

〈Original article〉

배초향 (*Agastache rugosa*) 종자의 저장 반응과 수명 분석

이미현 · 홍선희¹ · 나채선² · 김정규¹ · 김태완 · 이용호^{1,*}

국립한경대학교 식물생태환경과학과,

¹고려대학교 오정에코리질리언스 연구소, ²인스부르크대학교 식물연구소

Analysis of Seed Storage Data and Longevity for *Agastache rugosa*

Mi Hyun Lee, Sun Hee Hong¹, Chae Sun Na², Jeong Gyu Kim¹,
Tae Wan Kim and Yong Ho Lee^{1,*}

Department of Plant Life and Environmental Science, Hankyong National University, RDA,
Wanju 17549, Republic of Korea

¹O-Jeong-Eco-Resilience Institute, Seoul 02841, Republic of Korea

²Institute of Botany, University of Innsbruck, Innsbruck, A-6020, Austria

Abstract - There is little information about the seed longevity of wild plants, although seed bank storage is an important tool for biodiversity conservation. This study was conducted to predict the seed viability equation of *Agastache rugosa*. The *A. rugosa* seeds were stored at moisture contents ranging from 2.7 to 12.5%, and temperatures between 10 and 50°C. Viability data were fitted to the seed viability equation in a one step and two step approach. The *A. rugosa* seeds showed orthodox seed storage behaviour. The viability constants were $K_E = 6.9297$, $C_W = 4.2551$, $C_H = 0.0329$, and $C_Q = 0.00048$. The P85 of *A. rugosa* seeds was predicted to 152 years under standard seed bank conditions. The P85 predicted by seed viability equation can be used as basic information for optimization of seed storage processes.

Key words : *Agastache rugosa*, seed longevity, seed viability equation, seed storage

서 론

기후변화와 급격한 산업화로 인한 생태계 교란은 많은 식물들의 멸종을 야기하고 있다. 장기저장시설에서의 종자 저장을 통한 서식지외 보존 전략은 멸종되어가는 식물의 복원을 위한 매우 효율적인 전략이다. 하지만 이러한 복원이 성공적으로 수행되기 위해서는 보관된 종자 유전자원이 활력이 유지되고, 유전적 다양성이 보존되어 있어야 한다. 이

를 위해서 종자 보관시설은 건조, 저장, 모니터링, 갱신으로 이루어진 종자 처리체계를 구축하고 있다(Cochrane *et al.* 2007; Crawford and Monks 2009). 이러한 종자 처리체계는 비교적 종자의 활력과 품질이 균일한 재배식물의 종자 특성에 기반하여 구성되었으며, 최근에는 야생식물 종자 관리에도 적용하고 있다. 하지만 야생식물 종자는 재배식물에 비하여 많은 양을 수집하는 것이 어렵고, 낮은 활력과 유전적 순도, 높은 휴면율, 생태연구에 대한 결여 등의 특징을 지니고 있어 기존 종자 처리체계의 적용에 어려움이 있다(Hamilton 1994; Merritt and Dixon 2011).

* Corresponding author: Yong Ho Lee, Tel. 02-3290-3462,
Fax. 02-3290-3502, E-mail. yonghoyongho@hotmail.com

저장 종자는 저장 기간 중 자연적으로 활력을 상실하며, 유전자원의 소실 방지를 위해서는 지속적으로 활력을 모니터링하고, 기준보다 낮아진다면 갱신을 수행하여야 한다 (Lingington and Manger 2014). 하지만 야생식물 종자는 재배식물에 비하여 수집되는 양이 매우 적을 수 있기 때문에 모니터링으로 인한 종자 손실은 치명적이다. 또한 휴면으로 인하여 정확한 활력 측정도 쉽지 않아, 재배식물에 비하여 모니터링 또한 많은 비용과 노력이 소모된다. 종자 수명의 정확한 예측은 이러한 종자의 관리를 효율적으로 만들어 줄 수 있다.

