

## 담배의 수분 흡착 특성과 흡착 등온식의 모델에 관한 연구

오인혁\* · 김기환 · 정경락<sup>1)</sup>

한국인삼연초연구원

<sup>1)</sup>전북대학교 공과대학 화학공학부

(1996년 11월 11일 접수)

## Adsorption Isotherms Models and Moisture Adsorption Characteristics of Tobacco

In-Hyeog Oh\*, Ki-Hwan Kim and Gyeong-Rak Jheong<sup>1)</sup>

*Korea Ginseng and Tobacco Research Institute*

<sup>1)</sup>*School of Chemical Engineering, Chonbuk National University, Chonju, Korea*

*(Received Nov. 11, 1996)*

**ABSTRACT** : In this study, to obtain the basic data for the optimum moisture control system, moisture adsorption characteristics, adsorption isotherms models for water and surface physical characteristics of burley and flue-cured tobacco were investigated. By the hypothesis' the phenomenon of moisture adsorption of tobacco is the same as the first order reaction, the wetting constant (k) and equilibrium moisture content were obtained. And activation energy, frequency factors were also calculated by applying its data to Arrhenius equation. The Kamei's empirical formula of moisture adsorption isotherms showed the best agreement with the experimental data and its correlation coefficient (r) was 0.997. It can be seen that specific surface area of burley is 157 m<sup>2</sup>/g, that of flue-cured is 152 m<sup>2</sup>/g,  $-\Delta H_1^0$  of adsorbed monolayer is 45,972 J/mol, 45,486 J/mol, respectively, and the condensation heat (40,595 J/mol) being caught in adsorbed multilayer is less than that of monolayer.

**key words** : tobacco, equilibrium, adsorption isotherms, models, specific surface area

---

\* 연락처 : 305-345, 대전광역시 유성구 신성동 302번지, 한국인삼연초연구원

\* Corresponding Author : *Korea Ginseng and Tobacco Research Institute, 302 Shinseong-Dong, Yuseong-Ku, Taejeon 305-345, Korea*

담배제조 공정중에 수분조절은 원료 잎담배의 손실방지, 부풀성 및 연소성 등의 물리적 성질과 담배맛에 큰 영향을 미친다(Chang et al., 1973). 수분을 효율적으로 관리하고 수분의 표준설정과 관리 시스템을 개발하기 위하여는 잎담배의 흡착률, 조화시간과 평형함수율 등에 관한 많은 자료와 잎담배 자체의 구조적 특성 및 이화학적 특성과의 상호관계에 대한 지식을 필요로 한다. 특히 담배 가향공정 중에는 여러가지 휘발성 향료물질을 회전식 가향기 내에서 잎담배 표면에 뿌려주어 증발 흡착되는 과정을 거친다. 그러므로 가향공정의 최적조건을 찾기 위하여는 수증기나 휘발성 향료성분에 대한 다성분계 흡착 평형에 대한 지식 습득이 필수적이라고 할 수 있다.

Walton과 그의 동료들은(1970, 1976) 온도와 상대습도에 따른 잎담배의 수분 흡착상수와 평형함수율을 계산하는데 지수식을 적용하였으며, Young과 Bunn(1965)은 일정한 상대습도 하에서 온도에 따른 잎담배의 수분 확산률을 구하는데 증기확산식을 이용하였다. 또한 Muramatsu et al. (1979)과 Furusawa and Nozawa (1965, 1966)는 상대습도에 따른 여러가지 잎담배의 평형함수율을 수식으로 표현할 수 있는 실험식을 구했으며, 특히 Muramatsu et al.(1979)은 BET 흡착 등온식과 같은 형태의 Kamei and Suzuki(1941) 실험식에 적용하여 그 상수들을 결정하였다. 그리고 Kiranoudis et al. (1990)은 잎담배에 대한 수분 흡착량을 여러가지 흡착 등온식에 적용하여 그 상관정도에 대하여 연구 보고한 바 있다. Samejima et al. (1978)은 잎담배의 흡착 등온 곡선을 구하여 BET의 다분자층 흡착등온식에 적용하여 단분자층을 형성하는 최대 함수율을 보고한 바 있다. 그리고 Masuo et al.(1964)은 잎담배의 수분 흡착 특성을 연구 보고한 바 있다. Chang and Johnson(1973)은 담배의 착엽 위치와 비표면적 및 비체적 사이의 관련성에 대하여 보고한 바 있으며, Samejima et al.(1977)과 Nakanishi and Kobari(1989, 1991)은 담배상의 세공 경분포(pore-size distribution)에 대하여 이미 논의한 바 있다.

