

Weed & Turfgrass Science was renamed from both formerly Korean Journal of Weed Science from Volume 32 (3), 2012, and formerly Korean Journal of Turfgrass Science from Volume 25 (1), 2011 and Asian Journal of Turfgrass Science from Volume 26 (2), 2012 which were launched by The Korean Society of Weed Science and The Turfgrass Society of Korea founded in 1981 and 1987, respectively.

피속 잡초 종자의 등온흡습곡선 특성

이용호¹ · 변지영² · 나채선² · 김태완^{2,3} · 김정규¹ · 홍선희^{1*}

¹고려대학교 야생자원식물종자은행, 136-701 서울 성북구 안암동 5가

²한경대학교 농업생명과학대학, 456-749 경기도 안성시 중앙로 327

³한경대학교 식물생태화학연구소, 456-749 경기도 안성시 중앙로 327

Moisture Sorption Isotherms of Four *Echinochloa* Species Seeds

Yong Ho Lee¹, Ji Young Byun², Chae Sun Na³, Tae Wan Kim^{2,3}, Jeong-Gyu Kim¹, and Sun Hee Hong^{1*}

¹Seedbank of Wild resource plant, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²Department of Plant Life and Environmental Science/Institute of Ecological Plant Science, Hankyong National University, Anseong, Gyeonggi-do 456-749, Korea

³Institute of Ecological Phytochemistry, Hankyong National University, Anseong, Gyeonggi-do 456-749, Korea

ABSTRACT. The equilibrium moisture contents (EMC) in seeds of four *Echinochloa* (*E. crus-galli* var. *crus-galli*, *E. crus-galli* var. *echinata*, *E. crus-galli* var. *pratensis*, *E. esculenta*) were measured at 20°C with equilibration over a series of lithium chloride solutions with relative humidities ranging from 0.11 to 0.8 to determine sorption isotherms and safe storage relative humidity. Standard seed sorption isotherm models *i.e.* modified Henderson, modified Chung-Pfost, modified Halsey, modified Oswin and Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) equations were adopted to evaluate the goodness of fit to sorption isotherms. This study indicated that EMC of seeds was significantly different in four *Echinochloa* species at various relative humidity. The modified Oswin equations for *E. crus-galli* var. *crou-galli*, *E. crus-galli* var. *echinata*, *E. esculenta* and GAB equation for *E. crus-galli* var. *pratensis* were adequate models for the EMC data. Seeds of four *Echinochloa* species have monolayer moisture contents when stored at RH < 0.1. These results show that seed moisture isotherm model should be selected according to genetic variation.

Key words: *Echinochloa*, Equilibrium moisture content, Model, Seed, Sorption isotherm

Received on May 4, 2015; Revised on May 28, 2015; Accepted on June 8, 2015

*Corresponding author: Phone) +82-2-3290-3462, Fax) +82-2-3290-3502; E-mail) cootation@korea.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Weed Science and The Turfgrass Society of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

야생식물의 종자보존은 아직 가치가 발견되지 않은 식물들의 유전자 다양성을 보존하는 가장 효율적인 현지 외 보존법이다(Hamilton, 1994; Schoen and Brown, 2001). 하지만 종자의 장기 보존 중에는 중요한 생리화학적 변화가 발생하고 그 결과 영양학적 변화뿐만 아니라 발아율과 활력의 감소가 발생하게 되며 이는 보존 자원의 손실로 이어진다. 저장 조건 중 종자수분함량과 저장온도는 퇴화 속도에 매우 큰 영향을 미치며 일반적으로 진정종자(Orthodox seed)는 낮은 온도, 낮은 수분함량에서 퇴화를 억제할 수 있다

(Ellis et al., 1990).

