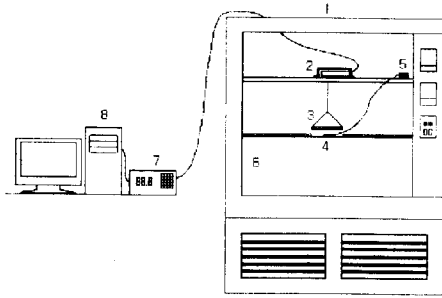


2.2 실험장치

그림 1은 본 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 흡습실험 장치는 온도와 상대습도를 조절하여 실험에 필요한 일정한 공기 조건을 제공하는 항온항습기와 시료가 놓이는 흡습실로 구성되어있다.



1. Constant temperature and humidity chamber 2. load cell 3. tray
4. temperature and humidity sensor 5. thermo recorder
6. adsorption chamber 7. digital Indicator 8. PC

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

흡습과정 동안 시료의 무게를 연속적으로 측정하기 위하여 그림 1에서와 같이 흡습실의 중앙에 로드셀을 설치하였다.

또한 시료용 버는 시험용 현미기를 이용하여 현미로 만든 후, 곡립품질판정기(RN-500, Kett)를 이용하여 동할을 측정하였다. 본 실험에서는 충격에 의한 동할의 발생이 매우 적은 것으로 보고 된 바 있는 고무롤현미기(SY88-TH, Ssangyong)를 사용하였다. 곡립품질판정기의 동할판별율(Crack evaluating accuracy)은 약 90%로 나타났다.

2.3 실험내용

2.3.1 박층흡습실험

본 실험은 온도 3수준(20℃, 25℃, 30℃), 상대습도 3수준(70%, 80%, 90%)에서 각각 3회 반복하여 수행되었다.

항온항습기를 실험이 시작되기 약 2시간전에 가동하여 실험에 알맞은 공기조건을 확인한 후, 70g의 시료를 시료상자에 얇게 한 층으로 깔고, 시료상자를 흡습실내의 로드셀에 걸고 실험을 시작하였다. 실험은 48시간동안 진행되었으며, 실험 시작 후 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48시간이 되는 때에 약 10g의 시료를 채취하여 오븐법으로 함수율을 측정하여 로드셀을 이용하여 구한 값을 보정하였다.

본 실험에서는 3시간 이상 무게 변화가 없을 때를 흡습이 끝난 것으로 간주하고 이 때의 함수율을 평형함수율로 채택하였다. 상대습도가 90%인 경우는 실험이 종료되어도 흡습이 계속 진행되어, 실험 시간을 연장한 추가 실험을 통하여 상대습도가 90%일 때의 평형함수율을 구하였다.

2.3.2 동할 측정 실험

박층흡습실험과 같은 시험구의 시료를 동할 측정 실험에 이용하였다.

실험 시작 후 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48시간이 경과 할 때마다 약 160g 정도의 시료를 채취하여 비닐백에 담아 밀봉하여 48시간 이상 상온에서 보존한 후 시험용 현미기를 이용하여 현미로 만들었다.

동할 측정은 현미 2000립을 대상으로 곡립품질관정기를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 박층흡습실험

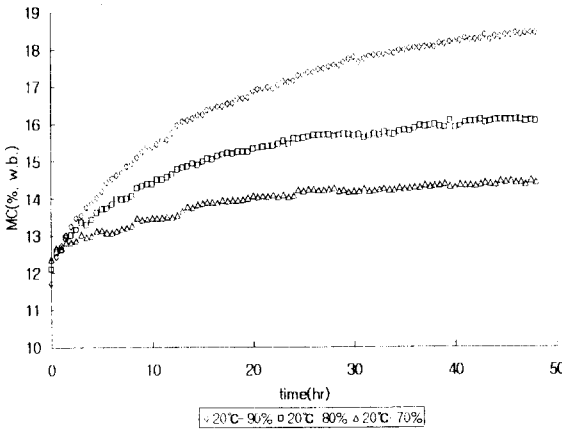


Fig. 2. Experimental moisture content data for rough rice exposed to an airstream at 20°C.

