

## 벼의 원적외선 건조특성 ( I )

— 박층건조방정식 —

## Far-Infrared Ray Drying Characteristics of Rough Rice ( I )

— Thin layer drying equation —

금동혁	김 훈	홍상진
정회원	정회원	정회원
D. H. Keum	H. Kim	S. J. Hong

### ABSTRACT

This study was performed to develop thin layer drying equations for short grain rough rice using far-infrared ray. Thin layer drying tests was conducted at four far-infrared ray temperature levels of 30, 40, 50, 60°C and two initial moisture content levels of 20.7, 26.2%(w.b.). The measured moisture ratios were fitted to Lewis and Page drying models by stepwise multiple regression analysis.

Half response time of drying was affected by both drying temperature and initial moisture content at drying temperature of below 40°C, but at above 40 °C was mainly affected by drying temperature.

Experimental constant(k) in Lewis model was a function of drying temperature, but K and N in Page model were function of drying temperature and initial moisture content. Moisture ratios predicted by two drying models agreed well with experimental values. But in the actual range of drying temperature above 30 °C Page model was more suitable for predicting of drying rates.

**Keywords :** Thin layer drying equation, Far-infrared ray drying, Rice drying.

### 1. 서 론

벼의 건조는 벼 생산공정 중에서 가장 에너지 집약적인 공정이다. 벼 생산에 투입되는 에너지 중에서 건조과정에서 소요되는 비중이 50% 정도를 차지한다. 그러므로 벼 생산에서 에너지를 절감하기 위해서는 건조과정에서의 에너지 절감 없이는 그 효과를 기대하기 어렵다. 또한, 건조과정

이 벼 수확후에 벼의 품질에 가장 큰 영향을 주므로 이의 효율적인 개선 없이는 에너지 절감과 식미의 향상을 기대하기 어렵다.

벼의 건조방법에는 자연건조방법과 기계건조방법이 있다. 국내의 기계건조방법은 주로 순환식 및 연속식 건조기를 이용한 열풍건조와 원형빈과 사각빈을 이용한 상온통풍건조로 구분된다. 상온 통풍건조는 벼의 품질손상을 최소화 할 수는 있지

---

This study was supported by Korea Research Foundation Grant(KRF-99-005-G00002). The article was submitted for publication in August 2001; reviewed and approved by the editorial board of KSAM in October 2001. The authors are Dong Hyuk Keum, Professor, Hoon Kim, Research Associate, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Korea; Sang Jin Hong, Manager, Food Management Team, Lotte, Korea. The corresponding author is D. H. Keum, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea. e-mail : <dhkeum@yurim.skku.ac.kr>.

만 건조 소요기간이 매우 긴 단점이 있다. 열풍건조는 상온통풍건조에 비해 건조 속도는 빠르지만 벼의 품질손상이 우려되며 건조 에너지가 더 소요된다. 이와 같이 현행의 벼 건조방법은 더 이상의 에너지 절감과 식미의 향상을 기대하기 어려우며 특히, 고속 건조를 수행할 때 발생하는 막대한 동향을 방지하기가 어렵다. 따라서, 새로운 건조 방법의 시도가 필요하다.

원적외선은 적외선내에서 파장이 긴 적외선으로 파장범위는 4.0~1,000  $\mu\text{m}$ 이며, 농산물 건조에서는 주로 2.5~10  $\mu\text{m}$ 의 범위가 이용되고 있다(Han, 1993; Kim 등, 1996).

최근 국내에서는 원적외선 건조에 대한 연구가 에너지 절감뿐만 아니라 농산물의 부가가치를 높이기 위한 수단으로 많이 수행되고 있다.