그러므로 종자의 건조, 저장 조건에서의 정확한 수분함량의 조사는 저장종자의 품질관리에서 매우 중요하다. 하지만 기존의 건조를 이용한 종자 수분함량 측정법은 많은 양의 종자의 손실이 불가피하다. 하지만 야생식물 종자는 분석에 필요한 충분한 양을 수집하기에 어려움이 있기 때문에 기존의 소모적 종자수분함량 측정 방법은 적용이 쉽지 않다. 상대습도 별 평형종자수분함량의 관계에 대한 모델인 등온흡습곡선을 이용하면 종자를 소모하지 않고 평형상대습도를 측정하여 종자의 수분함량을 추정할 수 있다(Probert, 2003).

단분자층 수분함량은 건조 시료의 지질 산화, 효소 활성 등에 대한 물리적 화학적 안정성에 중요한 의미를 지니며, 최적 건조, 저장조건의 단서를 제공한다(Rockland and Stewart, 2013; Vertucci and Roos, 1993). 단분자층 수분함량은 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 모델을 이용해서 등온 흡습곡선을 작성함으로써 추정할 수 있다(Brunauer et al., 1938).

피속(*Echinochloa* P. Beauv.)은 식물분류학적으로 외떡잎 식물(Monocots), 닭의장풀군(Comelinids) 벼목(Poales) 벼과(Poaceae), 기장아과(Panicoideae), 기장족(Paniceae)에 속하는 속(Genus)이다(Kim et al., 2008). 전세계에 매우 널리 분포하며 특히 열대 및 아열대에 35종이 분포하는 것으로 알려져 있다. 현재 우리나라에는 돌피(*E. crus-galli* P. Beauv. var. *crus-galli*), 물피[*E. crus-galli* var. *echinata* (Wild.) Honda], 좁돌피(*E. crus-galli* var. *praticola* Ohwi), 강피(*E. oryzicola* (Vasinger) Vasinger), 나도논피[*E. oryzoides* (Ard.) Fritsch], 열대피[*E. colona* (L.) Link], 대만피(*E. glabrescens* Munro ex Hook. f.), 피[*E. esculenta* (A. Braun) H.Scholz]의 8분류군이 분포한다고 보고되어 있다(Kang, 2008; Lee et al., 2013). 특히 돌피, 물피, 강피는 우리나라 밭과 논에서 벼와 생리생태적으로 유사하여 방제가 어려운 문제 잡초이다(Acenas et al., 2013). 하지만 최근 들어 피의 스트레스 환경에 대한 높은 저항성을 이용한 오염지 녹화와 복원으로의 활용이 대두되고 있으며, 피 전분의 영양학적, 기능성에 대한 연구가 수행되면서 새로운 식용 자원으로서 가치가 부각되고 있다(Lee et al., 2012a; Lee et al., 2012b; Park et al., 2008). 본 연구에서는 피속 4종, 돌피, 물피, 좁돌피, 피 종자의 등온흡습곡선의 최적 모델을 선별하기 위하여 미국 농공학회의 등온흡습곡선 표준 모델(ASABE, 2007)인 modified Henderon, modified Chung-Pfost, modified Halsey, modified Oswin, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) 모델을 비교하고, 각 종 종자에 대한 단분자층 수분함량을 추정하였다. 이를 통하여 피속 근연종 별 등온흡습 특성을 비교하고, 유전자원으로서 피속 종자의 장기저장을 위한 비파괴 수분함량 측정법에 활용 가능한 데이터를 제공하며, 각 종 종자의 최적 건조, 저장조건을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

종자 시료

연구에 사용된 돌피, 물피, 좁돌피, 피(*Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli*, *E. crus-galli* var. *echinata*, *E. crus-galli* var. *praticola*, *E. esculenta*)의 종자는 고려대학교 야생자원 식물종자은행에서 분양 받아 이용하였다. 각 시료는 2010, 2012, 2011, 2008년에 경기도 남양주시에서 수집되었으며,

상온에서 한달 이상 음건 후 밀폐용기에 담겨 -20°C에서 보관되었다.

