 고추는 수동으로 장입하도록 하였다.

### 2.2 온도측정

원적외선 방사의 성능평가 방법으로 건조기 내부 공간의 온도분포를 측정하기 위하여 K열전대로 29 point를 측정토록 설치하고, 다점점 온도기록계에 연결하여 2분간격으로 건조기 승온시간에 따른 온도분포와 방사판과 건조되는 고추의 거리에 따른 온도분포를 측정하였다.

방사판의 거리에 따른 내부온도분포를 알아보기 위하여 측정센서를 상하로 이동할 수 있도록 하여 측정하였다.

### 2.3 원적외선 건조기와 열풍대류 건조기의 온도분포 비교

기존의 열풍대류 건조기와 원적외선 건조기의 온도분포 특성분석을 위해 방사튜브로부터 거리를 다르게 하여 그 위치별로 9 point를 측정하였다.

원적외선 건조기는 중앙부분이 약 70 $^{\circ}$ C 정도로 약간 높으나 전체적으로 69 $^{\circ}$ C로 내외로 균일한 온도를 유지하여 건조되었으나, 열풍 건조기는 68 $^{\circ}$ C 정도로 가열되나 피가열물이 측에서는 약71 $^{\circ}$ C 정도로 건조기 내부온도가 불균일하여 고추가 불균일하게 건조됨이 확인되었다.

또한 고추의 위치에서 온도분포를 알아보기 위하여 센서를 하측에 위치하여 측정한 결과, 원적외선 건조기는 68~70 $^{\circ}$ C 사이에서 고추의 가열건조로 인하여 제품에 영향을 주지 않고 건조되고 있으나 열풍대류 건조기는 66.8~71.8 $^{\circ}$ C사이의 불균일 온도분포를 보여 건조과정이 부분적 과열이 되는 것이 확인되었다.

### 2.4 풍량변화에 의한 온도의 분포

원적외선 건조기에 있는 순환팬의 댐피 스위치는 10단계로 조정할 수 있게 되어 있으며, 위치조정에 의하여 풍량을 변화 시킬 수 있다.

풍량변화에 따른 원적외선 건조기 내부온도분

포를 측정된 결과 댐퍼의 위치에 크게 영향을 받지 않는다.

또한 적외선 건조방식과 열풍대류 건조방식의 성능을 알아보기 위하여 건조기 내부에 투입되는 고추의 샘플을 채취하여 건조전·후의 무게를 측정된 결과, 건조시간이 풍량이 높을수록 건조시간이 단축되나, 어느 시간 이상에서는 영향이 적음도 확인되었다.

### 3. 고추의 복사량 측정을 위한 4-flux 모델 적용

본 연구에서는 상온에서 반사율 분광실험에 수행하여 단색감쇄계수를 산출하고, 복사를 지배하는 감쇄계수를 추정하여 고추의 열계산에 응용하였다.

#### 3.1 실험장치

실험에는 그림의 광학장치를 사용하였으며, 분광에는 Band Pass Filter를 사용하였다. 사용한 Filter의 대표파장은 2, 3, 4, 5 및 17 $\mu\text{m}$ 이며, 각 Filter가 갖는 파장 폭은 1~2 $\mu\text{m}$ 이지만 17 $\mu\text{m}$ 의 Filter는 8~27 $\mu\text{m}$ 의 넓은 파장역에서 에너지를 투과하며, 다른 Filter와는 특성이 다르다<sup>(11-12)</sup>.

투과율측정에는 그림의 우측 광학장치를, 반사율측정에는 그림의 좌측 광학장치를 사용하나 본 연구에서는 반사율만을 측정하여 수치해

석 하였다. 광원을 나온 빛은 Chopper에 의하여 단속광이 된 다음 Monochromater 및 Band Pass Filter로 분광되어, 시료 Cell에 도달한다.