Kim(1991)은 고추의 열풍 및 원적외선 건조특성을 비교하였으며 원적외선 건조는 열풍에 비해 건조소요시간이 47~66% 단축되었으며, 건조 속도는 건조 시간의 변화에 따라 건조 초기와 건조 후기에 다르게 나타났다고 보고하였다. Han(1993)은 양송이 건조의 경우 건조 속도는 원적외선 건조방법이 가장 빠르고 열풍건조, 진공동결건조 순으로 나타났으며, 원적외선 건조 속도는 통풍 온도가 높을수록, 원적외선 방사체에 의한 가열시간이 길수록 빠르다고 보고하였다. Lee 등(1996)은 원적외선 및 열풍건조에 의한 치커리 뿌리의 건조 특성에 대한 연구를 수행하여 치커리 뿌리의 두께가 얇을수록 건조 속도는 빠르며, 원적외선 건조가 열풍 건조에 비해 좋은 건조 효과를 보였다고 보고하였다. Park 등(2000)은 열풍과 원적외선 겸용 연속식 건조시스템을 개발하여 인삼의 건조특성에 대한 연구를 수행하여 관행의 열풍건조법과 비교하여 2.5배 이상의 효율이 높은 것으로 보고하였다.

고품질의 쌀 생산을 위하여 최근 일본에서는 벼의 원적외선 건조기가 시판되고 있으며, 국내에서도 원적외선 건조기의 상품화가 점점 현실화되고 있다. 농산물을 대상으로 한 원적외선 건조특성은 국내에서 많은 연구가 수행되고 있으나 벼에 대한 연구는 전무한 실정이다. 벼의 원적외선 건조과정을 해석하고 건조 조건을 구명하는데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다.

따라서, 본 연구의 목적은 원적외선을 이용한

벼의 박층건조실험을 수행하여 건조특성을 구명하고 박층건조방정식을 개발하는데 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

공시 재료는 1999년 10월에 전남 영광지역에서 수확한 동안벼이며 초기 함수율은 27.1%(w.b.)이었다. 벼는 음건에서 2수준의 함수율로 조절하였으며 정선 후 밀폐하여 2℃의 저온저장고에 보관하였다.

실험시작 24시간 전에 시료를 저온저장고에서 꺼내 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

### 나. 실험방법

원적외선 박층건조 실험장치는 그림 1과 같이 건조부와 계측부로 구성하였다. 건조부는 원적외선방사체, 조사거리 조정봉, 시료대 및 송풍기로 구성하였으며, 계측부는 전자저울, 열전대 및 PC로 구성하였다. 원적외선 방사체는 400×400mm 크기로 방사율은 5~20  $\mu\text{m}$ 의 파장영역에서 0.95의 값을 나타내었으며, 최대 300℃까지 조절이 가능하였다. 조사거리 조정봉은 최대 400mm까지 조사거리를 조절할 수 있도록 하였으며, 시료대는 250×250×60mm 크기의 정사각형 형태로 제작하였다. 대류에 의한 건조효과를 최소화하는 동시에 시료로부터 증발된 수분을 배출하기 위해 실험장치 하부 2지점의 작은 구멍으로 소량의 외기가 유입되어 상부에 설치된 소형의 송풍기에 의해 외부로 배출되도록 하였다.

시료대 하부에 설치된 전자저울(LC4200, SARTORIUS, Ger)을 이용하여 시료의 무게 변화를 측정하여 PC에 기록하였다. 열전대(T type Thermocouple, OMEGA, USA)는 방사체 표면과 시료대 중앙에 설치하였다.

시료의 함수율은 20.7 및 26.2%(w.b.)의 2수준, 건조온도는 30, 40, 50 및 60℃의 4수준으로 하였으며, 조사거리는 200mm로 하였다. 건조온도는 시료 표면 20mm 상부에 설치된 열전대에 의해 제어

벼의 원격외선 건조특성(I)