종자평형 수분함량(Equilibrium Moisture Content; EMC) 측정

4종의 종자시료의 등온흡습곡선을 결정하기 위하여 실험 전 20°C, 0.9 상대습도 조건에서 사전에 수분평형을 맞추었다. 이 후 상대습도 0.9에서 수분 평형이 이루어진 종자 시료는 20°C, 0.11, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9의 상대습도 조건에서 건조시켜 수분평형을 시켰다. 상대습도는 다양한 농도의 LiCl 용액을 밀폐용기에 넣어 조성하였다(Gold and Hay, 2014). 다양한 상대습도에서의 수분평형 여부는 Hygrometer (HP23-AW, Rotronic, UK)를 이용하여 확인하였다(Gold and Manger, 2008). 수분평형이 이루어진 종자의 수분함량은 국립종자원 고시 종자검사요령에 따라 103°C 건조법을 이용하여 측정하였다(103°C, 72 hr).

$$\text{Equilibrium Moisture Content (\%, d, b)} = \frac{\text{Fresh weight} - \text{Dry weight}}{\text{Dry weight}} \times 100$$

등온흡습곡선 표준모델

피속 4종의 등온흡습곡선을 예측하기 위하여 상대습도 별 수분흡수에 가장 광범위하게 사용되고 있는 5가지의 미국 농공학회(ASABE)의 표준 등온흡습곡선모델을 이용하였다(Table 1). Modified Henderson 모델은 김스의 흡착이론에 근거한 생체 시료에 가장 광범위하게 사용되는 준실험모델이다. Modified Chung-Pfost 모델은 수분 흡수에 필요한 자유 에너지 변화 경로에 근거한 실험모델이며, Modified Halsey 모델은 표면으로부터 상대적으로 먼 거리에 다층의 수분층이 응집되어 있음에 근거한 모델이다. Modified Oswin 모델은 시그모이드 곡선 공식에 근거한 실험모델이며, GAB 모델은 다목적 준이론모델로 많은 수의 식품 시료에서 가장 높은 적합성을 나타낸 모델이다(Chen, 1990; Al-Muhtaseb et al., 2002).

단분자층 수분함량(Monolayer moisture content)의 예측

식물 종 별로 단분자층 수분함량을 예측하기 위하여 등온흡습곡선 데이터 중 상대습도 0.45 미만의 데이터를 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 공식에 대하여 비선형 회귀 분석을 수행하였다(Labuza et al., 1985).

$$\text{EMC} = \frac{M_m C(\text{ERH})}{[1 - \text{ERH}][1 - \text{ERH} + C(\text{ERH})]}$$

여기에서 M_m 은 단분자층 수분함량, C 는 모델의 계수이다.

Table 1. Models used to predict moisture sorption isotherms for seeds of four *Echinochloa* species seeds.

Moisture sorption model	Parameters	References
Modified Henderson $EMC^y = \left[\frac{\ln(1-ERH^z)}{-A(T+B)} \right]^{1/C}$	A, B, C: model constants T: Temperature (°C)	Thompson et al. (1968)
Modified Chung-Pfost $EMC = \left(-\frac{1}{C} \right) \ln \left[\frac{\ln(ERH)(T+B)}{-A} \right]$	A, B, C: model constants T: Temperature (°C)	Pfost et al. (1976)
Modified Halsey $EMC = \left[\frac{\exp(A+BT)}{\ln(ERH)} \right]^{1/C}$	A, B, C: model constants T: Temperature (°C)	Iglesias and Chirife (1976)
Modified Oswin $EMC = (A+BT) \left[\frac{ERH}{1-ERH} \right]^{1/C}$	A, B, C: model constants T: Temperature (°C)	Chen and Morey (1988)
GAB $EMC = \frac{AB'C'(ERH)}{[1-B'(ERH)][1-B'](ERH)+B'C'(ERH)}$ $B' = B \exp\left(\frac{h_1}{Rt}\right) \quad C' = C \exp\left(\frac{h_2}{Rt}\right)$	A, B, C: model constants R: Gas constant 8.314 J (mol · K) ⁻¹ t: Temperature (K)	Labuza et al. (1985)

^yEMC: Equilibrium moisture content.
^zERH: Equilibrium relative humidity.