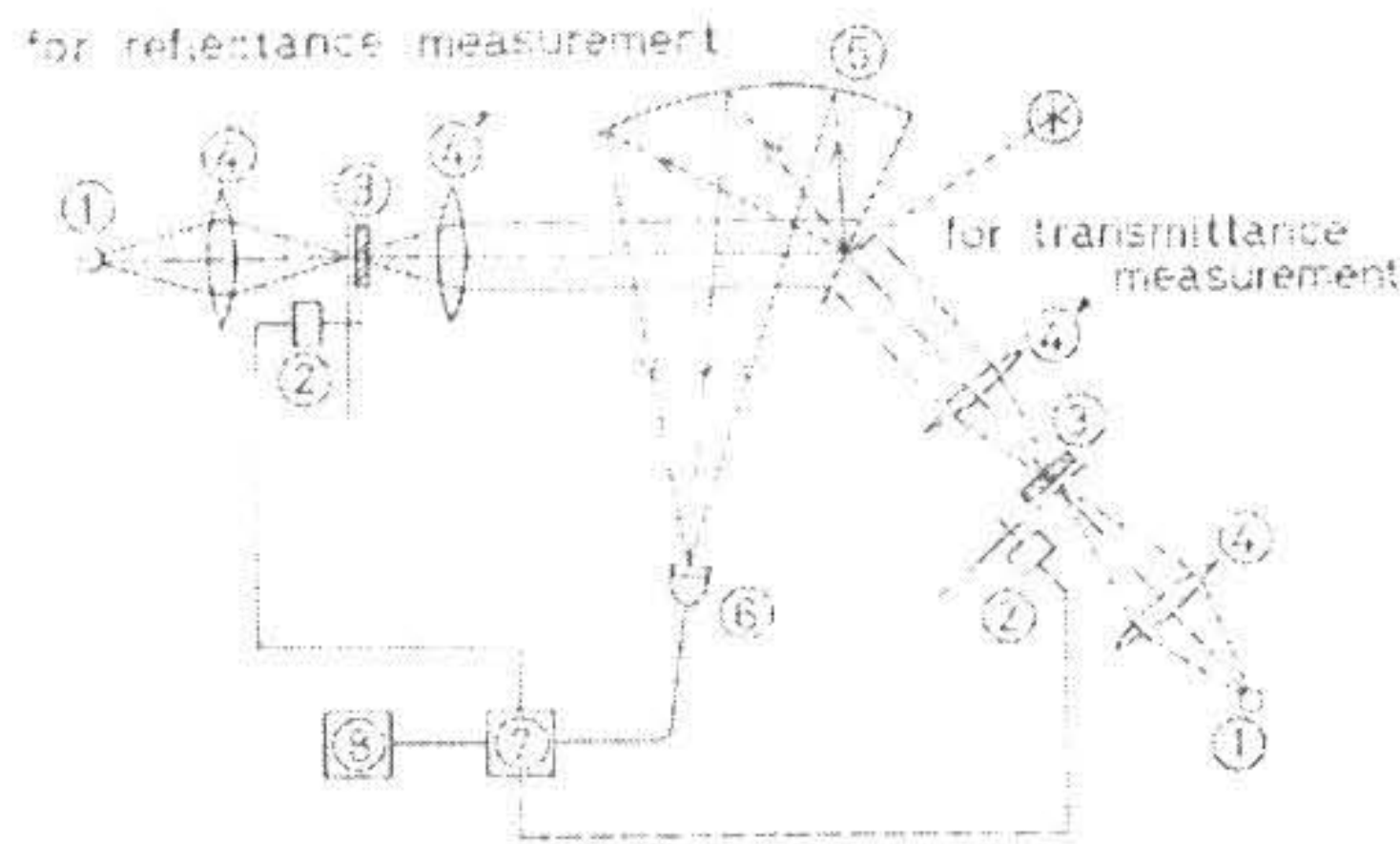
시료 Cell은 양측에 적외투과성의 KRS-5의 광학장치를 붙인 내경 26mm의 원통형의 용기로 되어있다. 시료 Cell에서 반사광이 회전타원면경 ⑤에서 집광 된 다음 ⑥에 도달한다. 검지기는 시료 Cell에서 반사광 이외 집광이 입사되지만, Chopper와 Lock-in Amp.를 조합하여 입력광을 교류 증폭시켜 집광의 영향을 제거했다.

입사광은 Cell을 10°경사지게 설치하여 측정하였으며, 직경26mm의 평행광속은 시료 Cell에서 반사한 후 회전타원면경에 집광된 후 검지기에 도달한다.

투과율의 측정과 같이 Cell 겉보기 반사율  $R^*$ 은, 초점\*에 시료 Cell이 있는 경우와금참조면이 있는 경우의 반사광에 대한 검지기의 출력비( $E_s/E_r$ )에 금참조면 반사율  $R_r$ 를 곱하여 구한다. 겉보기 반사율  $R^*$ 는 시료 Cell의 수직반사율을  $R_{ns}$ , 확산반사율을  $R_{ds}$ 라 하면 다음 식이 된다.

