

## 단립종 벼의 수분흡습특성<sup>+</sup>

### Adsorption Characteristics of Short Grain Rough Rice

김 종 순\*

고 학 균\*

송 대 빈\*\*

정희원

정희원

J. S. Kim

H. K. Koh

D. B. Song

#### ABSTRACT

In this study short grain rough rice(Chu-cheong) with initial moisture content of around 12%(w.b.) was exposed to 3 levels of relative humidity(70, 80 and 90%) and 3 levels of temperature(20, 25 and 30℃) of the air, in order to evaluate the adsorption characteristics of rough rice and the rate of cracked kernels which will serve as the basic data when developing the quality adjusting equipment.

The result showed that the moisture content of rough rice increased rapidly during the early stages of moisture adsorption like other grains, and at least 70% of the adsorption occurred within the first 24 hours of exposure to the humid environment. Adsorption rate was more related to relative humidity than the temperature of air stream, and the higher the relative humidity, the higher the adsorption rate. And the Page's equation predicted best the adsorption process of this study.

Experimental results for the crack generation during the adsorption process showed that the higher the relative humidity the more the cracked kernels, and that the temperature had little effect. An empirical equation was developed to predict the crack ratio for the conditions of this study, and Nishiyama model predicted better the crack generation than Hoerl model.

**주요용어(Key Words):** 단립종벼(short grain rough rice), 흡습모델(adsorption model), 동할발생모델(crack generating model)

#### 1. 서 론

조질(調質)이란 파건조된 곡물의 함수율을 높여 단단한 내부조직을 연화시키고 수율을 향상시켜, 쌀의 품질을 높이는 조작을 의미한다. 조질기술은 고 품질의 쌀을 선호하는 일본을 중심으로 활발히 연구 되었으며, 특히 벼를 건조 후 현미 상태로 보관, 저장하는 일본의 경우는 현미와 백미에 대한 조질 기

술에 대해 중점적으로 연구하였다(伊藤和彦 등, 1985, 1986, 1992; 村田敏, 1994).

그런데 일본에서 널리 이용되는 현미 조질기는 벼를 투입하여 백미를 생산하는 우리나라의 도정 공정에는 적합하지 않다. 즉, 현미가 현미 조질기에서 많은 시간을 소모하게 되어 전체적인 도정 시간이 증가한다. 그러나 벼를 조질하여 도정을 하면 도정 과정에서 전체 소요시간과 제현과정에서 동력소모

<sup>+</sup> 본 연구는 '97년도 진흥청 특정연구과제 연구비 지원으로 수행되었음.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

\*\* 경상대학교 농과대학 농업기계공학과

가 감소하여 동할발생이 줄고, 미질도 향상된다. 따라서 우리나라의 실정에 적합한 벼 조질기의 개발이 필요하다.

조질기 개발에 앞서 우선 국내산 벼에 대한 흡습 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 비록 외국의 문헌에서 벼의 흡습실험 결과를 얻을 수 있으나, 같은 농산물 간에도 품종에 따라 물성이 달라 흡습특성에도 커다란 차이가 나타나기 때문에 외국의 실험 결과는 참고자료로 밖에 사용할 수 없다(Banaszek와 Sibenmorgen, 1990; Lan과 Kunze, 1996; 村田敏, 1996).

이에 본 연구는 벼 조질기 개발에 필요한 기초자료로서 단립종 벼의 수분흡습 과정을 모형화하고 동할발생율을 고찰하여 흡습속도와 동할발생의 관계를 구명하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

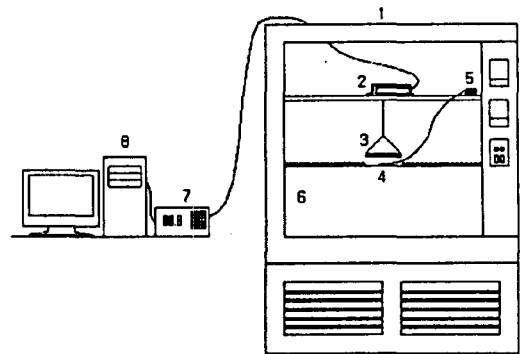
본 실험에 사용된 벼는 강원도 원주에서 1996년 10월에 수확한 추청벼이며, 실험기간동안 함수율 변화를 최소화하기 위하여 이중 비닐백에 밀봉하여 4℃의 저온저장고에 보관하였다. 실험이 시작되기 1일 전에 시료를 저온저장고에서 꺼내어 시료의 온도가 상온과 평형이 된 후에 실험에 사용하였다.