그림 2는 공기의 온도가 20°C일 때 상대습도에 따른 함수율 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 상대습도에 따른 흡습곡선들은 서로 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉 상대습도가 증가할수록 곡물의 흡습속도가 빨라 함수율이 높게 나타난다. 상대습도가 70%와 80%인 경우는 실험이 시작한 지 48시간 이내에 평형함수율에 도달한 것으로 보이나 상대습도가 90%인 경우는 평형함수율에 이르지 못하고 있다. 25°C, 30°C의 경우도 20°C와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

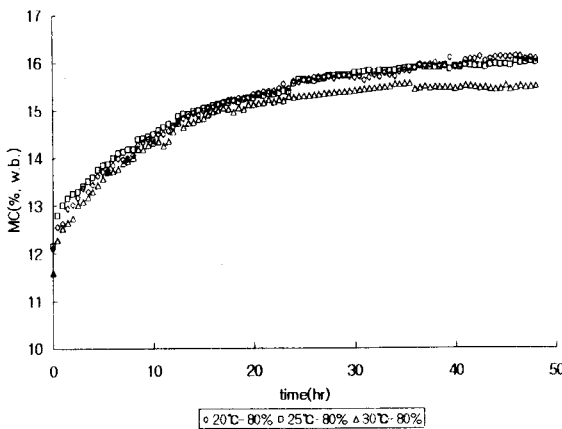


Fig. 3. Experimental moisture content data for rough rice exposed to an airstream at 80% RH.

그림 3은 상대습도가 80%일 때 온도에 대한 함수율 변화를 시간에 따라 나타내고 있다. 20°C와 25°C 온도조건에서 흡습곡선간에 큰 차이가 나타나지 않으며, 전체적으로 각각의 온도에 대한 함수율 차이가 뚜렷하게 나타나지 않고 있다.

이것은 함수율이 낮은 벼의 흡습속도는 온도차이에 의한 영향보다는 다른 요인(상대습도, 곡물의 초기함수율)들에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다.

시간에 따른 벼의 수분 전달 과정을 모형화하기 위하여 다음과 같은 모델들을 이용하였다.

$$MR = \exp(-k*t) \quad (1)$$

$$MR = a*\exp(-k*t) \quad (2)$$

$$MR = \exp(-k*t^n) \quad (3)$$

여기서, MR : 함수율비(Moisture Ratio), t : 시간, a,k,n : 실험상수

위의 흡습모델의 실험상수들은 모두 선형화가 가능하며, 선형화된 흡습모델을 각 실험조건에 적용하여 실험상수를 구하였다. 이 실험상수들을 종속변수로 하고 온도와 상대습도의 조합에 의한 항들을 독립변수로 하는 다음과 같은 모델을 가정하였다.

$$\text{실험상수} = c_1T + c_2T^2 + c_3RH + c_4(RH)^2 + c_5(T*RH)$$

위에서 변수의 선택은 SAS의 SETPWISE PROC를 이용하여 유의 수준이 15% 이하가 되는 변수의 조합들을 이용하였다. SAS를 이용하여 구한 실험상수에 대한 식들은 표 1과 같다.

Table 1. Estimation of parameters involved in adsorption model for rough rice

Model	Estimated parameter	R ²	F
Exponential (식 1)	k = -1.403133+1.44E-3T+3.806333RH -2.483333(RH) ²	0.9193	19.01
Appro. Diffusion (식 2)	a = 1.141981-5.7143E-4T ²	0.5344	8.04
	k = -1.711533+4.679666RH-3.043333(RH) ²	0.9331	41.86
Page (식 3)	k = -0.227652+2.519869E-2T+0.283320(RH) ² -2.055470E-2(T*RH)	0.9831	97.07
	n = 1.060972-1.592751E-2(T*RH)	0.5394	8.20

본 연구에서는 9회 실험결과를 이용하여 회귀모델을 개발하고, 18회의 실험결과를 이용하여 개발된 회귀모델을 검증하였다. 표 2는 개발된 모델의 결정계수와 SEC, SEP를 나타내고 있다.