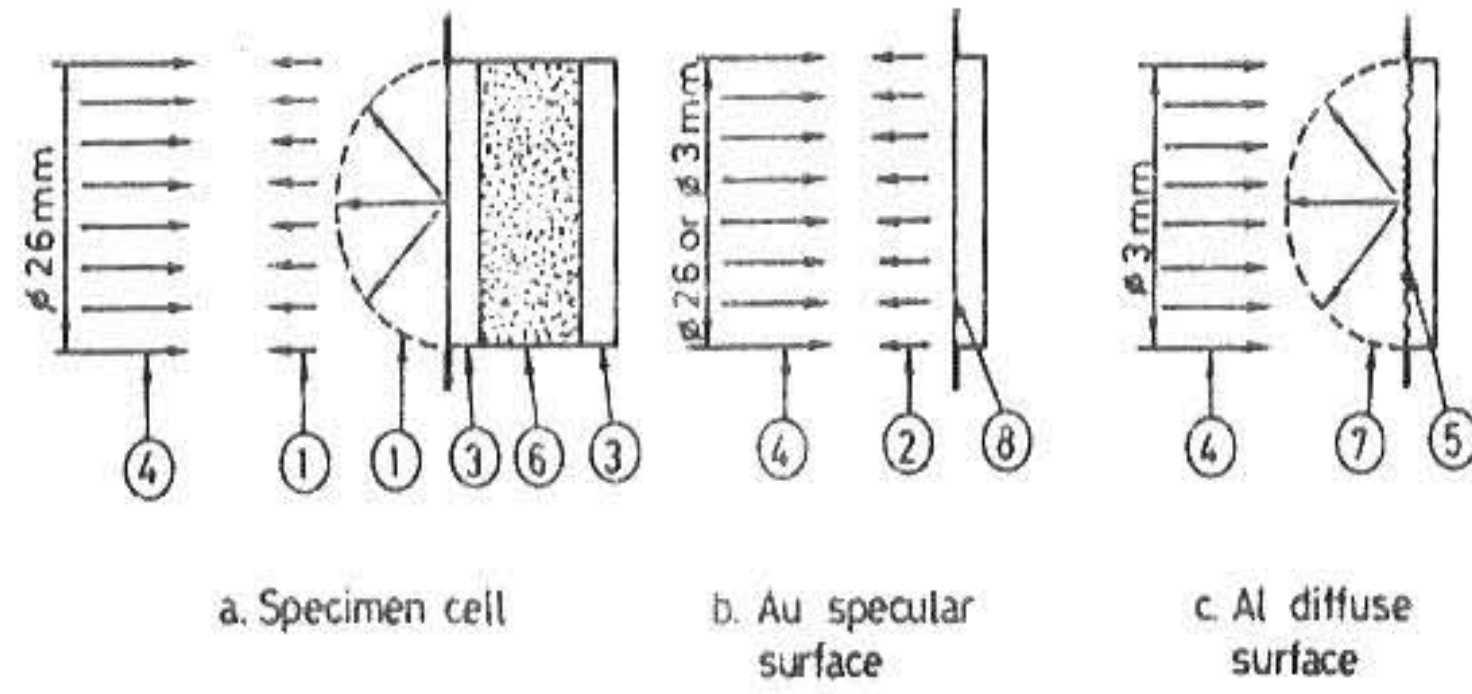
$$R^* = (E_s/E_r)R_r = R_{ns} + aR_{ds}/2 \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $a$ 는 확산광이 검지기에 들어가는 비율을 보정하기 위한 보정계수이다. 상기 식에서 보정계수  $a$ 를 사용한 이유는 입사광속경을  $\Phi 3$



① SiC light source ② Optical chopper ③ Band pass filter  
④,④' KRS-5 lens ⑤ Ellipsoidal mirror ⑥ Detector

Fig 1. Schematic diagram of reflectance measurement apparatus



- ① Reflected beam ② Au reference beam
- ③ KRS-5 spectral window glass ④ SiC light source
- ⑤ Al diffuse surface ⑥ Specimen ⑦ Diffuse beam
- ⑧ Au specular surface

Fig.2 Reflectance measurement apparatus

mm으로 하여 측정한 결과 시료표면의 불균일성 때문에 측정치가 넓은 분포가 되었으며, 입사광속경을 직경26mm으로 한 경우에도 회전타원면경 ⑤에서 집광한 시료 Cell의 반사광 빔 금참조면 반사광의 일부는 측정이 어려웠기 때문이다. 시료 Cell과 금참조면 반사광의 평행성분이 검지기에 들어가는 비율은 같으므로 다음 식이 성립된다.

$$R^* = R_{ns} + R'_{ds}/2 \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $R'_{ds}$ 는 겉보기 확산반사율이며, 겉보기 확산반사율과 진확산반사율의 비  $R'_{ds}/R_{ds}$ 가  $\alpha$ 가 된다. 여기서  $\alpha$ 를 구하기 위하여 연마한 유리에 Al를 증착한 확산면을 사용하였다. 시료 Cell의 반사광도 등방 확산적으로 가정하여 직경 3의 광속을 금참조면 및 알루미늄 확산면의 진반사율  $R_{do}$ 를 구하였다. 다음에 광속을 시료 Cell의 크기(26mm)로 넓혔을 때와 검지기의 출력을  $E_r, E_d$ 라고 하면, 확산면의 겉보기 반사율은  $(E_d/E_r)R_r$ 이 되며  $\alpha$ 를 구한 결과 파장 의존성은 적었으며,  $\alpha=1.19\sim 1.23$ 이었다. 또한 겉보기 반사율의 측정은 동일재료에 대하여 시료 Cell을 4개 준비하여, 각 Cell에 대하여 4회 실험하였다.