### 나. 실험장치

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

흡습과정 동안 시료의 무게를 연속적으로 측정하기 위하여 흡습실의 중앙에 로드셀을 설치하였다.

흡습실 내부의 온도와 상대습도는 항온항습기의 온·습도 조절부를 이용하여 조절하였고, 시료 트레이 아래에 온·습도 센서를 설치하여 항온항습기의 설정치와 비교한 결과, 온도는  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 상대습도는



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

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

$\pm 1\%$ 의 오차가 나타났다.

또한 시료용 벼는 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 고무틀현미기(SY88-TH, Ssangyong)를 사용하였다.

곡립품질판정기는 사용전에 동할립판별기(DC-50, Kett)에 의한 육안식별법으로 보정실험을 실시하여 다음과 같은 회귀식을 구하였다.

$$Y = 0.9799 X - 0.3645, (R^2 = 0.9434)$$

여기서, Y : 실제 동할률(%)

X : 측정된 동할률(%)

### 다. 실험내용

#### 1) 박층흡습실험

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

항온흡습기를 실험이 시작되기 약 2시간 전에 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 오븐법(10g-135℃-24시간)으로 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) 동할 측정 실험

박층흡습 실험과 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 2,000립을 대상으로 곡립품질판정기를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 박층흡습실험

그림 2는 공기의 온도가 20℃ 일 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℃, 30℃의 경우도 20℃와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

그림 3은 상대습도가 80% 일 때 온도에 대한 함수율 변화를 시간에 따라 나타내고 있다. 20℃와 25℃ 온도조건에서 흡습곡선에 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 초

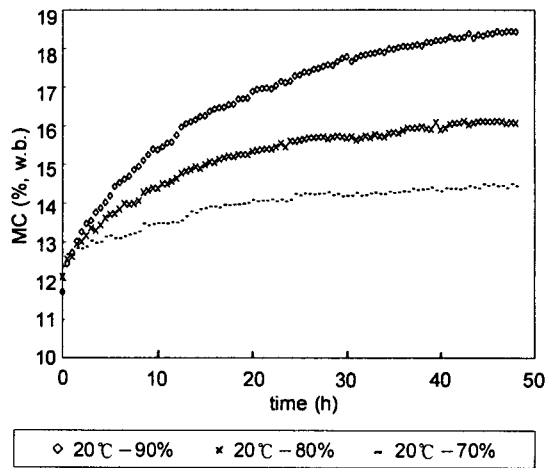


Fig. 2 Experimental moisture content data for rough rice exposed to an airstream at 20℃.

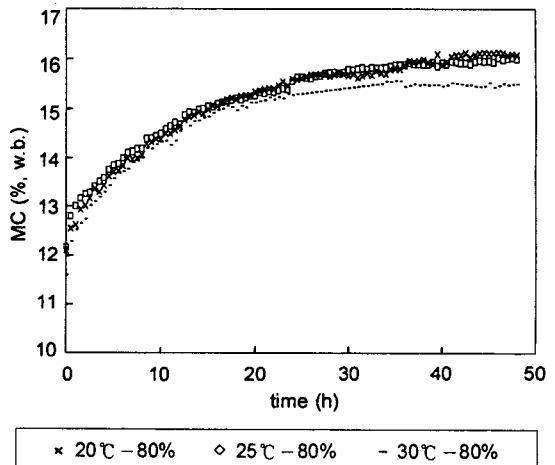


Fig. 3 Experimental moisture content data for rough rice exposed to an airstream at 80% relative humidity.

기함수율)들에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다.

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

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

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

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

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

앞에서 제시한 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.

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

여기서, T : 공기의 온도(℃)  
 RH : 상대습도(dec.)

위 식에서 변수는 SAS의 STEPWISE PROC를 이용하여 유의 수준 5% 이하가 되는 조합으로 구성되었다. 표 1은 이렇게 구한 실험 상수들을 나타내고 있다.