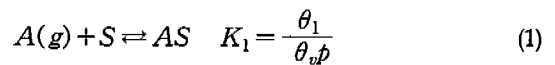
잎담배와 같은 다공성 재료에서의 흡착과정은 일반적으로 다분자층의 등은 흡착과정으로 여겨지

는데, 즉 상대습도가 극히 낮은 경우를 제외하고는 수분과 잎담배의 표면사이에는 van der Waals의 힘이 작용하여 물리흡착이 일어난다(Nakanishi et al., 1989). 그러므로 흡착된 수분은 잎담배 표면에 약하게 묶여 있고 흡착열은 적으므로 온도가 올라가면 흡착량은 현저히 감소된다. 이러한 특성에 대한 연구는 잎담배의 표면 구조뿐만 아니라 표면에서 발생하는 수분과의 상호작용에 대한 이해에 도움이 될 것으로 생각된다.

황색종 담배잎은 일반적으로 조직이 치밀하므로 밀도가 높고 킁미는 완화하면서도 향기와 감미가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 버어리종은 부풀성, 연소성과 보향성과 같은 물리적 성질은 좋으나 향기 성분이 부족하다. 이러한 특성을 갖는 두 가지 시료에 대하여 각 조건 별로 평형함수율을 구하고 흡착상수(k)는 Arrhenius 식에 적용하여 활성화 에너지와 잠열을 계산할 수 있었다. 상대습도 변화에 따른 평형함수율을 BET 흡착 등온식과 그 밖의 모델들에 상관화하여 실험식을 찾아 비교 고찰하고, 흡착제로서의 잎담배 표면 구조성질인 비표면적과 단분자층의  $-\Delta H_1^0$ 도 구하였다.

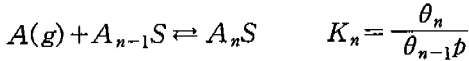
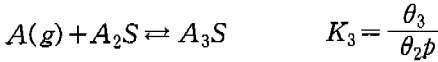
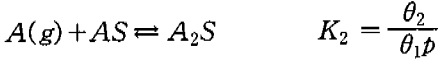
## 이 론

원료 잎담배의 건조과정 중에는 탈수가 시작되면서 담배잎은 수축되어 주름살이 증가되고 내용 성분이 분해되어 내부 공극은 커진다. 잎담배 표면은 다공성 고체면으로 이루어져 있기 때문에, 수분이 흡착되는 과정을 Brunauer, Emmet 및 Teller의 다분자층 흡착 이론에 적용할 경우, 흡착의 첫 단계는 Langmuir 흡착등온식과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서 A는 흡착질인 수분이고 S는 흡착제인 잎담배 표면의 빈자리를 나타내며 AS는 흡착된 A분자나 표면의 점유된 자리를 나타낸다. 또  $K_1$ 은 평

형상수,  $\theta_1$ 은 단일 분자로 덮인 표면 흡착 자리의 분율, 그리고  $\theta_2$ 는 빈자리의 분율,  $p$ 는 기체의 압력이다. 이어서 다음 단계로 분자들이 서로 위에 올라 앉아 다분자층을 형성한다면 다음과 같은 평형을 이룬다고 할 수 있다.



A분자와 표면 자리 사이의 상호작용은 A분자와 표면의 성질에 따라 다르기 때문에, 첫 번째 분자의 흡착과정을 제외하면 모든 흡착과정의 조건이 동일하므로 평형상수 값은 같다고 할 수 있다.

$$K_2 = K_3 = K_4 = \dots = K_n = K \quad (2)$$

여기서  $K$ 는  $A(g) \rightleftharpoons A(\text{liquid})$  반응에 대한 평형 상수이며, 액체의 평형 증기압을  $p^\circ$ 라고 할 때 다음과 같이 주어진다.

$$K = \frac{1}{p^\circ} \quad (3)$$

그리고 상수  $c$ 는

$$c = \frac{K_1}{K} \quad (4)$$

이러한 평형 조건에서의 BET 흡착 등온식을 구하면 다음과 같다.

$$M_e = \frac{M_m c p}{(p^\circ - p)[1 + (c-1)(p/p^\circ)]} \quad (5)$$

이다. 식 (5)에서 우변의 분모와 분자를 모두  $p^\circ$ 로

나누어 변형하면 다음과 같다.

$$M_e = \frac{\left(\frac{p}{p^\circ}\right)}{\left(\frac{1}{M_m c}\right) + \left(\frac{c-2}{M_m c}\right)\left(\frac{p}{p^\circ}\right) - \left(\frac{c-1}{M_m c}\right)\left(\frac{p}{p^\circ}\right)^2} \quad (6)$$