통계분석

조사는 모든 종에 대하여 상대습도 별 3반복으로 진행되었다. 각 상대습도에 대한 식물 종별 수분함량의 분산분석과 LSD test ($\alpha=0.05$)는 SAS 9.2 (SAS institute, Inc.)의 Proc ANOVA를 이용하여 수행하였다. 또한 등온흡습곡선 모델에 대한 비선형 회귀분석은 SigmaPlot 10.0 (Systat software, Inc., USA)을 활용하였다.

종별 최적 모델의 선별하기 위하여 다음의 지표를 활용하였다. 모델의 정확도는 모델의 잔차분석을 통하여 모델의 정확성을 비교하였다. 잔차 그래프가 특정한 패턴을 보일 경우 모델이 데이터의 양상을 반영하지 못하는 것으로 간주하였다. 잔차 그래프가 무작위 패턴을 보일 때 정확한 모델로 평가하였다. 모델의 적합성은 모델과 실제 데이터 간 오차의 양적 비교를 위하여 평균상대오차(Mean Relative Error, MRE %)와 수분의 표준오차(Standard Error of Moisture, SEM)를 활용하였다.

평균상대오차(MRE, %)는 아래의 식을 통해서 계산하였으며,

$$MRE = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{Mi - \hat{Mi}}{Mi} \right|$$

수분의 표준오차(SEM)는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$SEM = \sqrt{\frac{\sum (Mi - \hat{Mi})^2}{DF}}$$

여기에서 Mi는 관측치, \hat{Mi} 는 예측치, N은 데이터 수, DF는 모델의 자유도이다.

결과 및 고찰

피속 종자의 상대습도 별 평형수분함량

피속 4종 종자의 20°C에서의 상대습도 별 평형수분함량(%)에서 종, 상대습도, 종과 상대습도의 상호작용 모두에서 높은 유의성($P<0.01$)이 발견되었다. 돌피, 물피, 줌돌피, 피 모든 종의 종자에서 상대습도가 0.11부터 0.9까지 증가하면서 평형수분함량이 7.9%에서 16.4%로 증가가 관찰되었다. 상대습도 각각에 대하여 4종을 비교하면 피 종자는 0.11부터 0.40까지의 상대습도 구간에서 다른 종 종자에 비하여 수분함량이 높게 나타났으며 0.50에서 0.70까지 구간에서는 4종의 평형수분함량의 유의성 있는 차이가 발견되지 않았다. 0.70부터 0.90까지의 구간에서는 줌돌피 종자가 다른 3종에 비하여 낮은 수분함량이 나타났다(Table 2). 그림에도 불구하고 상대습도 0.1부터 0.9까지의 평형수분함

Table 2. Averages based of three replications of equilibrium moisture content (% d.b.) obtained by desorption at a range of equilibrium relative humidity at 20°C for seeds of four *Echinochloa*.

Equilibrium relative humidity	Equilibrium moisture content (%)				LSD _{0.05}
	<i>E. crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i>	<i>E. crus-galli</i> var. <i>echinata</i>	<i>E. crus-galli</i> var. <i>praticola</i>	<i>E. esculenta</i>	
0.11	7.943	8.100	8.099	8.829	0.239
0.20	8.773	9.348	8.950	9.473	0.178
0.30	9.958	10.225	10.183	10.581	0.297
0.40	10.638	10.849	10.848	11.202	0.233
0.50	11.318	11.472	11.514	11.824	0.408
0.60	12.143	12.371	12.335	12.525	0.313
0.70	12.723	12.888	12.774	12.999	0.314
0.80	14.567	14.670	14.082	14.658	0.342
0.90	16.412	16.452	15.390	16.317	0.650
LSD _{0.05}	0.392	0.286	0.287	0.317	0.307

Table 3. Estimated parameters and goodness of fitness for five different isotherm models of desorption data for seeds of four *Echinochloa* dried at 20°C.