Table 2. Coefficients of determination, SEC and SEP of adsorption models

Model	R ²	SEC	SEP
Exponential	0.9400	0.448	0.4741
Appro. Diffusion	0.9458	0.391	0.4952
Page	0.9838	0.275	0.2398

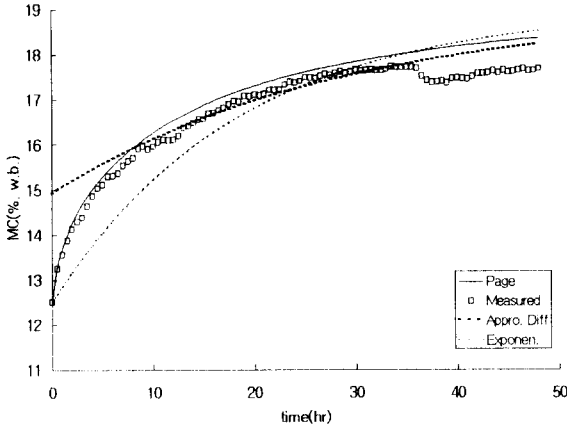


Fig. 4. Measured and fitted moisture content with adsorption models for rough rice at 30°C, 90% RH.

3.2 동할 측정 실험

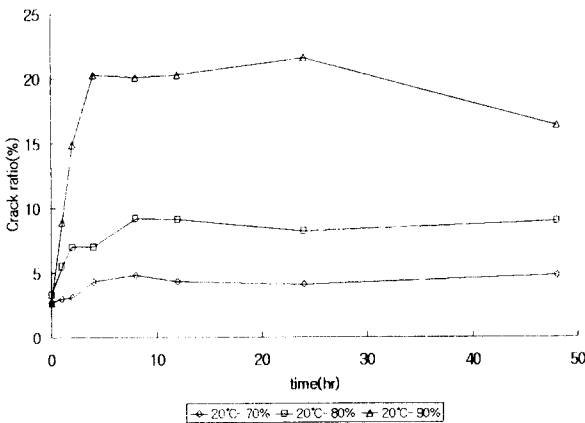


Fig. 5. Cracked kernel ratio for rough rice exposed to an airstream at 20°C.

동할 발생 데이터를 이용하여 이를 모형화하기 위하여 다음과 같은 두가지 방정식(Hoerl model, Nishiyama model)을 도입하였다.

$$C_t = C_o - \frac{t}{a + b*t} \quad (4)$$

$$\frac{C_t - C_e}{C_o - C_e} = \exp(-k*t^n) \quad (5)$$

여기서, C_t : 시간 t 에서의 동할발생율(%), C_o : 초기 동할발생율(%), C_e : 최대 동할발생율(%)

표 2에서 보는 바와 같이 세가지 흡습 모델의 결정계수가 모두 0.94이상으로 높게 나타났으며, 특히 Page 모델은 결정계수가 가장 크고 예측값의 표준오차 (SEC, SEP)가 세 모델중에서 가장 낮아 실험치와 가장 잘 적합하는 흡습모델로 판단된다.

그림 4는 온도 30°C, 상대습도 90%에서 시료의 함수율 변화를 각 모델에 의해 예측한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도 30°C, 상대습도 90% 조건에서 Page 모델이 가장 잘 예측하는 것으로 판단된다.

그림 5는 공기의 온도가 20°C일 때, 시간에 따른 동할발생을 상대습도별로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 흡습초기에 동할이 급격히 증가하고 있다. 상대습도가 70%인 경우는 동할의 증가가 매우 작은데 흡습이 빠르지 않기 때문이고, 상대습도가 90%인 경우는 벼에 수분의 침투가 매우 빨라, 실험이 시작된 지 4시간만에 동할발생율이 20%에 이르고 있다.

또한 동일한 상대습도에서 공기온도와 최대 동할발생율의 상관관계가 매우 낮게 나타났다.

앞의 모델에서 실험상수의 결정은 흡습모델에서와 동일한 방법을 적용하였다. 표 3은 두 모델의 실험상수들을 나타내고 있다.

Table 3. Estimation of parameters involved in crack generating models for rough rice

Model	Estimated parameter	R ²
Hoerl (식 4)	a = 248.3216-3.792944T+2.4457E-2T ² -207.2822RH +73.7814(RH) ² -9.4889(IMC)+0.2633(T*RH*IMC)	0.96
	b = -83.8435+1.3227T-1.213E-2T ² +70.4169RH -26.4559(RH) ² +3.0854(IMC)-7.551E-2(T*RH*IMC)	0.98
Nishiyama (식 5)	n = 11.9723-0.2018T-5.4E-4T ² -3.5778RH -2.1344(RH) ² -0.6003(IMC)+2.1941E-2(T*RH*IMC)	0.93
	k = -14.7732+0.4781T-5.18E-3T ² +6.0819RH +1.4034(RH) ² +0.5128(IMC)-2.114E-2(T*RH*IMC)	0.80

동할발생 모델도 흡습 모델에서와 마찬가지로 9회 실험결과를 이용하여 회귀모델을 개발하고, 18회의 실험결과를 이용하여 개발된 회귀모델을 검증하였다. 표4는 개발된 모델의 결정계수와 SEC, SEP를 나타내고 있다.