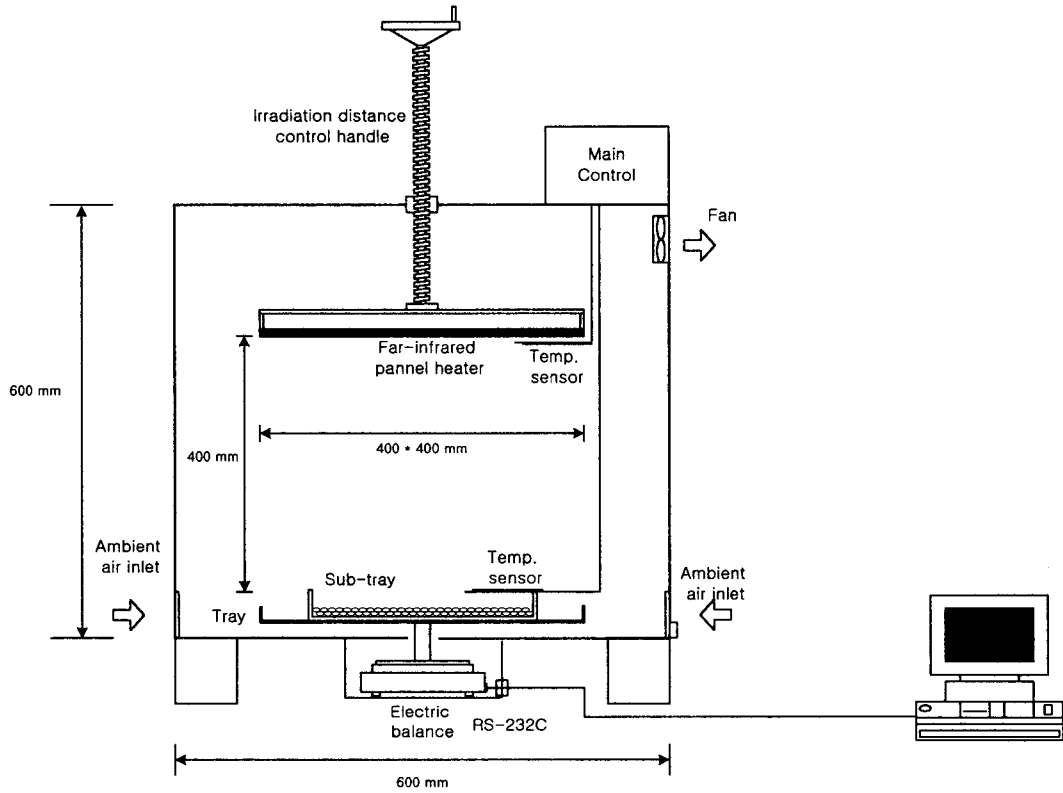


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for far-infrared drying.

하였다. 초기 시료의 중량은 200g으로 하였으며, 실험 시작 후 1분 간격으로 무게를 계측하였다. 시료의 무게 변화가 없을 때까지 건조를 수행하였다.

다. 분석방법

벼의 원격외선 박층 건조방정식을 결정하기 위하여 기존의 곡물 건조방정식 중에서 정확도와 이용 편의성이 우수한 다음의 Lewis 및 Page식을 모델로 선정하였다.

$$\text{Lewis 모델 : } MR = \exp(-k \cdot t) \quad \dots\dots (2-1)$$

$$\text{Page 모델 : } MR = \exp(-K \cdot t^N) \quad \dots\dots (2-2)$$

여기서,  $MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_o - M_e}$  : 함수율비(무차원)

- $M(t)$  : 함수율(% , d.b.)
- $M_e$  : 평형함수율(% , d.b.)
- $M_o$  : 초기함수율(% , d.b.)
- $k, K, N$  : 실험상수
- $t$  : 건조시간(min)

함수율비의 실험치를 모델에 적합시켜 실험상수를 결정하였다. 위의 건조모델을 선형화하고 SAS의 회귀분석 프로그램을 이용하여 실험상수를 결정하였다. 건조 모델의 실험상수  $k, K$  및  $N$ 은 건조온도와 초기함수율의 함수로 가정하고 다음식(2-3)으로 설정하였다.

$$k, K, N = a_0 + a_1(M_o) + a_2(T_s) + a_3(M_o)^2 + a_4(T_s)^2 + a_5(M_o \cdot T_s) \quad \dots\dots (2-3)$$

- 여기서,  $M_o$  : 초기 함수율 (% , d.b.)
- $T_s$  : 건조 온도 (°C)

식(2-3)에서 변수들의 조합은 SAS의 PROC STEPWISE를 이용하여 선정하였다. 함수율비의 실험치와 건조모델에 의한 예측치 사이의 결정계수와 RMSE(Root mean square error)를 모델의 비교 검토에 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 건조속도

그림 2와 그림 3은 각각 초기 함수율 20.7% (w.b.) 및 26.2%(w.b.)에서 건조온도에 따른 함수율의 변화를 나타낸 것이다.