식 (6)은 Kamei et al.(1941)의 실험식과 동일한 형태의 흡착 등온식이다. 또한 상수  $c$ 와  $M_m$ 을 구하기 위하여 식 (5)의 양변에  $(p^\circ - p)/p$ 를 곱하여 양변의 역수를 취하면

$$\frac{p}{M_e(p^\circ - p)} = \frac{1}{M_m c} + \left(\frac{c-1}{M_m c}\right)\left(\frac{p}{p^\circ}\right) \quad (7)$$

이다. 측정치로서 좌변의 양을 구한 다음 이것을  $p/p^\circ$ 에 대하여 도시하면 직선의 절편 ( $1/M_m c$ )와 기울기  $(c-1)/(M_m c)$ 로부터  $M_m$ 과  $c$ 의 값을 구할 수 있다.

그리고 주어진 온도에서의 포화 수증기압은 Calingaert의 식에 적용하여 구하였다.

$$\log p^\circ = 7.991 - \frac{1687}{T-43} \quad (8)$$

SIP에서의  $M_m$ 값으로 다음식을 이용하여  $N_m$ 을 계산할 수 있다.

$$N_m = N_A \frac{M_m}{18 \text{ g/mol}} \quad (9)$$

그러므로 한 분자가 차지하는 넓이  $\alpha$ 를 알면 흡착제인 잎담배의 단위 질량이 갖는 표면적( $s$ )을 계산할 수 있다.

$$s = \frac{\text{넓이}}{\text{단위질량}} = N_m \alpha \quad (10)$$

평형상수  $K_1$ 과  $K$ 는 해당하는 변환의 표준 Gibbs 에너지 변화로 나타낼 수 있다.

$$K_1 = e^{-\Delta G_1^{\circ}/RT}, \quad K = e^{-\Delta G_{liq}^{\circ}/RT} \quad (11)$$

식 (4)에 대입하면

$$c = \frac{K_1}{K} = e^{-(\Delta G_1^{\circ} - \Delta G_{liq}^{\circ})/RT} \quad (12)$$

이다. 한편 표준 Gibbs 에너지 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta G_1^{\circ} = \Delta H_1^{\circ} - T\Delta S_1^{\circ}, \quad \Delta G_{liq}^{\circ} = \Delta H_{liq}^{\circ} - T\Delta S_{liq}^{\circ}$$

그런데  $\Delta S_1^{\circ} \approx \Delta S_{liq}^{\circ}$  이라면 식 (11)은 다음과 같이 된다.

$$c = e^{-(\Delta H_1^{\circ} - \Delta H_{liq}^{\circ})/RT} \quad (13)$$

또한  $\Delta H_{liq}^{\circ} = -\Delta H_{vap}^{\circ}$  이므로

$$c = e^{-(\Delta H_1^{\circ} + \Delta H_{vap}^{\circ})/RT}$$

이다. 양변에 대수를 취한 다음 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta H_1^{\circ} = -\Delta H_{vap}^{\circ} - RT \ln c \quad (14)$$

## 재료 및 방법

### 1) 담배각초 시료 및 실험

담배각초 시료는 각폭을 0.9mm로 절각한 버어리종(Burley21 후3등)과 황색종(NC82 후3등)을 사용하였다. 온도는 25℃에서 상대습도가 조절된 조건하에서 데시케이터 별로 실험을 수행하였다.

수분 흡착 실험용 시료는 80℃의 열풍순환식 건조기에서 약 2시간 건조시켜 시료의 수분을 균일하게 예비 건조한 후 시료 약 2g을 평량병(50ml)에 넣어 정확히 칭량하고, 그 시료는 각 R.H. 조절용

용액이 든 데시케이터에 넣어 25℃로 온도가 조절된 조화기내에서 흡착조화시켰다. 흡착조화된 시료는 약 100시간에 걸쳐 평균 10시간 간격으로 정확히 칭량하고, 그 시료는 다시 100℃의 열풍순환식 건조기에서 3시간 건조한 후 칭량하였다.

### 2) 평형함수들의 계산

수분의 흡착에 따른 평형함수들을 계산하기 위하여 다음과 같은 미분식을 사용하였다. 즉 수분의 흡착과정을 1차 반응과 동일한 형태로 가정하면 반응속도 상수 k(단 여기서는 흡착상수)를 이용한 1차반응식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM}{dt} = k(M - M_e) \quad (15)$$

상기 (15)식을 적분하면 수분 흡탈착에 대한 유용한 지수식(16)을 얻을 수 있다.