표 1에서 보는 바와 같이 지수함수 모델의 k와 축소 수분확산 모델의 k 그리고 Page 모델의 k는 여러 흡습조건에 대하여 모두 5%의 유의 수준에서 유의성이 인정되었다.

본 연구에서는 9회 실험결과를 이용하여 회귀모델을 개발하고, 18회의 실험결과를 이용하여 개발된 회귀모델을 검증하였다. 회귀모델의 적합도는 예측값의 표준오차(Standard Error of Calibration : SEC)와 결정계수(R<sup>2</sup>)를 통해 평가하였다. 또한 회귀모델의 검증은 모델의 개발에 사용하지 않은 실험데이터와 회귀모델로 예측한 값과의 오차(Standard Error of Prediction : SEP)로 평가하였다.

표 2는 개발된 모델의 결정계수와 SEC, SEP를 나타내고 있다. 표 2에서 세 가지 흡습모델의 결정계수가 모두 0.94 이상으로 높게 나타났으며, 특히

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

Model	Estimated parameter	R <sup>2</sup>	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
	$n = 1.060972 - 1.592715E-2(T * RH)$	0.5394	8.20

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

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

Page 모델은 결정계수가 가장 크고 예측값의 표준오차(SEC, SEP)가 세 모델중에서 가장 낮아 실험치와 가장 잘 적합하는 흡습모델로 판단된다.

그림 4는 온도 30℃, 상대습도 90%에서 시료의 함수율 변화를 각 모델에 의해 예측한 그림이다. 지수 함수 모델의 예측 함수율은 전 구간에 걸쳐 실험치와 상당한 오차를 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 온도 30℃, 상대습도 90% 조건에서 Page 모델이 가장 잘 예측하는 것으로 판단된다.

나. 동할 측정 실험

그림 5는 공기의 온도가 20℃ 일 때, 시간에 따른 동할발생율을 상대습도별로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 흡습초기에 동할이 급격히 증가하고 있다. 상대습도가 70%인 경우는 흡습속도가 빠르지 않아 동할의 증가가 크지 않고, 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.

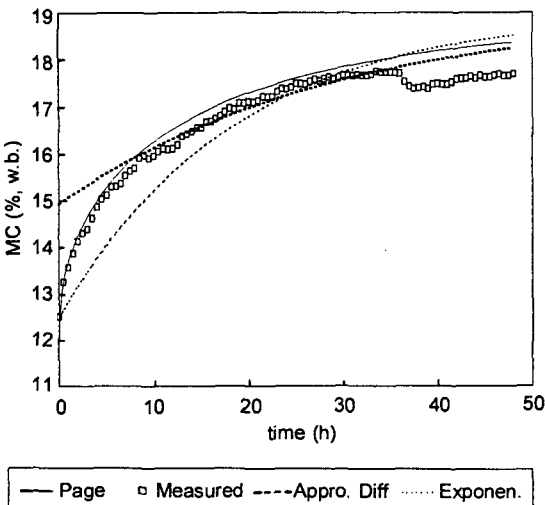


Fig. 4 Measured and fitted moisture content with adsorption models for rough rice at 30℃, 90% relative humidity.

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

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

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

- 여기서,  $C_t$  : 시간 t에서의 동할발생율(%)
- $C_o$  : 초기 동할발생율(%)
- $C_e$  : 최대 동할발생율(%)

Hoerl 방정식과 Nishiyama 방정식은 모두 선형화가 가능하며, 선형화된 모델을 각 실험 데이터에 적용하여 실험상수를 구하였다. 이 실험상수들은 공기의 온도, 상대습도, 초기함수율에 영향을 받기 때문에, 실험상수들을 종속변수로 하고 공기의 온도, 상대습도, 초기 함수율의 조합에 의한 항들을 독립변수로 하는 모델을 가정하였다.

$$\text{실험상수} = c_1T + c_2T^2 + c_3RH + c_4(RH)^2 + c_5(\text{IMC}) + c_6(T * RH * \text{IMC})$$