3.2 4-Flux Theory에 의한 단색복사물성 계수의 산출

본 연구에서는 평행광속이 시료표면에 수직으로 입사하고 있음을 고려하여 4 Flux Model Theory를 채택하여 입사광을 평행광속으로 생각하고, 시료내부에서 복사에너지 광속을 평행유속  $F_c^+, F_c^-$ 와 확산유속  $F_d^+, F_d^-$ 으로 나누어 가정하여, 평행유속은 입사평행광속이 흡수와 산란에 의하여 감쇄된다. 한편 확산유속은 입사 평행광속과 평행유속이 산란한 결과이며, 확산유속이 평행유속이 되는 것은 없다. 4 Flux Model Theory 미분방정식을 세우면 다음 식이 되며, 경계조건을 대입하여 계산하였다.

$$dF_c^+/dz = -(K_a + K_s)F_c^+ \dots \dots \dots (3)$$

$$dF_c^-/dz = (K_a + K_s)F_c^- \dots \dots \dots (4)$$

$$dF_d^+/dz = -(2K_a + K_s)F_d^+ + K_s F_d^- + (K_s F_c^+)/2 + (K_s F_c^-)/2 \dots \dots \dots (5)$$

$$dF_d^-/dz = (2K_a + K_s)F_d^- - K_s F_d^+ - (K_s F_c^+)/2 - (K_s F_c^-)/2 \dots \dots \dots (6)$$

감쇄계수  $K_c \lambda$ 는  $K_c \lambda = K_s + K_a$  식에서 구한 다음, 고추건조모델의 복사식에 대입하여 복사량을 계산하였다.

4. 고추건조모델

고추는 김치, 고추장 등 여러 가지 요리에 사용되고 있다. 4월에 파종하여 8월말에 수확하여 일관 건조하여 사용한다. 고추의 건조의 목적은 보존성을 높이는 것이며, 이 경우에 재 이용할 때에는 열탕에 의하여 복원하여 처음상태에 가까운 상태로 맛을 유지하도록 건조하는 것이 문제이며, 복원후의 맛이 처음상태에 가까울수록 좋은 건조이다.

한편 처음 상태에는 생기지 않는 풍미, 영양가, 약효 등을 발할 수 있는 목적으로 건조를 행할 경우가 있다. 이 경우에는 복원후의 풍미, 맛이 처음상태의 그것과 크게 변하여도 상관이 없다. 이 목적으로 건조되는 것은 버섯, 인삼, 한약초 등이 있다.

#### 4.1 전열 및 건조모델

고추 건조층의 전열 및 건조모델의 그림을 다음에 나타낸다.

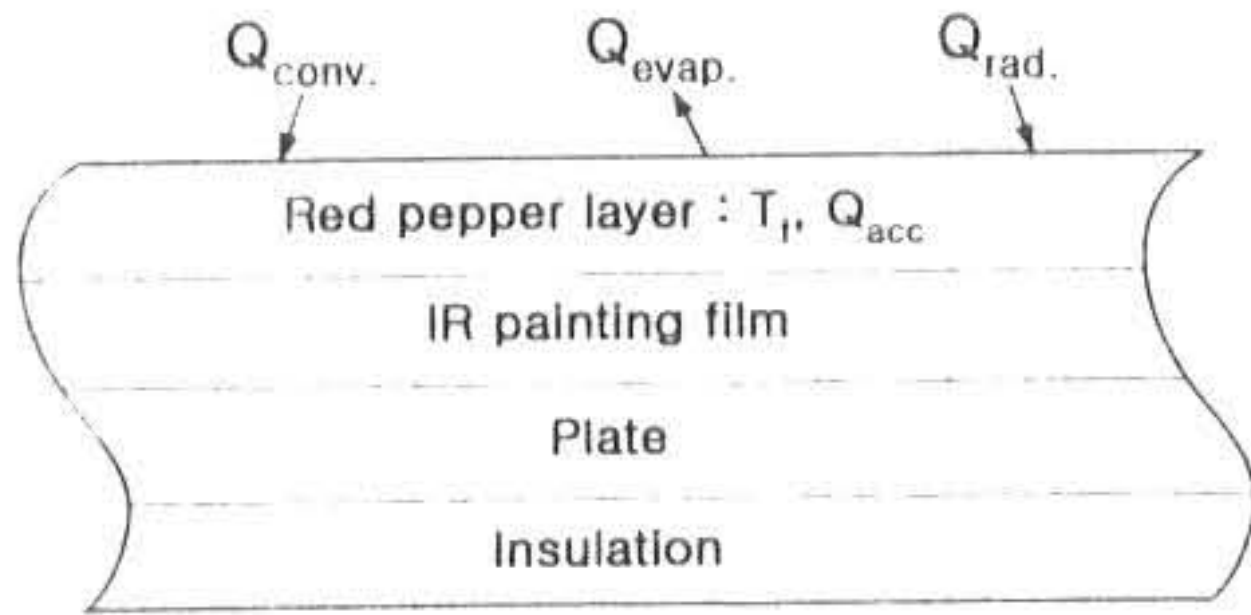


Fig.3 Model of Heat transfer and drying

원적외선 방사 히터의 복사유속과 고추의 원적외선 방사유속량은 다음식으로 계산하였다.

$$q_{r1} = \frac{\sigma A_g (T_e^4 - T_s^4)}{\frac{1-\epsilon_g}{\epsilon_g} + \frac{1}{F_{gp}} + \frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p (A_p/A_g)}} \quad \cdot (7)$$

$$q_{r2} = \frac{2\sigma A_g (T_p^4 - T_s^4)}{\frac{1-\epsilon_g}{\epsilon_g} + \frac{1}{F_{gp}} + \frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p (A_p/A_g)}} \quad \cdot (8)$$