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-kt} \quad (16)$$

각 시간 별 함수를 자료에서 식 (16)과 같은 형태로 상관화시켜 실험식을 구한 후 평형함수들을 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1) 흡착상수(k)

60% R.H.에서 각 시료의 시간 경과에 따른 함수를 측정치와 식 (16)과 같은 실험식의 곡선을 비교하여 본 결과 Fig. 1에서 보는 바와 같이 거의 동일함을 알 수 있었고, 이는 담배각초 상에서 수분의 흡착량이 거의 지수적으로 증가됨을 확인할 수 있었다. 그러므로 담배각초 표면에서 일어나는 수분의 흡착과정을 1차반응식과 동일하게 사용할 수 있다. Fig. 2는 황색종의 경우로서 상대습도 별로 시간에 따른 함수들의 변화를 보여주는데 상대습도가 높을수록 평형함수들은 커지며 평형에도

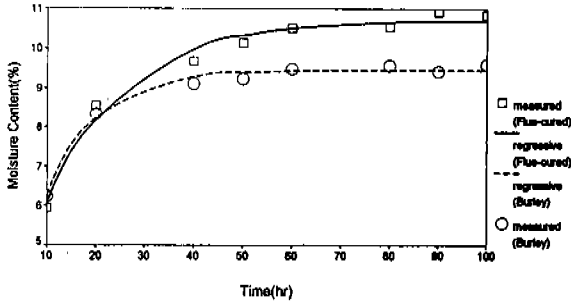


Fig. 1. Moisture content changes of tobaccos at 60% R. H., 25°C.

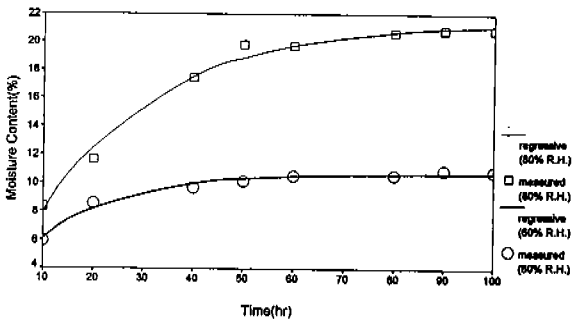


Fig. 2. Moisture content with change of R. H. at 25°C (flue-cured tobacco).

달 하는 시간도 길어진다. 그리고 Arrhenius가 처음으로 밝혀낸 속도상수 k와 온도 사이의 관계를 나타내는 식 (17)에 적용하면 반응속도 즉 흡착속도는 온도 상승에 따라서 아주 예민하게 증가됨을 알 수 있다.

$$k = F e^{-E^*/RT} \quad (17)$$

상수 F는 잿음률이라고 하며 E\*는 활성화 에너지이다. 식 (17)을 다음과 같이 대수꼴로 바꿀 수 있다.

$$\log_{10} k = \log_{10} F - \frac{E^*}{2.303RT} \quad (18)$$

몇몇 온도에서 k값을 측정하고  $\log_{10} k$ 를 1/T에 대하여 도시하면 그 곡선의 기울기로 부터 활성화 에너지를 구할 수 있고 그 절편으로 부터는 잿음률을 구할 수 있다. 비록 잿음률이 온도에 약간 영향을 받기는 하지만 온도 범위가 크지 않으면 그 영향을 무시할 수 있다. 본 실험에서는 온도의 변화에 따른 담배각초의 흡착특성에 관해서는 데이터를 얻지 못하였으므로 Walton and Henson (1970)이 보고한 Table 1의 자료를 이용하여 잎담배의 특성에 대해서 알아보았다.

Table 1. Values of coefficient k(hour) from equation (16) for burley tobacco leaves in a casing environment (Walton et al., 1970)

Temperature (°C)	Relative humidity (%)		
	75	85	93
21.11	0.23	0.15	0.10
15.56	0.16	0.11	0.07
10.00	0.08	0.06	0.04
4.44	0.08	0.05	0.04

Table 2. Values of activation energy E\*(J/mol) and frequency factor F(hour) from equation (18) for burley tobacco leaves in a casing environment

Contents	Relative humidity (%)		
	75	85	93
E*	46,962	47,573	40,216
F	$4.78 \times 10^7$	$4.18 \times 10^7$	$1.30 \times 10^6$

액상의 수분은 기화된 후 다공성 재료의 표면에 흡착되므로 Arrhenius의 식에 적용한다면 활성화에너지 E\*는 수분의 증발열보다 약간 클 것으로 예상된다. 그 이유는 흡착되기 전에 조화기 내의 수분은 혼합 용액으로 존재하므로 증발하

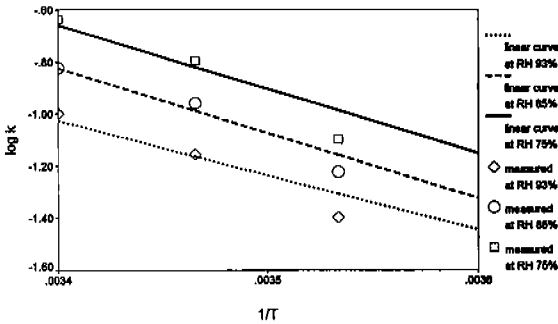


Fig. 3. Plot of log k vs. 1/T at various R. H. conditions.