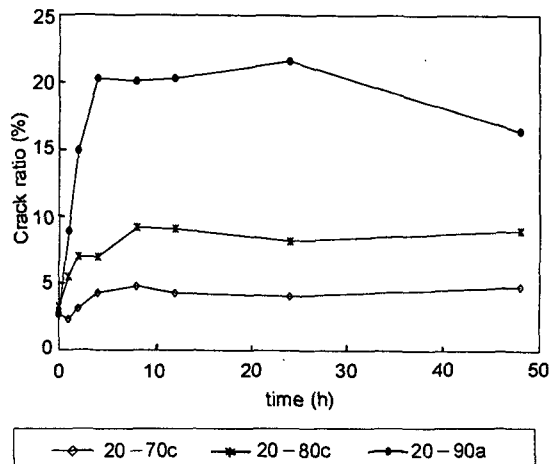


Fig. 5 Cracked kernel ratio for rough rice exposed to an airstream at 20℃.

여기서, T : 공기의 온도(℃)  
 RH : 상대습도(dec.)  
 IMC : 벼의 초기함수율(%w.b.)

위 식에서 변수는 SAS의 RSQUARE PROC를 이용하여 결정계수가 가장 큰 항들의 조합으로 구성되었다. 표 3은 이렇게 구한 실험 상수들을 나타내고 있다.

동할발생 모델도 흡습 모델에서와 마찬가지로 9회 실험결과를 이용하여 회귀모델을 개발하고, 18회의 실험결과를 이용하여 개발된 회귀모델을 검증하였다. 표 4는 개발된 모델의 결정계수와 SEC, SEP를 나타내고 있다.

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.

그림 6은 온도 20℃에서 Nishiyama 방정식으로 예측한 값과 실제 측정값을 그림으로 나타낸 것이다. 상대습도가 70%와 80%일 경우에는 오차가 작고, 상

대습도가 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.

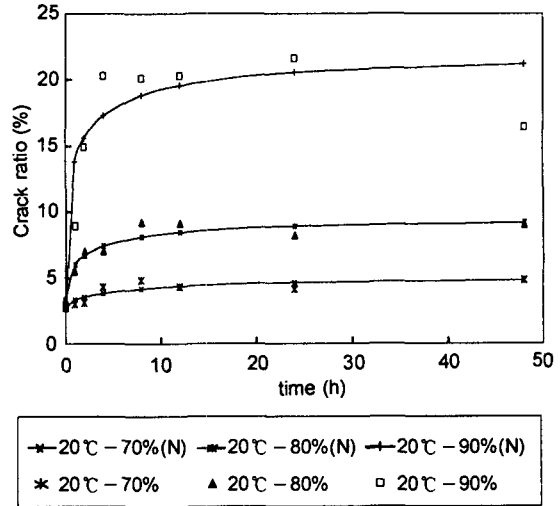


Fig. 6 Measured and fitted crack ratio with Nishiyama equation for rough rice at 20℃.

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

Model	Estimated parameter	R <sup>2</sup>
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

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

Model	R <sup>2</sup>	SEC	SEP
Hoerl	0.6272	5.54	12.366
Nishiyama	0.9447	1.59	3.062

다. 흡습비와 동할발생비

1) 흡습비

시간에 따른 함수율 변화의 비율을 나타내는 흡습비(adsorption rate)는 Page 모델(식 (3))을 시간 t에 대하여 1차 미분하여 구할 수 있다. 그림 7은 20℃에서 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.

2) 동할발생비

시간에 따른 동할발생을 나타내는 동할발생비(rate of crack generation)는 Nishiyama 모델(식 (5))을 시간 t에 대하여 1차 미분하여 구할 수 있다. 그림 8은 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

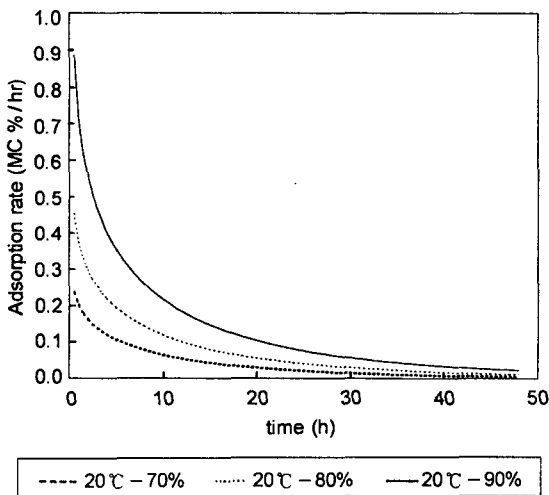


Fig. 7 Adsorption rate as affected by relative humidity at 20℃.