Species	Model	df	A	B	C	h1	h2	MRE (%)	SEM	R ²	Residual Plot ^z
<i>E. crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i>	Modified Henderson	3	7.078×10 ⁻⁷	41.492	3.943	-	-	2.9163	0.4646	0.97	CP
	Modified Chung-Pfost	3	587.283	-5.647	0.362	-	-	1.7522	0.2743	0.99	UD
	Modified Halsey	3	5.973	0.221	4.479	-	-	3.0474	0.4143	0.98	CP
	Modified Oswin	3	17.331	-0.301	5.875	-	-	1.4475	0.2630	0.99	UD
	GAB	5	8.377	0.347	1.566	1143.98	11746.02	1.9448	0.3331	0.98	CP
<i>E. crus-galli</i> var. <i>echinata</i>	Modified Henderson	3	4.506×10 ⁻⁶	-14.984	4.177	-	-	3.0056	0.4384	0.97	CP
	Modified Chung-Pfost	3	862.125	-3.305	0.376	-	-	1.7079	0.2483	0.99	UD
	Modified Halsey	3	12.847	-0.090	4.712	-	-	2.6695	0.3843	0.98	CP
	Modified Oswin	3	19.613	-0.403	6.196	-	-	1.4388	0.2255	0.99	UD
	GAB	5	8.701	0.334	1.553	1136.94	11848.41	1.9623	0.3143	0.98	CP
<i>E. crus-galli</i> var. <i>praticola</i>	Modified Henderson	3	2.367×10 ⁻⁷	6.137	4.662	-	-	2.8738	0.4410	0.98	CP
	Modified Chung-Pfost	3	705.251	-10.946	0.419	-	-	2.5985	0.3377	0.98	CP
	Modified Halsey	3	2.428	0.487	5.202	-	-	3.8705	0.5135	0.95	CP
	Modified Oswin	3	16.983	-0.281	6.807	-	-	2.1497	0.2825	0.98	CP
	GAB	5	9.223	0.073	1.487	4732.74	10833.09	1.5695	0.2431	0.99	UD
<i>E. esculenta</i>	Modified Henderson	3	2.367×10 ⁻⁷	6.137	4.662	-	-	2.7412	0.4410	0.97	CP
	Modified Chung-Pfost	3	1676.181	0.000	0.409	-	-	1.5940	0.2341	0.99	UD
	Modified Halsey	3	11.141	0.060	5.188	-	-	2.3976	0.3340	0.98	CP
	Modified Oswin	3	16.022	-0.210	6.861	-	-	1.4017	0.2278	0.99	UD
	GAB	5	8.943	0.151	0.031	3088.09	23564.41	1.8954	0.3075	0.98	CP

^zUD: Uniform distribution; CP: Clear pattern.

량의 변화가 박과 멜론의 2~15%, 참깨과의 1.5~7%, 콩과 완두의 5~30%, 벼과 벼의 7~25%에 비교해 보았을 때 피속 종자의 평형수분함량은 속내 종간 매우 비슷한 경향과 수준을 보였다(Aviara and Ajibola, 2002; Sun, 1999; Walters and Hill, 1998). 일반적으로 같은 상대습도 별 평형상대습도의 차이는 종자의 화학적 조성 특히 지방함량이 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데(Ellis et al., 1989) 이는 피속 종자들의 화학적 조성차이가 타종과의 차이에 비하여 흡사함을 보여준다.