건조 시에는 자유표면으로 생각하여, 에너지 평형식은 다음 식으로 계산하였다.

$$Q_{conv} + Q_{rad} = Q_{acc} + Q_{evap} + Q_{cond} \dots \cdot (9)$$

$$Q_{conv} = h_A (T_a - T_f) \Delta t \dots \cdot (10)$$

$$Q_{rad} = q_{rad} A \Delta t \dots \cdot (11)$$

$$Q_{evap} = (\Delta X / \Delta t) w A \Delta H_{vap} \Delta t \dots \cdot (12)$$

$$Q_{acc} = m_w c_{pw} \Delta T_f + m_s c_{ps} \Delta T_f \dots \cdot (13)$$

다음 그림은 원적외선 건조기 내의 원적외선 선택과장에 대한 가열특성과 온도상승율과의 관계를 나타낸다. 고추층내의 함수량과 온도상승률과의 상관관계임을 알 수 있다.

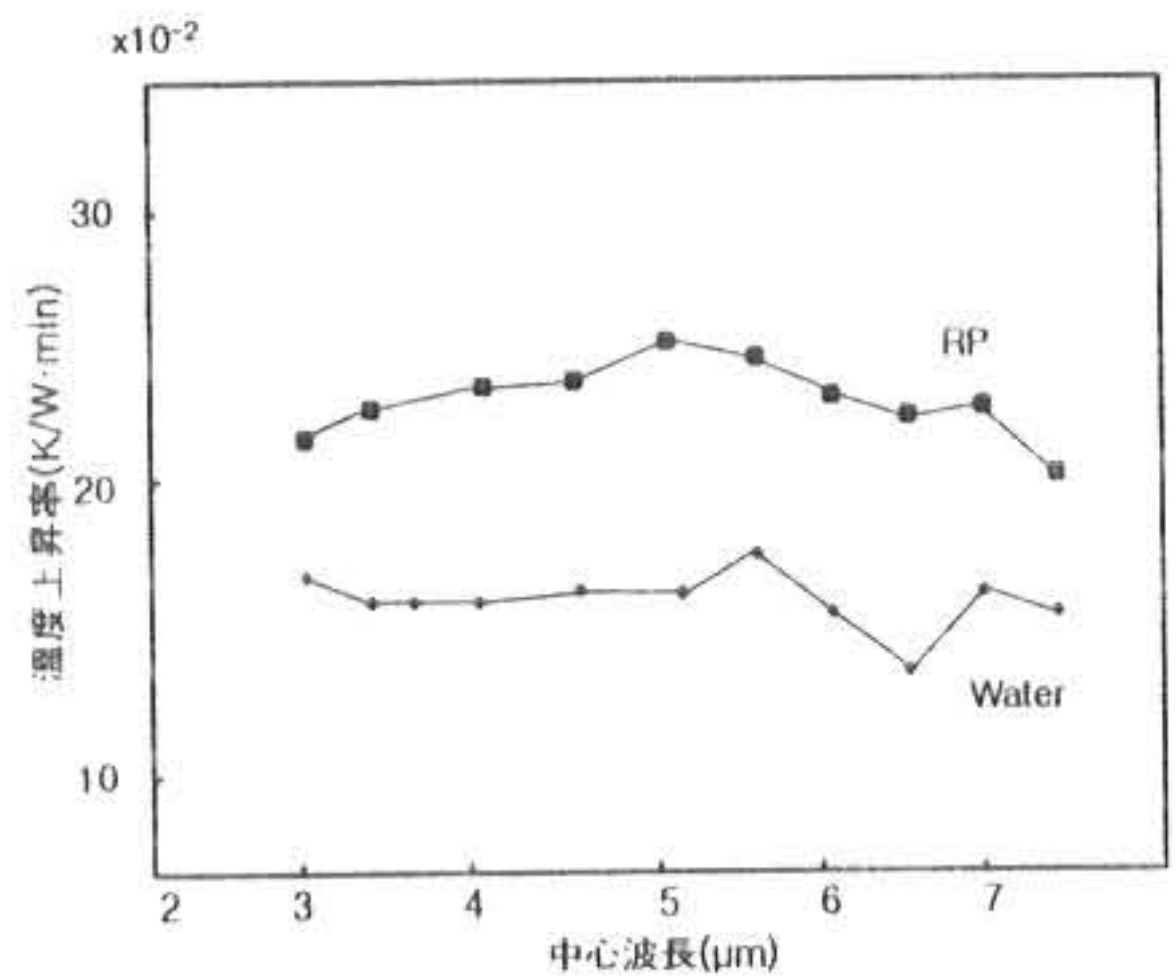


Fig.4 Relation of temperature increase ratio at infrared ray wave

다음 그림은 고추의 면적수축률과 건조시간과의 관계를 나타낸다. 고추가 건조됨에 따라 탈습되어, 수축되며 무게가 가벼워짐을 알 수 있다.