종자는 저온과 건조에 대한 저항성이 강한 진정종자 (Orthodox seed)와 건조에 대한 저항력이 약한 비진정종자 (Recalcitrant seed)로 구분이 가능하다. 이 중 비진정종자는 일반적인 장기저장조건에서 활력을 상실하기 때문에 단명종자로 취급되며, 종자은행과 같은 장기저장시설을 활용한 보전전략에 적합하지 않다. 진정종자의 수명은 저장온도와 수분함량에 영향을 받는다고 알려져 있으며 일반적으로 낮은 저장온도, 낮은 수분함량에서 수명이 길어진다 (Roberts 1973). 이에 따라 국제적으로는 15°C, 상대습도 15%의 조건에서 건조, 밀봉된 상태로 -20°C에서 저장하여 장기저장을 시도하고 있다 (Crawford *et al.* 2007; Probert *et al.* 2009; Godefroid *et al.* 2010). Ellis와 Roberts (1980)는 특정 저장온도 (t , °C)와 수분함량 (% fresh weight)에서의 시간 (p , days)에 따른 종자 활력 (v , probits)의 변화에 대한 연구를 수행하여 종자 활력 공식 (seed viability equation)을 제시하였다. 저장 기간에 따른 활력 감소를 수식화 하면 다음과 같다.

$$v = K_i - p/\sigma \quad (1)$$

여기에서 v 는 probit으로 변환된 활력, K_i 는 종자의 저장 최초 활력, p 는 저장 기간 그리고 σ 는 1 표준편차의 활력이 감소되는 데 걸리는 시간으로 종자 수명의 지표이다. σ 는 저장 온도와 수분함량에 영향을 받으며 그 공식은 다음과 같다.

$$\log_{10}\sigma = K_E - C_W \log_{10}m - C_H t - C_Q t^2 \quad (2)$$

여기에서 K_E , C_W , C_H , C_Q 는 종 특이 계수이며, m 은 수분함량, t 는 저장온도이다. 공식 (1)에 공식 (2)를 대입하면 다음의 종자 활력 공식을 도출할 수 있다.

$$v = K_i - p/10^{K_E - C_W \log_{10}m - C_H t - C_Q t^2} \quad (3)$$

종자 활력 공식을 예측하기 위해서는 다양한 저장온도, 종자 수분함량 조건에서 저장 반응을 시험한다. 식물 종의 종자 활력 공식의 계수를 예측하기 위한 방법으로는 저장 반응 데이터를 공식 (3)에 비선형 회귀분석을 수행하여 도출하는 One-step 접근법과 공식 1을 활용하여 저장조건별 σ 를

도출하고 공식 2에 회귀분석을 수행하는 Two-step 접근법이 있다. 애기장대 (*Arabidopsis thaliana*) 생태형 간의 종자 활력 공식 계수 예측에 대한 두 접근법의 비교에서는 One-step 접근법이 더 낮은 표준오차를 보여 더 나은 예측 결과를 도출한 보고가 있다 (Hay *et al.* 2003).

종자 활력 공식은 건조, 저장조건이 종자 수명에 미치는 영향을 평가하는 효과적인 수단이다. 활력 공식을 활용한 P50의 예측값 또한 Gene bank의 실제 저장 데이터와 비교하였을 때 신뢰성이 있는 것으로 보고되었다 (Walters *et al.* 2005; Hay *et al.* 2012). 지금까지 활력 공식이 발표된 많은 종들은 대부분 작물이며, 온도에 대하여 Universal constants를 활용하였다 (Dickie *et al.* 1990). 하지만 한반도 식물 종자 수명에 대한 연구는 지금까지 거의 이루어지지 않았으며, 특히 한반도 야생식물의 저장 반응, 저장조건에 대한 연구는 보고된 바 없다. 종자 저장기관의 종자 처리과정에서 종자의 수분함량을 측정하는 것은 매우 중요하다. 하지만 전통적인 오븐법을 활용한 종자의 수분함량 측정은 많은 종자의 소모를 야기하며 이는 비교적 적은 양이 수집되는 야생식물 종자의 특성 상 적용하기 쉽지 않다. 종자는 상대습도에 따른 수분함량 변화 양상을 보이며 이는 등온흡습곡선으로 나타난다. 종자의 등온흡습곡선을 확보한다면, 종자의 평형상대습도를 측정함으로써 수분함량을 비파괴로 예측할 수 있으며, 이를 통하여 종자 활력 공식에도 활용할 수 있다 (Probert 2003).