피속 종자의 최적 등온흡습곡선 모델

피속 4종 종자의 5가지 등온흡습곡선 표준모델들(modified Henderson, modified Chung-Pfost, modified Halsey, modified Oswin, GAB)의 계수들과 MRE, SEM, 잔차분석 결과는 Table 3과 같다. 그 결과 modified Henderson 모델은 물피와 피에서 modified Halsey 모델은 물피와 줌돌피에서 MRE와 SEM가 가장 높게 나타났다. 그리고 돌피, 물피, 피는 modified Oswin 모델에서, 줌돌피는 GAB 모델에서 MRE와 SEM가 가장 낮게 나타났다. 5가지 모델에 대한 잔차분석 결과 Modified Henderson 모델은 모든 종에서 평형수분함량 10% 이하 구간과 14%이상 구간은 과소 예측되고 10~14% 구간은 과대 예측되는 것으로 나타났다. 그리고 modified Halsey 모델은 모든 종에서 평형수분함량 10% 이하는 과대예측, 10~15% 구간은 과대예측, 15% 이상구간은 과소 예측되었다. GAB모델은 줌돌피를 제외한 모든 종에서 3차함수형태의 패턴이 나타났다. 그에 비하여 Modified Chung-Pfost와 modified Oswin모델은 비교적 균일한 패턴이 나타났다. 이러한 결과를 종합해 보았을 때 가장 적합한 등온흡습곡선 모델은 돌피, 물피, 피에서 modified Oswin모델, 줌돌피는 GAB모델로 판단된다. MRE와 SEM, 잔차분석을 통하여 선정된 피속 4종 종자에 대한 최적 등온흡습곡선은 Fig. 1와 같았다. 실제 수분함량 데이터와 등온흡습곡선들은 전형적인 종자의 등온흡습곡선인 S형태를 보였다.

타 종 종자들의 최적 등온흡습곡선 모델로서 완두는 modified Henderson 모델이 벼 종자는 Strohmman-Yoerger equation, 옥수수종자는 Oswin 모델, 렌틸콩(lentil)은 modified Oswin과 GAB 모델이 선발된 보고가 있다(Chen, 2003; Menkov, 2000; Soleimani and Shahedi, 2006; Sun, 1999). 본 실험의 피속 4종에서 2가지의 최적 모델이 선발된 결과와 종합해 보았을 때 종들의 유전적 근연성은 등온흡습곡선의 선발에 주요한 요인으로 나타나지 않았다. 그러므로 종별로 종자 수분함량의 정확한 비파괴 측정을 위한 등온흡습곡선 구축을 위해서는 식물 종별로 최적 등온흡습곡선 모델을 선발해야 할 것으로 사료된다.

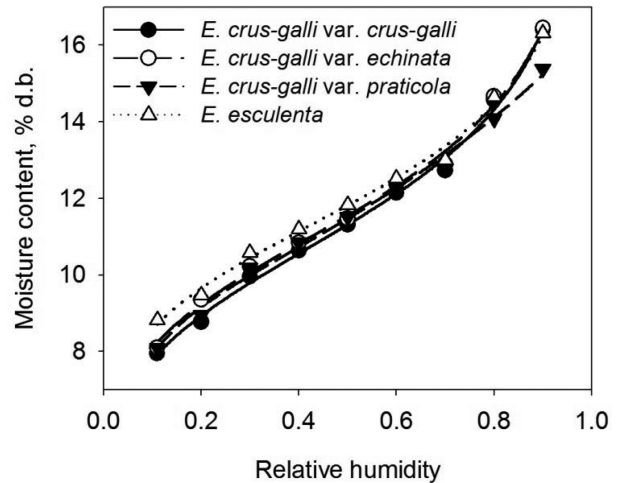


Fig. 1. Desorption moisture isotherm at 20°C from modified Oswin model for *E. crus-galli* var. *crus-galli*, *E. crus-galli* var. *echinata*, *E. esculenta* and from GAB model for *E. crus-galli* var. *praticola*.

Table 4. Monolayer moisture contents (MMC, %, d.b.) and standard errors (SE) at 20°C for seeds of four *Echinochloa*.