는데 필요한 열량은 순수한 물의 증발열(40,595 J/mol)보다 크기 때문인데, Table 2에서와 같이 93% R.H.를 제외하고는 활성화에너지 값이 15.7-17.2% 정도 큰 것을 확인할 수 있었다. 즉 이 사실은 액상 수분의 흡착과정을 1차 반응식과 같은 형태로 가정하여 Arrhenius 식에 적용할 수 있다는 사실을 시사해준다. 두 번째 이상의 흡착층에서는 근본적으로 순수한 물의 액체화 과정과 동일하여 순수한 물의 응축열에 해당하는 엔탈피 변화량은 75~85% R.H. 범위의 활성화 에너지보다 작으므로, 전체 계 내에서의 흡착과정은 수분을 기준으로 흡열과정으로 볼 수 있다. 그러나 잎담배 표면에서 첫 번째 흡착 층의 특성에 대해서는 엔탈피 변화량에 대한 자료가 없으므로 알 수 없었다.

## 2) 흡착 등온식의 모델들

일반적으로 담배각초의 경우에 96시간 정도 흡착시키면 충분히 평형상태에 도달하는 것으로 알려져 있는데(진 등, 1981), 본 실험에서는 시간 경과에 따른 각 시료별, R.H.별 함수율의 변화를 식 (16)에 적용하여 얻은 상관식을 통해 평형함수율을 구하였다. 각 평형함수율을 상대습도 별로 도시한 흡착 등온곡선은 Fig. 4와 같이 sigmoid형의 곡선을 나타낸다. 담배 종류별로는 43~68% R.H. 범위를 제외하고 대체적으로 버어리종의 평형함수율이

높다고 할 수 있다. 그러나 일반적으로 황색종의 평균 당함량이 20%로서 버어리종의 1% 미만보다 훨씬 많으므로, 상대습도가 높아지면 당이 용해하면서 더 많은 수분을 흡착하기 때문에 상대적으로 평형함수율이 크다고 알려져 있다(진 등, 1981; Nakanishi et al., 1989). 그러나 본 실험에서는 오히려 버어리종의 평형함수율이 대체적으로 높은 이유로서, 담배각초의 특성인 두께, pore space, 열밀도 등도 당과 함께 평형함수율에 영향을 미칠 수 있으며, 또한 반대의 현상을 나타낸 Nakanishi and Kobari(1989)의 실험에서는 휘발성 물질을 제거하는 시료의 전처리 작업을 하였던 반면, 본 실험에서는 그러한 과정을 거치지 않아 수분이 직접 당과 접촉할 수 없게 된 점도 그 이유 중의 하나로 추측된다.

버어리종은 65% R.H., 황색종은 78% R.H. 부근에서 평형함수율이 크게 증가되는데 그 이유는 이 부근에서 기체가 완전히 액화되기 시작하기 때문이다.

담배각초의 등은 흡착곡선은 일반적으로 Brunauer의 다섯가지 흡착 등은 곡선 중에 다공성 흡착제의 형태와 비슷하다. 이는 Kiranoudis et al.(1990)이 보고한 논문에서의 곡선과 본 실험에서 측정된 10~90% R.H. 범위의 곡선(Fig. 4)에서도 그 형태가 비슷함을 알 수 있었다.

버어리종과 황색종 담배의 흡착 등온곡선을 Table 3과 같은 여러가지 형태의 실험식에 적용하

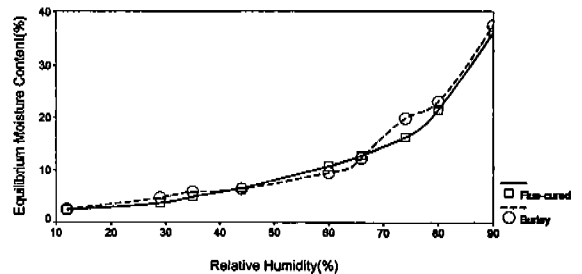


Fig. 4. Adsorption isotherms for moisture of tobaccos according to various levels of R. H. at 25°C.