본 연구에서는 경기도 남양주시에서 수집된 꿀풀과의 배초향 (*Agastache rugosa*) 종자의 다양한 저장온도와 수분함량에 따른 저장 반응을 시험하고, 종자 활력 공식을 예측하였다. 또한 평형상대습도에 따른 수분함량을 측정하여 종자 등온흡습곡선 또한 예측하였다. 이를 활용하여 야생식물 종자 저장기관에서 활용 가능한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험 종자

실험에 사용된 배초향 종자는 고려대학교 야생자원식물 종자은행에서 분양받아서 활용하였다. 실험종자는 2013년에 경기도 남양주에서 수확 후 음건하여 실험 전까지 -20°C에 보관하였다.

2. 종자 노화 실험

배초향 종자의 노화 실험은 2015년에 수행하였다. 배초향 종자를 5조건의 온도 10, 20, 30, 40, 50°C, 9조건의 상대

습도 11, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80% 조합으로 저온, 저습 조건을 제외한 총 32조건에 저장한 후 저장 기간에 따른 활력의 변화를 검정하였다. 상대습도는 다양한 농도의 Lithium Chloride (LiCl) 용액을 유리 밀폐용기에 넣어 조절하였다 (Gold and Manger 2008; Gold and Hay 2014). 각각의 상대습도 용기는 HOBO Temp/RH Data Logger (Onset)를 활용하여 온도와 상대습도를 모니터링하였다. 종자는 땅에 담아 각각의 조건별로 저장하여 기간별로 50립씩 2반복으로 꺼내어 활력 검정을 수행하였다. 발아 시험은 1% Agar 배지에 치상하여 6주 동안 발아율을 조사한 후, 발아를 하지 않은 종자는 4°C에서 6주 동안 저온 습윤처리를 수행하여 휴면을 타파하여 주었다. 휴면타파 후, 다시 4주 후에 발아율을 확인하였다. 유근이 2 mm 이상 돌출된 종자를 발아로 판정하였다. 발아한 종자 + 휴면처리 후 발아한 종자를 활력이 있는 종자로 판단하였으며 발아되지 않은 종자는 Crush test를 수행하여 죽은 종자를 판정하였다.

3. 종자 등온흡습곡선 추정

상대습도별 평형종자 수분함량의 관계에 대한 모델인 등온흡습곡선 (Seed moisture sorption isotherm)을 이용하면 종자를 소모하지 않고 평형상대습도를 측정하여 종자의 수분함량 (F.B.)을 추정할 수 있다. 등온흡습곡선의 예측을 위하여 다양한 온도와 습도별로 저장된 조건별로 종자의 수분함량 측정을 위하여, ISTA의 Oven method를 활용하였다 (105°C, 17 hr) (ISTA 2007). 조사된 상대습도별 수분함량은 D'Arcy-Watt model에 회귀분석을 수행하였다 (공식 4) (Vertucci and Leopold, 1987).

$$WC = \frac{K' \times K \times RVP}{1 + (K \times RVP)} + (c \times RVP) + \frac{k' \times k \times RVP}{1 + (k \times RVP)} \quad (4)$$

여기에서 WC는 수분함량 (D.B.) ($WC = MC (F.B.) / (100 - MC (F.B.))$), K'와 K는 강한 흡착수와 관련된 계수, c는 약한 흡착수와 관련된 계수, k'와 k는 자유수 관련 계수, RVP는 상대 수증기압 (RH/100)이다.

4. 통계 분석

등온흡습곡선의 예측을 수행하기 위하여 32조건에 대한 상대습도별 수분함량 데이터를 D'Arcy-Watt model에 비선형 회귀분석을 수행하였다. 이를 위하여 Sigmaplot 10.0 (Systat software)의 Dynamic fit wizard를 활용하였다.