Species	MMC (%)	SE
<i>E. crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i>	6.783	0.189
<i>E. crus-galli</i> var. <i>echinata</i>	6.996	0.271
<i>E. crus-galli</i> var. <i>praticola</i>	6.923	0.186
<i>E. esculenta</i>	7.267	0.239
Average	6.992	0.102

피속 종자의 단분자층 수분함량

피속 4종 종자의 상대습도 0.40 이하의 평형수분함량 데이터를 BET model에 비선형회귀분석을 수행하여 단분자층 수분함량을 분석한 결과 돌피, 물피, 줌돌피, 피 종자는 각각 6.78, 6.70, 6.92, 7.27%로 돌피 종자가 가장 낮았고, 피 종자가 가장 높았다. 4종 종자의 평균 단분자층 수분함량은 약 7%였다(Table 4). 이러한 수분함량은 본 실험에서 수행한 최저상대습도인 0.11에서 측정된 수분함량인 7.9~8.8% 보다 낮은 수치였다. 그러므로 피속 4종 종자의 단분자층 수분함량을 활용하여 추정된 최적 건조 조건은 상대습도 0.1 이하 수준으로 사료된다. 그에 비하여 타 식물 종 종자 중 렌틸콩의 단분자층 수분함량은 약 7.5%로 이는 상대습도 0.27수준이고, 고무나무 종자는 16.47%로 상대습도 0.3 수준으로 보고되었다(Fadeyibi et al., 2012; Menkov, 2000). 이는 식물 종별로 최적 건조 조건이 상이함을 보여준다.

하지만 세계 최대 야생종자은행인 Royal Botanical Garden, Kew의 Millennium seed bank partnership은 종자 표준 건조 조건을 상대습도 0.15로 제시하고 있다(Lingington and Manger, 2014). 이는 대부분의 진정종자에서 적절한 수준

의 건조 조건으로 많은 야생식물 종자은행에서 적용되고 있으나 이러한 획일화된 건조 조건은 일부 종에는 과건 또는 최적 건조 조건에 못 미칠 것으로 사료된다. 또한 야생식물 종자은행에서 단분자층 수분함량과 같은 지표의 활용을 위해서는 단분자층 수분함량의 종자 저장 생리학적 영향에 대한 연구와 함께 많은 야생 식물종 종자들의 등온 흡습곡선에 대한 데이터베이스 구축이 이루어져야 할 것이다.

Acknowledgement

This Study was conducted with the kind support of the Korea Forest Service (2014S1100006).