Table 4. Coefficients of determination, SEC and SEP of crack generating models

Model	R ²	SEC	SEP
Hoerl	0.6272	5.54	12.366
Nishiyama	0.9447	1.59	3.062

표 4에서 보는 바와 같이 Hoerl 방정식은 결정계수가 매우 낮아 동할발생모델로 적합하지 않으나, Nishiyama 방정식은 결정계수가 0.9447로 매우 높고 SEC와 SEP도 Hoerl 방정식보다 작음을 알 수 있다.

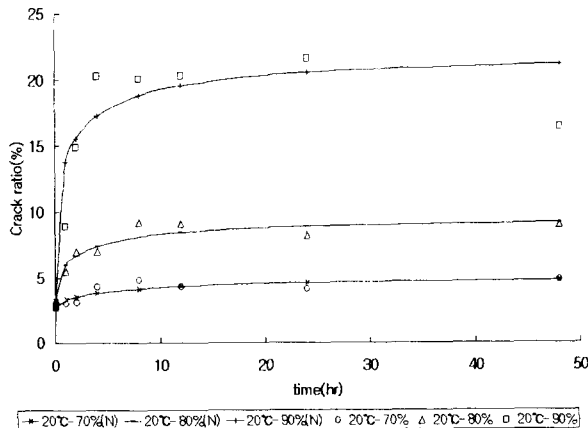


Fig. 7. Measured and fitted crack ratio with Nishiyama equation for rough rice at 20°C.

그림 7은 온도 20°C에서 Nishiyama 방정식으로 예측한 값과 실제 측정값을 그림으로 나타낸 것이다.

상대습도가 70%와 80%일 경우에는 오차가 작고, 상대습도가 90%일 경우에는 오차가 크게 증가함을 알 수 있다.

모든 온도 조건에서 상대습도가 70%, 80%, 90%일 때 결정계수는 각각 0.90, 0.85, 0.88로 예측치는 실험치를 잘 예측하고 있다고 볼 수 있다.

3.3 흡습비와 동할발생비

3.3.1 흡습비

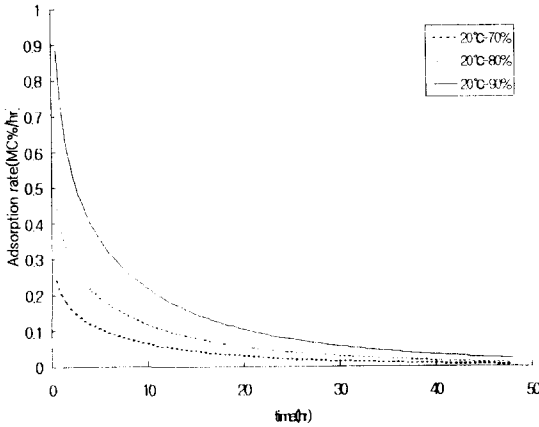


Fig. 8. Adsorption rate as affected by relative humidity at 20°C.

시간에 따른 함수율 변화의 비율을 나타내는 흡습비(adsorption rate)는 Page 모델 (식 (3))을 시간 t 에 대하여 1차 미분하여 구할 수 있다. 그림 8은 20°C에서 상대습도가 흡습비에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 상대습도가 90%일 때 전 구간에서 흡습비가 가장 크게 나타나고 있다. 또한 전 구간에서 상대습도가 90%일 때의 흡습비는 70%의 3.4배, 80%의 1.9배로 동일한 온도에서 상대습도가 증가할수록 흡습비도 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

3.3.2 동할발생비

시간에 따른 동할발생을 나타내는 동할발생비(rate of crack generation)는 Nishiyama 모델(식 (5))을 시간 t 에 대하여 1차 미분하여 구할 수 있다. 그림 9는 상대습도가 동할발생비에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 흡습초기에 동할발생비가 매우 크고 시간이 경과함에 따라 지수함수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 70%와 80%의 경우도 비슷한 경향을 보이고 있지만 시간에 따른 감소 비율은 90%와 비교하여 상당히 작은 것을 알 수 있다.