32조건에 대한 저장 실험 데이터는 One step, Two step 모델에 대하여 각각 선형, 비선형 회귀분석을 수행하였다. 종자 활력 공식의 온도 계수들 (CH, CQ)은 독립적인 예측과 여러

가지 종들에 보편적으로 사용되고 있는 Universal constants (CH=0.0329, CQ=0.00048)를 활용한 예측을 모두 수행하였다. 종자 활력 공식의 계수를 예측하기 위한 2가지 접근법, 2가지 온도계수 종류, 총 4종류의 모델은 F-test의 Residual mean square 값을 활용하여 데이터에 대한 적합도를 평가하였다. 저장 실험 데이터의 선형, 비선형 회귀분석은 SAS 9.4 (SAS Institute Inc)의 PROC REG와 PROC NLIN을 활용하여 수행하였다.

배초향의 예측된 종자 활력 공식을 실제 종자은행에서 활용하기 위하여 활력이 85%, 50%, 35%로 감소하는 데 걸리는 시간을 예측하였다. 종자의 수분함량은 일반적인 종자 건조 지표인 수분함량 5%, 종자은행 표준 건조조건인 15°C RH 15%, 건조 시설이 아닌 일반적인 조건에서의 건조조건인 20°C, RH 50%에서의 평형이 이루어진 종자를 가정하여 등온흡습곡선으로 추정하였다. 최초의 발아율은 99%로 가정하였으며, 4가지 모델 모두 예측을 수행하여 각 모델 간의 차이를 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 배초향 종자의 등온흡습곡선

배초향의 종자 등온흡습곡선을 예측한 결과 상대습도의 증가에 따라 수분함량의 증가가 나타났다 (Fig. 1). 배초향의 지질 함량은 33.8%로 벼와 옥수수과 같은 전분종자에 비하여 높은 지질함량이 나타났으며 상대습도 11~85% 사이에서 2.7~12.5%의 수분함량 변이가 나타났다. 상대습도 11%~65%까지는 비교적 선형의 증가를 그 이상부터는 수분함량의 빠른 증가를 보였다. 하지만 전형적인 종자의 등온

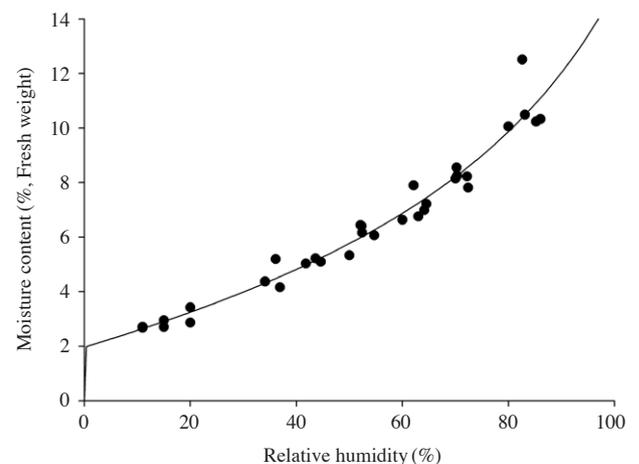


Fig. 1. Seed moisture sorption isotherm of *Agastache rugosa*.

Table 1. Aging experiment conditions (temperature, moisture content), sample number and estimates of initial viability (K_i) and seed longevity (σ) of *Agastache rugosa*

Exp no.	Temperature (°C)	Moisture content (%FW)	No. of samples	K_i (Probit)	σ (days)
1	10	6.41	12	2.173	ND 22
2	10	6.99	10	-0.064	ND 484
3	10	8.22	12	-0.006	ND 95
4	10	10.24	12	0.039	ND 324
5	20	6.07	9	0.130	ND 418
6	20	6.76	8	0.215	141
7	20	7.81	16	0.956	50.204
8	20	10.33	16	1.689	24.081
9	30	5.20	14	1.034	ND 56
10	30	5.22	15	0.181	ND 578
11	30	6.16	10	0.371	183.874
12	30	7.22	10	1.567	32.993
13	30	8.26	13	1.442	26.332
14	30	10.48	9	3.784	6.988
15	40	2.71	16	0.275	ND 393
16	40	2.95	16	0.038	525.919
17	40	3.42	14	0.241	389.007
18	40	4.37	16	0.269	267.426
19	40	5.03	13	0.891	112.404
20	40	6.44	12	0.755	61.803
21	40	7.90	9	1.204	19.853
22	40	8.55	6	0.889	2.021
23	40	12.51	4	1.138	2.020
24	50	2.68	18	0.592	118.949
25	50	2.71	13	0.854	109.744
26	50	2.87	12	1.596	51.515
27	50	4.16	14	1.299	47.248
28	50	5.10	8	2.166	11.549
29	50	5.34	10	1.228	12.714
30	50	6.63	8	0.713	5.828
31	50	8.15	6	1.399	1.845
32	50	10.06	4	1.609	0.508