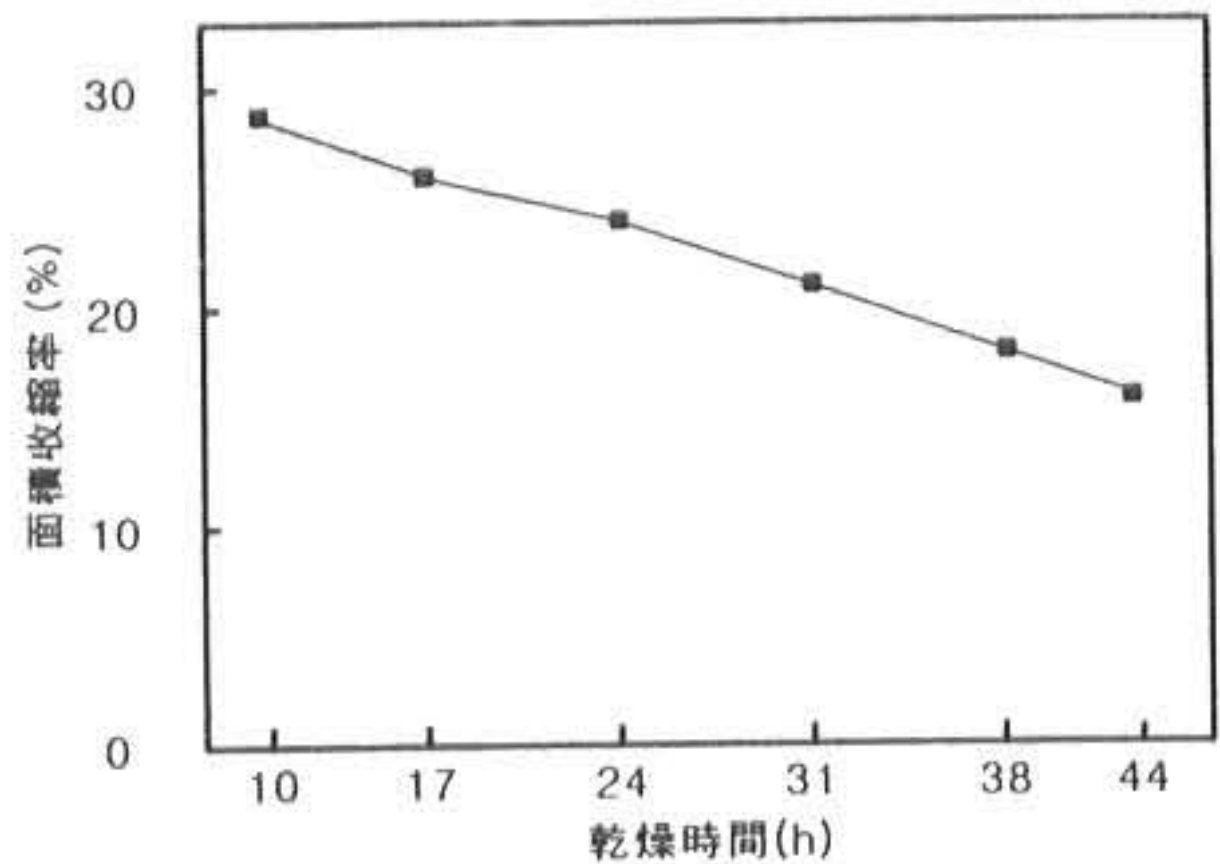


Fig.5 Relation of area contraction and drying time

다음 그림은 건조기의 벽면의 온도와 건조시간과의 관계를 나타낸다. 벽면의 온도를 높이면

원적외선 방사량이 많아져 건조가 빨라진다. 그러나 고추의 경우에는 가열 최고온도를 80℃이상이 되면, 맛이 떨어지고, 건조중에 고추세포의 파손으로 복원력이 떨어지므로 그 이하의 온도에서 건조되는 것이 좋다.