Table 3. Regression analysis of adsorption isotherms models

	Equation <sup>1)</sup>	r <sup>2)</sup>
1. Kamei(BET)	$y = x / (a + bx - cx^2)$	0.998
2. Gladkov	$y = a - b(100 - x)^{1/2}$	0.891
3. Furusawa : for flue-cured burley	$y = a + bx + cx^2$ $y = a + bx + cx^2 + dx^3$	0.988
4. Henderson	$x = 1 - \exp(ay^b)$	0.987
5. Halsey	$x = \exp(by^a)$	0.996
6. Chung and Pfof	$x = \exp(a \exp(by))$	0.971
7. Crump	$y = \frac{ax(c \exp(d)) / ((1-x)(1-(1-c \exp(d))x)) + (bc \exp(d)x^2) / (1+c \exp(d)x)}$	0.994
8. Kiranoudis	$y = a / (1-x)^b + cx$	0.991

<sup>1)</sup> y is the equilibrium moisture content, x is the relative humidity and a, b, c and d are the constants.

<sup>2)</sup> r is the average of correlation coefficients for burley and flue-cured tobacco.

여 그 결과를 비교하여 나타내었다. 여기서 각 상관식의 상관계수는 통계처리 프로그램(SPSS for Windows Release 6.1)을 이용하여 구하였다.

Table 3에서 1~6과 8번 모델을 상관화 시키는 방법으로 Levenberg- Marquardt (sum-of-squares convergence : 1E-8, parameter convergence 1E-8) 방식을 사용하였고, 7번 모델의 예측 방법으로는 Sequential quadratic programming (step limit : 2, optimality tolerance : default, function precision : default, infinite step size : 1E+20) 방식을 적용하여 실험식을 구하였다.

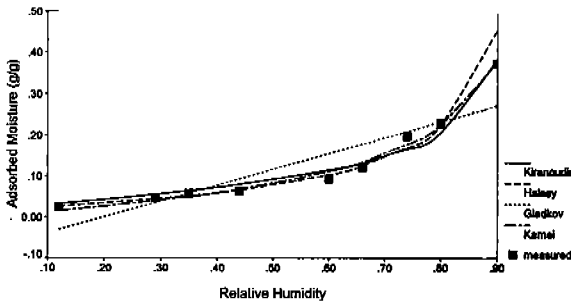


Fig. 5. Regression analysis of moisture adsorption isotherms models for burley.

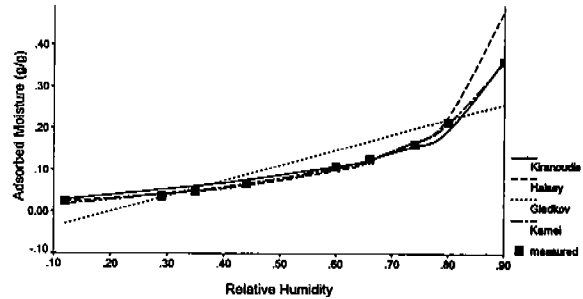


Fig. 6. Regression analysis of moisture adsorption isotherms models for flue-cured.

그 결과 2번 모델을 제외하고는 버어리종과 황색종 담배각초의 흡착 등은 모델로서 적합하였으며, 1번 모델과 5번 모델은 아주 적합하였다. 그리고 4가지 모델에 대한 흡착 등은 곡선을 담배 종류 별로 Fig. 5와 6에 나타내어 보았다.

### 3) 비표면적과 단분자층의 $-\Delta H_1^0$

Table 3의 1번 모델과 같은 담배각초의 수분 흡착곡선을 통해 Brunauer-Emmett-Teller(BET) 식이 상대습도 0.10~0.90 범위내에서 잘 적용됨을 알

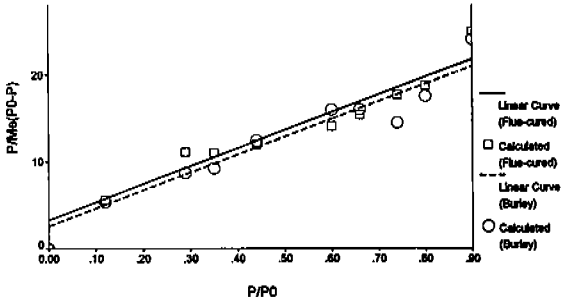


Fig. 7. Plot of  $P/Me(PO-P)$  vs.  $P/PO$  at  $25^{\circ}C$ .