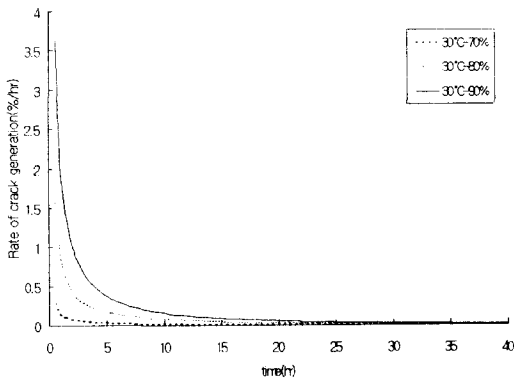


Fig. 9. Rate of crack generation as affected by relative humidity at 30°C.

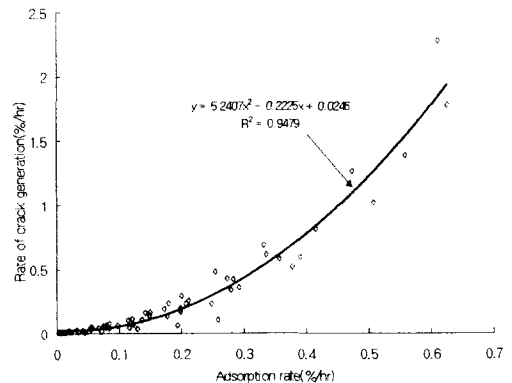


Fig. 10. Rate of crack generation for varying adsorption rates.

3.3.3 흡습비와 동할발생비

그림 10은 실험 결과를 토대로 하여 수분흡습비에 따른 동할발생비를 나타내고 있다. 동할발생비를 수분흡습비의 2차 회귀모델로 나타낸 결과, 회귀모델의 결정계수는 0.94이상으로 수분흡습비를 이용하여 동할발생비의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 벼 조질기 개발에 필요한 기초자료로서 단립종 벼의 수분흡습특성을 구명하고 동할발생을 고찰하기 위하여, 온도 3수준(20℃, 25℃, 30℃), 상대습도 3수준(70%, 80%, 90%)의 공기조건에서, 함수율이 12%정도인 '96년산 단립종 추청벼를 실험원료로 하여 항온항습기에서 흡습실험을 수행하였다.

실험 결과, 벼의 흡습은 다른 곡물의 흡습에서와 마찬가지로 실험 초기에 매우 빠르게 나타났으며, 전체 흡습량의 70% 이상이 실험시작 24시간 이내에 벼에 흡수됨을 알 수 있었다. 또한 벼의 재흡습속도는 공기의 온도에 의한 영향보다는 상대습도에 의한 영향이 크며, 상대습도가 높을수록, 공기의 온도가 낮을수록 흡습속도가 빠르게 나타났다. 벼의 흡습과정을 예측하는 흡습모델은 Page 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

흡습시 동할발생을 측정된 결과, 상대습도가 높을수록 동할이 증가하고 있고 온도의 영향은 미소하게 나타났다. 또한 동할발생모델로는 Nishiyama 모델이 Hoerl 모델보다 동할발생을 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 개발된 흡습모델과 동할발생모델을 이용하여 동할발생비를 흡습비의 2차회귀 모델로 개발하였다.

5. 참고문헌

1. 고헌균외. 1993. 농산가공기계학. 향문사.
2. 고헌균외. 1995. 미국종합처리시설. 문운당.
3. 伊藤和彦, 川村周三, 池内義則. 1985. 玄米調質に関する研究(第1報). -薄い層の調質実験-. 農業機械學會誌. 47(2):169-175.
4. Banaszek, M. M. and T. J. Siebenmorgen. 1990b. Moisture adsorption rates of rough rice. *Transactions of the ASAE* 33(4):1257-1262.
5. Banaszek, M. M. and T. J. Siebenmorgen. 1990c. Head rice yield reduction rates caused by moisture adsorption. *Transactions of the ASAE*. 33(4):1263-1269.
6. Kunze, O. R. and M. S. U. Choudhury. 1972. Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. *Cereal Chemistry*. Vol. 49:684-696.
7. Nishiyama, Y., M. Satoh and H. Shimizu. 1979. Crack generation of rough rice after drying. *Journal of the Faculty of Agriculture* 14(3): 277-288. Iwate University, Japan.