감소 비율은 90%와 비교하여 상당히 작은 것을 알 수 있다.

3) 흡습비와 동할발생비

그림 9는 실험 결과를 토대로 하여 수분흡습비에 따른 동할발생비를 나타내고 있다. 동할발생비를 수분흡습비의 2차 회귀모델로 나타낸 결과, 회귀모델의 결정계수는 0.94 이상으로 수분흡습비를 이용하여 동할발생비의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

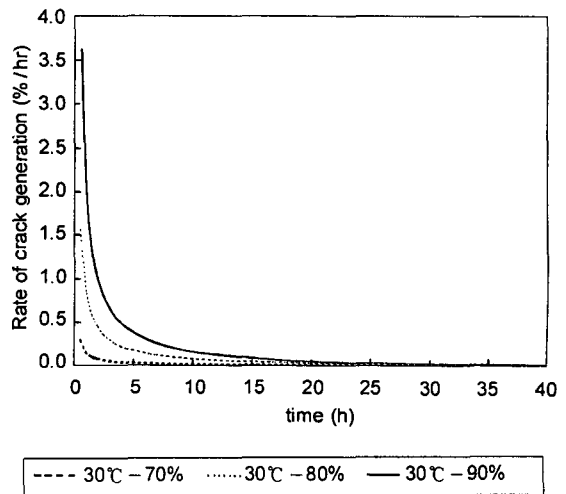


Fig. 8 Rate of crack generation as affected by relative humidity at 30℃.

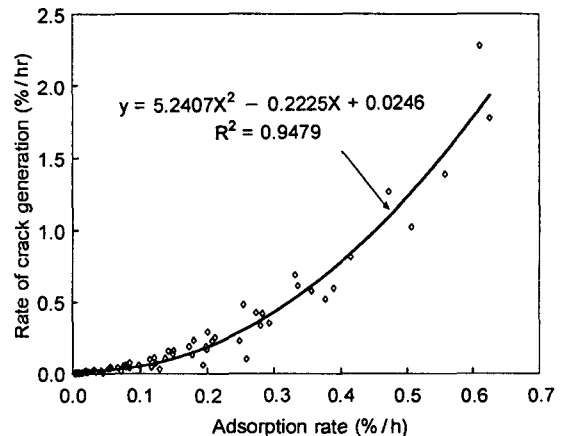


Fig. 9 Rate of crack generation for varying adsorption rates.

#### 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 흡습속도가 빠르게 나타났다. 벼의 흡습과정을 예측하는 흡습모델은 Page 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

흡습시 동할발생을 측정할 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.

#### 참 고 문 헌

1. 고태균 외. 1993. 농산가공기계학. 향문사.
2. 고태균 외. 1995. 미곡종합처리시설. 문운당.
3. 송문섭, 이영조, 조신섭, 김병천. 1992. SAS를 이용한 통계자료분석. 자유아카데미.
4. 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.
5. 伊藤和彦, 川村周三, 池内義則. 1986. 玄米調質に関する研究(第2報). - 厚い層の調質実験 -. 農業機械學會誌. 47(4):443-451.
6. 伊藤和彦, 川村周三, 池内義則. 1992. 玄米調質に関する研究(第3報). - 相互通風方式による厚層の調質実験 -. 農業機械學會誌. 54(2):59-66.
7. 村田敏, K. S. P.アマラトウソガ, 田中史彦, 宮内樹代史, 堀善昭. 1994. 精白米の眞空下における吸濕特性の研究. 九州農學芸誌. 48(3): 139-149.
8. 村田敏, 田中史彦, 徳永淳一, 小出章二, K. S. P.アマラトウソガ. 1996. 穀物の吸水に関する研究. 農業機械學會誌. 58(2):19-24.
9. Banaszek, M. M. and T. J. Siebenmorgen. 1990b. Moisture adsorption rates of rough rice. Transactions of the ASAE 33(4):1257-1262.
10. Lan, Y. and O. R. Kunze. 1996. Moisture adsorption rates by different form of rice. Transaction of the ASAE. 39(3):1035-1038.
11. 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.