수 있다. 단분자층의 흡착량  $M_m$ 과  $c$ 를 구하기 위해서 식 (7)에 적용하여 도시하면 Fig. 7과 같다. 각 직선의 기울기와 y축의 절편을 연립하여 풀면, 버어리종의 단분자층 흡착량은  $0.0436g/g$ 이며, 황색종은  $0.0421g/g$ 이다. 버어리종의 경우에는 진 등(1981)이 보고한  $0.0514g/g$ 과 Nakanishi and Kobari(1989)의  $0.064g/g$  보다는 작고, Samejima et al.(1978)의  $0.0440g/g$ 와는 거의 일치함을 보여 주었다. 황색종의 경우에는 진 등(1981)의  $0.0317g/g$  보다는 크고 Nakanishi and Kobari(1989)의  $0.047g/g$  보다는 작음을 나타내 주었다. Salwin(1963)은 건조식품이 가장 안정한 저장성을 나타내주는 수분 함량은 그 식품의 표면에서 단분자층 흡착량과 일치한다고 보고하였다. 따라서 버어리종은 약 4.36%, 황색종은 약 4.21% 정도의 함수율이 저장성에 좋음을 보여준다. 그리고 단분자층의 흡착량을 식 (9)와 (10)에 적용하여 풀면, 버어리종과 황색종의 비표면적은 각각  $157 m^2/g$ ,  $152 m^2/g$ 이다. 이 비표면적 값들은 Nakanishi and Kobari(1989)가 보고한  $170 m^2/g$ ,  $231 m^2/g$  보다는 상당히 작은데, 이러한 차이는 시료의 휘발성 물질을 제거해 주는 전처리 과정의 유무에 따라 발생한 것으로 보인다. 또한 버어리종과 황색종의 흡착열 상수  $c$ 는 8.762와 7.191인데 이 값을 식 (14)에 적용하여 단분자층의  $-\Delta H_1^0$ 를 구하면 각각  $45,972 J/mol$ ,  $45,486 J/mol$ 인데, 물의 응축열( $40,595 J/mol$ )만을

흡수하는 두 번째 이상의 층에 비해서 흡착제인 담배각초 표면이 흡수하는 열량이 크다는 사실을 알 수 있다. 이는 Nakanishi and Kobari(1989)가 보고한 결과와도 잘 일치한다.

## 결론

국내산 버어리종과 황색종 담배각초의 수분 흡착 특성과 흡착 등온식의 모델 및 표면 구조 성질을 알아보기 위한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 담배각초 표면에서 발생하는 수분의 흡착과정을 1차 반응식과 동일한 형태로 가정하여 흡착상수(k)와 평형함수율을 구할 수 있었다.
- 2) 담배각초의 수분 흡착시 흡착상수(k)와 온도와의 관계를 나타내주는 Arrhenius 식에 적용하여 활성화 에너지  $E'$ 와 깃음틀  $F$ 를 구할수 있었는데, 75~85% R.H. 범위의 활성화 에너지  $E'$ 는  $46,962 \sim 47,573 J/mol$ 로서 순수한 물의 증발열( $40,595 J/mol$ ) 보다 약간 클 것이라는 예측과 잘 일치하였다.
- 3) 흡착 등온 곡선에서 버어리종은 65% R.H., 황색종은 78% R.H. 부근에서 기체가 완전히 액화되므로 평형함수율이 급격히 증가됨을 보여주었다.
- 4) BET식 형태를 갖는 Kamei의 흡착 등온식 모델과 그의 7가지 종류의 모델을 본 실험 데이터와 상관화시켜 본 결과로서, Gladkov의 모델을 제외하고는 적합하였으며 그 중에서도 특히 Kamei와 Halsey의 모델은 아주 적합하였다.
- 5) 건조식품의 가장 안정된 저장성을 보여주는 단분자 흡착량은 버어리종과 황색종에 있어서 각각 4.36%와 4.21%를 보여 주었으며, 각 시료의 비표면적은  $157 m^2/g$ ,  $152 m^2/g$ 이었다.
- 6) 버어리종과 황색종의 단분자층  $-\Delta H_1^0$ 는 각각  $45,972 J/mol$ ,  $45,486 J/mol$ 로서 물의 응축열( $40,595 J/mol$ ) 만을 흡수하는 두 번째 이상의 층에 비해서 담배각초 표면이 흡수하는 열량이 크다는 사실을 알 수 있었다.