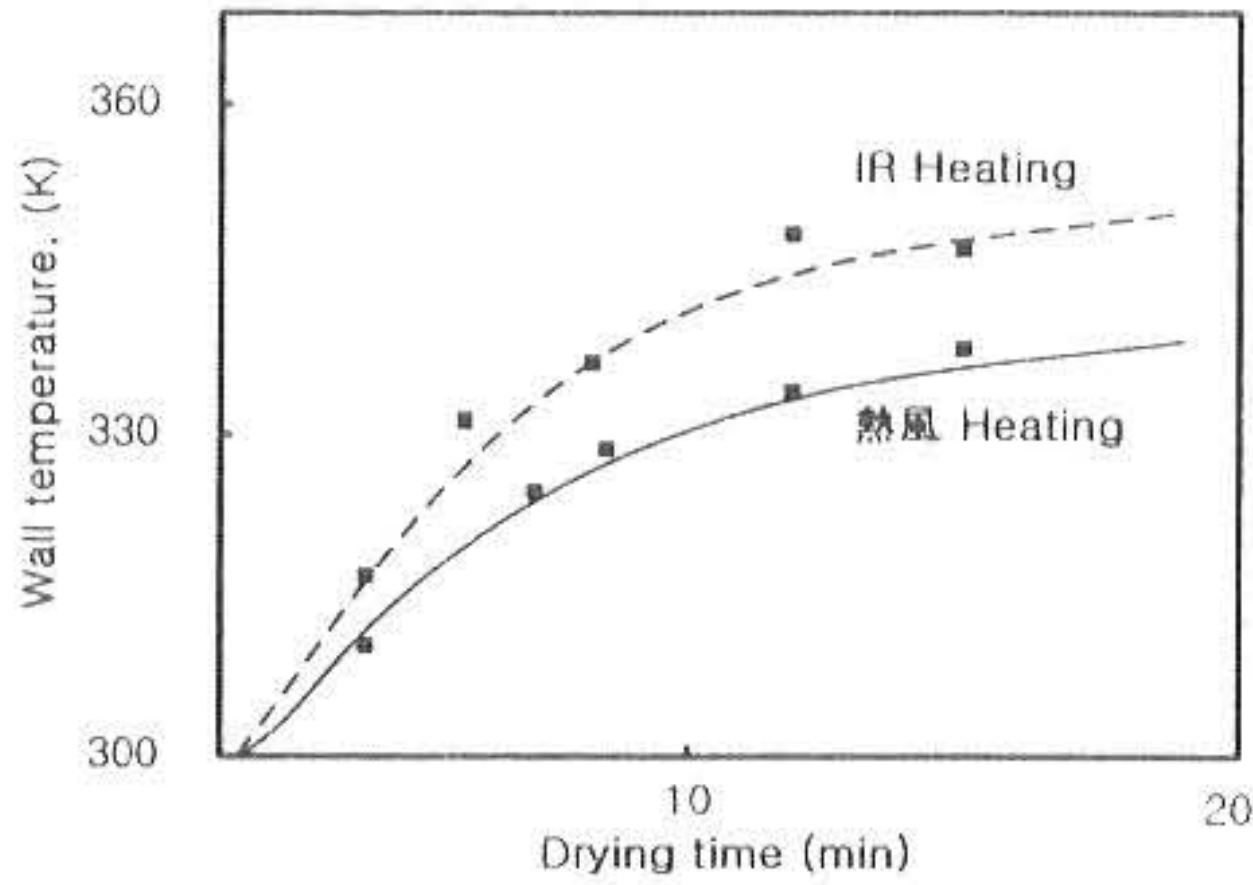


Fig.6 Relation of dryer wall temperature and drying time

다음 그림은 고추의 함수율과 건조시간과의 관계를 나타낸다. 풍속이 높을수록 건조속도가 빠름을 알 수 있다.