그림 2에서와 같이 초기 함수율 20.7%(w.b.)의 경우, 건조온도가 30℃, 40℃, 50℃ 및 60℃일 때 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 각각 276, 138, 75, 51분으로 나타났다. 건조온도가 30℃에서 40℃로 10℃ 증가할 때 반건조시간은 1/2로 감소되었으나 그 이상의 온도에서는 온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 현저히 줄어들었다.

그림 3에서와 같이 초기 함수율 26.2%(w.b.)의 경우, 건조온도가 30℃, 40℃, 50℃ 및 60℃일 때 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 각각 317, 125, 82, 55분으로 나타났다. 건조온도가 30℃에서 40℃로 10℃ 증가할 때 반건조시간은 40%로 감소되어 초기 함수율 20.7%(w.b.)에서 보다도 건조시간 단축효과가 보다 크게 나타났으며, 그 이상의 온도에서는 초기 함수율 간에 건조온도에 따른 반건조시간의 차이는 거의 나타나지 않았다.

이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 건조온도와 초기함수율에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며, 초기함수율에 따른 반건조시간은 건조온도가 40℃ 이하로 낮은 범위에서는 크게 차이가 나타났으나 온도가 높을수록 차이가 거의 나타나지 않았다. 또한 반건조시간 즉, 건조속도는 초기함수율의 영향보다는 건조온도의 영향이 더 크게 나타났다.

#### 나. 박층 건조방정식

두 박층 건조모델 즉, Lewis 모델과 Page 모델의 실험상수와 결정계수는 다음의 표 1과 같이 나타

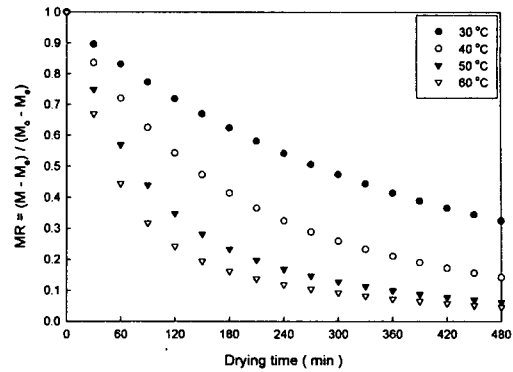


Fig. 2 Far-infrared ray drying curves of rough rice for the temperatures of 30, 40, 50, and 60℃ respectively at initial moisture content 20.7%(w.b.).

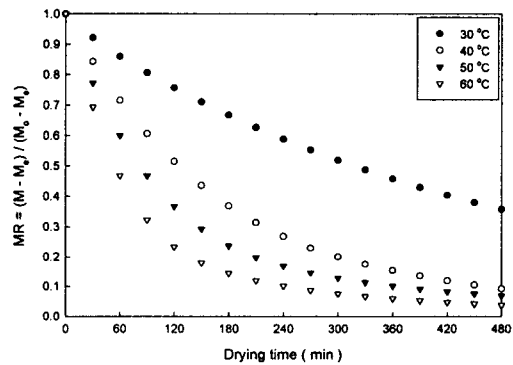


Fig. 3 Far-infrared ray drying curves of rough rice for the temperatures of 30, 40, 50, and 60℃ respectively at initial moisture content 26.2%(w.b.).

났다. 표에서와 같이 실험상수는 Lewis 모델의 경우 건조온도만의 함수로만 나타났고, Page 모델은 건조온도와 초기함수율의 함수로 나타났다. 실험상수들의 결정계수는 0.9이상으로 모두 높은 값을 나타내었다.