## NOMENCLATURE

$A$	: moisture as the adsorbate
$S$	: vacancy on tobacco surface as the adsorbent
$AS$	: adsorbed moisture
$x$	: relative humidity
$y$	: equilibrium moisture content
$a, b, c, d$	: constant of empirical formulas
$K$	: equilibrium constant
$p$	: vapor pressure of water [mmHg]
$p^o$	: saturated vapor pressure of water [mmHg]
$M_e$	: equilibrium amount of adsorbed moisture per unit tobacco weight at $p$ [g/g]
$M_m$	: maximum amount of adsorbed moisture per unit tobacco weight on monomolecular layer [g/g]
$c$	: constant related to the heat of adsorption
$N_A$	: Avogadro number [ $6.02 \times 10^{23}$ units]
$N_m$	: number of molecular, required for covering on monomolecular layer [units]
$T$	: temperature [ $^{\circ}K$ ]
$r$	: correlation coefficient
$R$	: gas constant [ $8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ]
$\Delta G^o$	: change of the Gibbs energy for the standard state [ $\text{Jmol}^{-1}$ ]
$\Delta H^o$	: change of enthalpy for the standard state [ $\text{Jmol}^{-1}$ ]
$\Delta S^o$	: change of entropy for the standard state [ $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ]

$M_o$	: initial moisture content in tobacco
$M$	: moisture content in tobacco after $t$ hrs
$k$	: wetting constant [ $\text{hr}^{-1}$ ]
$t$	: wetting time [hr]
$E^*$	: activation energy [ $\text{Jmol}^{-1}$ ]
$F$	: frequency factor [ $\text{hr}^{-1}$ ]
$s$	: specific surface area [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]

## Greek letters

$\alpha$	: cross-sectional area of a water molecule [ $10.8 \text{ \AA}^2$ ]
$\theta$	: vacancy fraction

## Subscripts

$1, 2, \dots, n$	: number of adsorbed layer
$v$	: vacancy
$liq$	: liquid
$vap$	: vapor

## 참 고 문 헌

1. Chang, C. S. and Johnson, W. H. (1973) The relationship between specific volume and specific surface area of tobacco. *Tob. Sci.* 17:115-119.
2. Chen, P. and Pei, D. C. T. (1989) A mathematical model of drying processes. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 32:297-310.
3. 진학용, 최승찬, 이태호, 유광근 (1981) 잎담배의 흡습 및 탈습에 관한 연구. *담배연구논문집* 3:179-189.
4. Chung, D. S. and Pfost, H. B. (1967) Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. *Trans. ASAE* 10:552-555.

5. Furusawa, M. and Nozawa, K. (1965) Studies on sorption and desorption of moisture for tobacco (I). 日專研報 107:101-107.
6. Furusawa, M. and Nozawa, K. (1966) Studies on sorption and desorption of moisture on tobacco (III). 日專研報 108:129-135.
7. Henderson, S. M. (1970) Equilibrium moisture content of small grain- hysteresis. *Trans. ASAE* 13:762-764.
8. 정한주, 오인혁, 김기환, 민영근, 김병구, 양광규 (1993) 적정수분 관리를 위한 담배 흡습속도에 관한 연구. 담배연구논문집 11:249-256.
9. Kamei, S. and Suzuki, S. (1941) *J. Soc. Chem. Ind. Jap.* 44:351.
10. Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B. and Marinos-Kouris, D. (1990) Mass transfer modeling for virginia tobacco curing. *Drying Technology* 8:351-366.
11. Masuo, Y., Tsuzuki, K. and Katayama, Y. (1964) Physical properties of leaf tobaccos (III) 日專研報 106:27-34.
12. Muramatsu, M., Umemura, S. and Okada, T. (1979) A mathematical model of evaporation-pyrolysis processes inside a naturally smoldering cigarette. *Combution and Flame* 36:245-262.
13. Muranaga, T. and Kurosawa, T. (1965) Equilibrium moisture content and moisture absorption and desorption velocity of tobacco leaves. 日專研報 107:283-287.
14. Nakanishi, Y. and Kobari, M. (1989) Measuring the pore-size distribution of tobacco. *World Tobacco* 111:25-32.
15. Nakanishi, Y. (1991) Development of a theoretical model to predict the efficiency of flavor adsorption for tobacco cut-filler. *Tob. Sci.* 35:11-19.
16. Salwin, H. (1963) *Food Technology* 17:34.
17. Samejima, T., Soh, Y. and Yano, T. (1977) Specific surface area and specific pore volume distribution of tobacco. *Agric. Biol. Chem.* 41:983-988.
18. Samejima, T., Soh, Y. and Yano, T. (1978) Moisture sorption isotherms of various tobaccos. *Agric. Biol. Chem.* 42:2285-2290.
19. Walton, L. R. and Henson, W. H. (1970) Moisture sorption of burley tobacco. *Trans. ASAE* 13:466-468.
20. Walton, L. R., Henry L. A. and Henson, W. H. (1976) Moisture diffusion in the cured burley tobacco leaf. *Trans. ASAE* 19:796-800.
21. Young, J. H. and Bunn, J. M. (1965) *Humidity and Moisture* 2:231.