References

- Acnas, X.S., Nunez, J.P.P., Seo, P.D., Venecio U. Ultra, Jr. and Lee, S.C. 2013. Mixing pyrolygneous acids with herbicides to control barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Weed Turf. Sci.* 2:164-169.
- Al-Muhtaseb, A., McMinn, W. and Magee, T. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. *Food Bioproducts Proc.* 80:118-128.
- ASABE. 2007. ASAE D245.6: Moisture relationships of plant based agricultural product. ASABE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Michigan, USA.
- Aviara, N.A. and Ajibola, O.O. 2002. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. *J. Food Eng.* 55:107-113.
- Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60:309-319.
- Chen, C.C. 1990. Modification of Oswin EMC/ERH equation. *Jour. Agri. Res. China* 39:367-376.
- Chen, C.C. and Morey, R.V. 1988. Comparison of four EMC/ERH equations. *American Society of Agricultural Engineers, USA.* p. 22.
- Chen, C. 2003. Moisture sorption isotherms of pea seeds. *J. Food Eng.* 58:45-51.
- Ellis, R., Hong, T. and Roberts, E. 1989. A comparison of the low moisture content limit to the logarithmic relation between seed moisture and longevity in twelve species. *Ann. Bot.* 64:601-611.
- Ellis, R., Hong, T., Roberts, E. and Tao, K.L. 1990. Low moisture content limits to relations between seed longevity and moisture. *Ann. Bot.* 65:493-504.
- Fadeyibi, A., Osunde, Z.D., Usaini, M.S., Idah, P.A. and Balami, A.A. 2012. Evaluating monolayer moisture content of rubber seed using BET and GAB sorption equations. *Int. J. Farming Allied Sci.* 1:72-76.
- Gold, K. and Hay, F. 2014. Equilibrating seeds to specific moisture levels. *Technical Information Sheet_09*, Royal Botanic Gardens Kew, UK.
- Gold, K. and Manger, K. 2008. Measuring seed moisture status using a hygrometer. *Technical Information Sheet_04*, Royal Botanic Gardens Kew, UK.
- Hamilton, M.B. 1994. Ex situ conservation of wild plant species: time to reassess the genetic assumptions and implications of seed banks. *Conservation Biol.* 8:39-49.
- Iglesias, H. and Chirife, J. 1976. BET monolayer values in dehydrated foods and food components. *Lebensmitt Wissensch Technol.* 9:107-113.
- Kang, B.H. 2008. An illustrated ecology books of Korean medicinal plant resources, Geobook, Seoul, Korea.
- Kim, K.J., Kim, Y.D., Kim, J.H., Park, S.J., Park, J.W., et al. 2008. Phylogenetic classification of Korean vascular flora according to the recent APG classification system. *Kor. J. Plant Taxon.* 38:197-222. (In Korean)
- Labuza, T., Kaanane, A. and Chen, J. 1985. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *J. Food Sci.* 50:385-392.
- Lee, J.R., Kim, C.S. and Lee, I.Y. 2013. Identification of *Echinochloa oryzicola* (Vasinger) Vasinger and *E. oryzoides* (Ard.) Fritsch in Korea. *Kor. J. Plant. Taxon.* 43:56-62. (In Korean)
- Lee, Y.S., Yoon, H.S., Lee, S.Y., Lee, J.K., Park, C.S., et al. 2012a. Nutritional components and biological activities of barnyard millets (*Echinochloa* spp.). *Kor. J. Food Nutr.* 25:644-649. (In Korean)
- Lee, Y.S., Yoon, H.S., Lee, S.Y., Lee, J.K., Park, C.S., et al. 2012b. Characteristics of wheat flour dough and noodles with barnyard millet (*Echinochloa* spp.). *Kor. J. Food Nutr.* 25:706-712. (In Korean)
- Lingington, S. and Manger, K. 2014. Seed bank design: seed drying rooms. *Technical Information Sheet_11*, Royal Botanic Gardens Kew, UK.
- Menkov, N.D. 2000. Moisture sorption isotherms of lentil seeds at several temperatures. *J. Food Eng.* 44:205-211.
- Park, J.Y., Kim, K.W., Kim, J.Y., Lee, B.T., Lee, J.S., et al. 2008. Enhanced phytoremediation by *Echinochloa frumentacea* using PSM and EDTA in an arsenic contaminated soil. *The International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes*, 4th IGCP. pp. 487-488.
- Pfost, H., Maurer, S., Chung, D. and Milliken, G.A. 1976. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. *ASAE Paper. No. 76-3520*, ASAE, Michigan, USA.
- Probert, R.J. 2003. Seed viability under ambient conditions, and the importance of drying. *Seed conservation: turning science into*

- practice, Royal Botanic Gardens Kew, London, UK.
- Rockland, L.B. and Stewart, G.F. 2013. Water activity: influences on food quality: a treatise on the influence of bound and free water on the quality and stability of foods and other natural products, Academic Press, New York, USA.
- Schoen, D.J. and Brown, A.H. 2001. The conservation of wild plant species in seed banks attention to both taxonomic coverage and population biology will improve the role of seed banks as conservation tools. *Biosci.* 51:960-966.
- Soleimani, M. and Shahedi, M. 2006. Investigation of sorption isotherm curves for corn seed (Three way cross 647 and single cross 704). *J. Sci. Tech. Agri. Nat. Res.* 10:217-231.
- Sun, D.W. 1999. Comparison and selection of EMC/ERH isotherm equations for rice. *J. Stored Prod. Res.* 35:249-264.
- Thompson, T.L., Peart, R.M. and Foster, G.H. 1968. Mathematical simulation of corn drying- a new model. *Trans. Am. Soc. Agri. Eng.* 11:582-586.
- Vertucci, C.W. and Roos, E.E. 1993. Theoretical basis of protocols for seed storage II. The influence of temperature on optimal moisture levels. *Seed Sci. Res.* 3:201-213.
- Walters, H. and Hill, L.M. 1998. Water sorption isotherms of seeds from ultradry experiments *Seed Sci. Res.* 8:69-73.