두 박층 건조모델의 적합성을 검토하기 위하여 함수율비의 전체 실험치와 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 Lewis 모델의 경우 결정계수와 RMSE는 각각 0.9949와 0.0334, Page 모델은 각각 0.9970과 0.0341로 나타났다. 두 모델 사이의 적합도의 차이

Table 1 Estimated experiment coefficients for Lewis and Page drying models

Models	Experiment coefficients	r <sup>2</sup>
Lewis	$k = -0.00040290 + 0.00000326(T_s)^2$	0.9932
Page	$K = -0.01944833 + 0.00127521(M_o) + 0.00002607(T_s)^2 - 0.00004268(T_s \cdot M_o)$	0.9928
	$N = 0.86435386 - 0.00011411(T_s)^2 + 0.00016617(T_s \cdot M_o)$	0.9414

Table 2 Estimated coefficients of determination and root mean square error for Lewis and Page drying models

Models	r <sup>2</sup>	RMSE
Lewis	0.9949	0.0334
Page	0.9970	0.0341

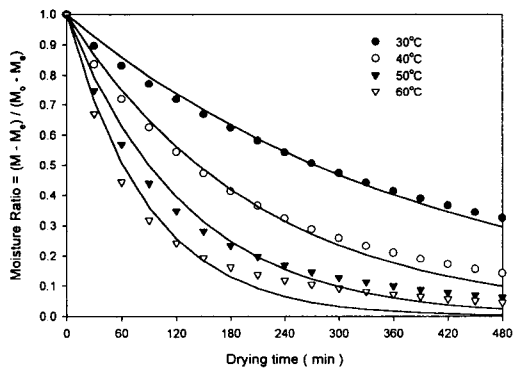


Fig. 4 Comparison of measured and predicted moisture ratio by Lewis model at initial moisture content of 20.7% (w.b.).

는 거의 없는 것으로 나타났다. 두 모델 모두 RMSE가 0.03 수준으로 이는 함수율비(MR)의 값이 0~1 사이의 값을 고려할 때 허용 가능한 수준으로 간주할 수 있다.

그림 4와 그림 5는 각각 초기 함수율 20.7% (w.b.) 및 26.2%(w.b.)에서 건조온도별 함수율비의 실험치와 Lewis 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림 4에서와 같이 초기 함수율이 20.7% (w.b.)일 때 Lewis 모델에 의한 예측 함수율비는 건조온도 30℃ 및 40℃에서는 실험치와 매우 잘

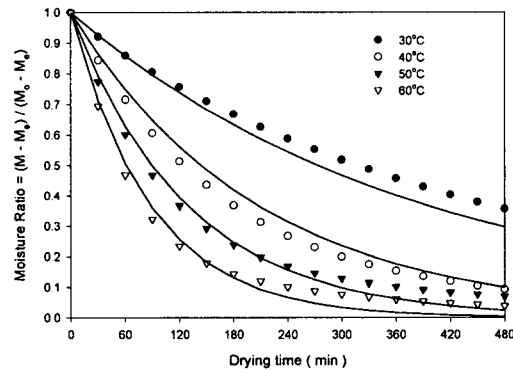


Fig. 5 Comparison of measured and predicted moisture ratio by Lewis model at initial moisture content of 26.2% (w.b.).

일치하였으며, 건조온도가 50℃ 및 60℃에서는 건조 후반부에 상당한 오차를 나타내었다. 그림 5에서와 같이 초기 함수율이 26.2%(w.b.)일 경우에는 건조온도가 낮은 30℃일 때 예측치와 실험치의 오차가 다소 크게 나타났으나 건조온도가 40℃ 이상의 경우에는 예측치가 비교적 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

그림 6과 그림 7은 각각 초기 함수율 20.7% (w.b.) 및 26.2%(w.b.)에서 건조온도별 함수율비의 실험치와 Page 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 Page 모델에 의한 예측치는 초기 함수율에 관계 없이 건조온도가 30℃일 경우에는 상당한 오차를 나타내었으나 건조온도가 높은 경우에는 실험치와 매우 잘 일치하였다.

실제 원적외선 건조기의 경우 건조온도의 사용 범위는 40~55℃이므로 건조기의 설계 또는 성능 분석을 위한 건조 시뮬레이션 모델에 박층 건조방정식을 사용할 경우는 Page 모델이 보다 유용할 것으로 판단된다.