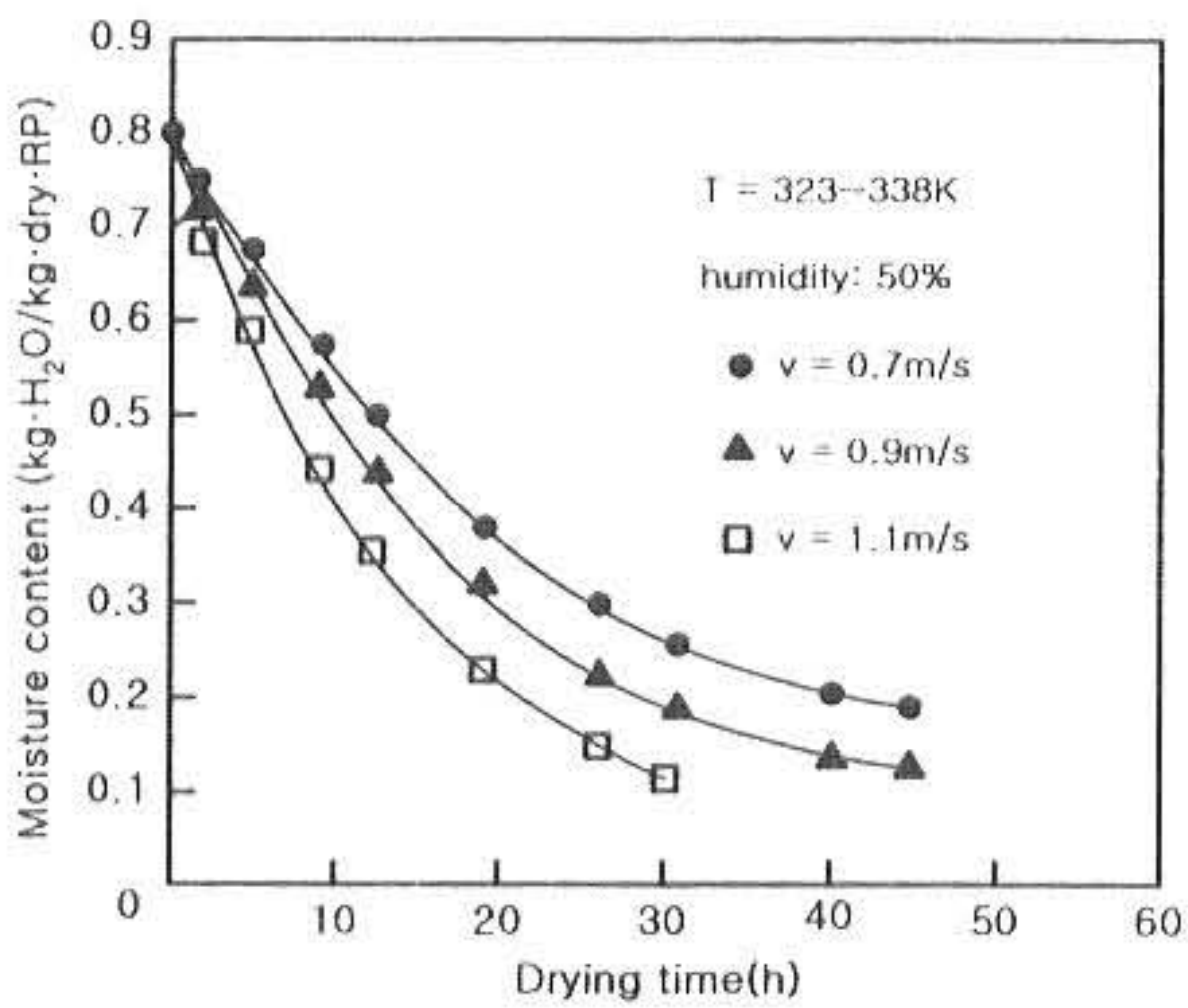


Fig.7 Relation of water content and drying time

### 5. 결론

원적외선은 농·수산물의 건조에 유효하다. 범용의 원적외선 건조장치를 설계하여 고추의 건조실험을 수행하였다. 건조를 지배하는 복사의 감쇄계수를 구하기 위하여 밴드패스 필터를 채용한 광학장치를 사용하여 고추 건조층의 확산계수를 구하였다. 구한 확산계수를 사용하여 복사율을 계산

하고 건조결과를 해석하였다. 또 원적외선에 의한 고추의 건조방법을 확립하였다. 결과는 다음과 같다.

1) 원적외선을 고추에 조사하여 30분 정도가 되면, 고추의 온도가 건조실내의 다습한 공기보다 온도가 높게되며, 건조말기에는 거의 일정하게 되는 특징이 있다.

2) 같은 조건이라면 원적외선의 건조가 열풍건조보다 빠르다. 따라서 에너지의 사용량이 적다.

3) 고추의 맛 보존을 위하여 44시간 건조하면, 초기수분의 80%의 고추를 건조 종료 후는 18%의 함수율의 고추가 되므로 실용적인 건조율·건조시간은 4.4/h 정도이다

4) 원적외선 건조의 경우 건조 후에 고추단면의 기공상태를 보존, 식미 값이 높고, 고품질의 고추 건조방법임이 확인되었다.

5) 원적외선 가열시스템은 다른 가열원이나 경화방법과 잘 조합시켜서 사용자의 다양화, 고도화의 요구에 고차원적으로 응할 필요가 있으며, 원적외선, 마이크로, 열풍건조시스템의 혼합식 등을 개발하여 건조효율의 상승 금후의 과제이다.

### 참고문헌

- 1) R.Siegel & J.R.Howell : Thermal Radiation Heat Transfer (Series in Thermal and Fluids Engineering)(2nd. Ed.), Hemisphere Publishing Corp., 1871.
- 2) 桐榮良三, 林信, 長谷川淳, 甲斐貞, 田中資俊 : 化學工學 28, (6) 458, 1964.
- 3) 伊藤和彦: 遠赤外放射의 測定·分光測定, 電熱, No. 22, p. 39, 1985.
- 3) 江川芳信 : The 1st Japan-Korea symposium on far infrared, P205~255,1995
- 4) 大林豊明 : The 2nd Japan-Korea symposium on far infrared, P77~83,1996
- 5) 伊藤和彦 : The 3rd Japan-Korea symposium on far infrared, P65~78,1997
- 6) 安藤實 : The 4 Japan-Korea symposium on far infrared, P127~134,1998
- 7) 笹森宣文 : 日本赤外線學會誌, Vol.7, No.2, P68~73, 1997
- 8) 尙熙善 : 가스 원적외선 건조기술, 통산산업부,

공업기반기술연구보고서, 1995

- 9) Keey, R. B., Introduction to Industrial Drying Operations, Pergamon Press, London, 1978
- 10) 상희선 : 일본식품공학회, 2002하계심포지움, 동경, p25~
- 11) 상희선, 배내경, 이종봉 : 한국산업응용학회, 2002년도 추계학술대회논문집, p40~

### Symbol

A: area  
c: specific heat  
F: intensity  
 $F_{ge}, F_{gp}$ : view factors  
K: radiation coefficient  
m: moisture concentration  
Q, q: heat flux  
T: temperature  
z: position  
 $\Psi$ : saturation fraction  
 $\rho$ : density  
 $\sigma$ : Stephan-Boltzman constant  
 $\varepsilon$ : emissivity  
 $\theta$ : emitter temperature  
 $\nu$ : kinematic viscosity  
 $\alpha$ : thermal diffusivity

---

(2002년 10월 17일 접수, 2003년 1월 20일 채택)