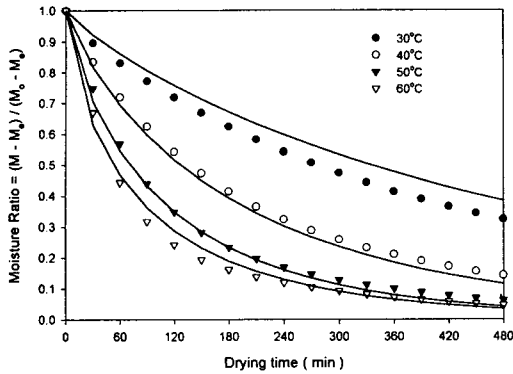


Fig. 6 Comparison of measured and predicted moisture ratio by Page model at initial moisture content of 20.7% (w.b.).

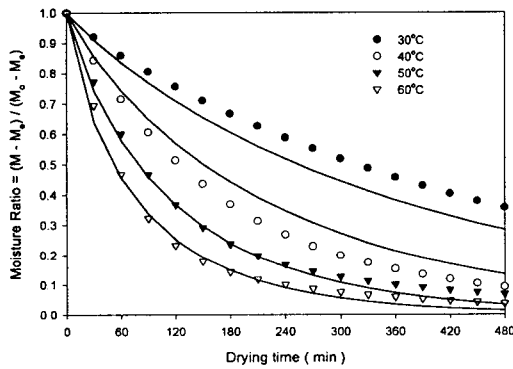


Fig. 7 Comparison of measured and predicted moisture ratio by Page model at initial moisture content of 26.2% (w.b.).

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 벼의 원적외선 박층 건조방정식을 개발하기 위하여 수행되었으며, 원적외선 건조 실험 장치를 제작하여 벼의 초기 함수율 20.7, 26.2% (w.b.)의 2수준, 원적외선 건조온도 30, 40, 50 및 60°C 4수준에서 박층 건조실험을 수행하였다. 실험치를 박층 건조모델로 가장 널리 이용되고 있는 Lewis 및 Page 모델에 적합시켜 실험상수를 결정하고 모델의 적합성을 검정하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 건조

온도와 초기함수율에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며, 건조온도가 40°C이하의 낮은 범위에서는 초기함수율의 영향이 크게 나타났으나 온도가 높을수록 그 영향이 미비하였다. 또한 반건조시간 즉, 건조속도는 초기함수율의 영향보다는 건조온도의 영향이 더 크게 나타났다.

2) 함수율비의 실험치를 Lewis 모델과 Page 모델에 적합시켜 실험상수를 결정하고, 결정계수와 RMSE로 모델의 적합성을 검정하여 제시하였다. Lewis 모델의 실험상수는 건조온도만의 함수로 나타났으며, Page 모델의 경우는 건조온도와 초기함수율의 함수로 나타났다.

3) 벼의 원적외선 박층 건조모델로 Lewis 모델과 Page 모델 모두 적합성이 높은 것으로 나타났으나, 실용적인 건조온도 범위에서는 Page 모델이 함수율비의 보다 정확한 예측이 가능한 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

- Kim, J. Y. 1991. Comparison of drying characteristics between the heated air and the far infrared drying of the red pepper. Ph.D. thesis. Kyungpook National University.
- Kim, Y. H., K. H. Cho., S. G. Oh., Y. K. Cho and C. S. Han. 1996. Development of far infrared dryer for agricultural products. RDA. J. Agri. Sci 38(2):806-811.(In Korean)
- Lee, G. H., H. S. Kang and W. S. Kang. 1996. Drying characteristics of chicory root under far-infrared and hot air drying. Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference 90-95(In Korean).
- Han, C. S. 1993. A study on the drying characteristics of mushroom for far-infrared drying. Cooperative review. Agricultural Cooperative Development Institute Agricultural Cooperative Junior College. 14:129-146.
- Park, S. J., S. M. Kim., M. H. Kim., C. S. Kim and C. H. Lee. 2000. Development of a prototype continuous flow dryer using far infrared ray and heated-air for white ginseng. J. of the Korea Society of Agricultural Machinery. 25(2): 115-122(In Korean).