ND, No decline in viability was detected

흡습곡선 형태인 S형태 중 낮은 상대습도에서 나타나는 수분함량의 빠른 감소(Phase I)는 관찰되지 않았다. 이는 현재 실험된 상대습도 11% 이하에 단분자층 수분함량이 형성됨을 보여준다. 그 이하부터 빠른 수분함량 감소가 시작되는 단분자층 수분함량은 건조된 시료의 지질 산화, 효소 활성 등에 대한 물리적 화학적 안정성의 지표가 되며 최적 건조 저장조건의 단서를 제공해준다 (Vertucci and Roos 1993; Rockland and Stewart 2013). 이러한 결과는 배초향 종자는 랜틸콩이 상대습도 27%에서, 고무나무 종자가 상대습도 30%에서 단분자층 수분함량 비하여 낮은 상대습도 조건에서 단분자층 수분함량이 형성되며, 11%보다 더 낮은 상대습도 조건에서도 과건에 의한 피해가 없을 수 있음을 보여준다. 국제적으로 종자 표준 건조조건은 15°C, 상대습도 15%로 제시되고 있다 (Lingington and Manger 2014). 이는 대부분의 진정종자에서 적절한 수준의 건조조건으로 많은 야생 식물 종자은행에서 적용되고 있으나, 본 결과에 비추어 보았

을 때, 이러한 획일화된 건조조건은 일부 종에는 과건이 발생하거나, 최적 건조에 못 미칠 가능성이 있으므로 나아가 배초향과 같은 야생 식물종 종자들의 등온흡습곡선에 대한 데이터베이스 구축이 필요하다 (Lee *et al.* 2015). 이를 통하여 저장에 최적화된 종자 건조기술을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 배초향 종자의 활력 공식 예측

배초향 종자의 32조건의 독립된 저장 실험에 대하여 활력의 감소 양상에 대하여 분석하였다. 그 결과 10°C의 4조건을 포함한 총 8조건에서는 의미 있는 활력의 감소가 관찰되지 않았다 (Table 1). 이 데이터들은 종자 활력 공식 계수를 예측하는 데 사용되지 않았다. Log 수분함량에 대한 Log 수명(σ)의 영향은 선형 반응을 보였다. 하지만 낮은 상대습도 조건 (RH 11%)의 수명은 예측값보다 비교적 낮게 나타났다 (Fig.

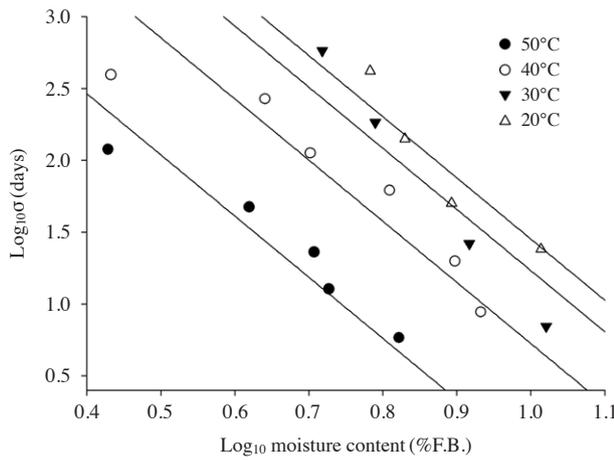


Fig. 2. Relationship between seed moisture content (% F.B.) and seed longevity ($\text{Log}_{10}\sigma$, days) for *Agastache rugosa* seeds. The slope of line represents the moisture parameter (C_w) of seed viability equation.

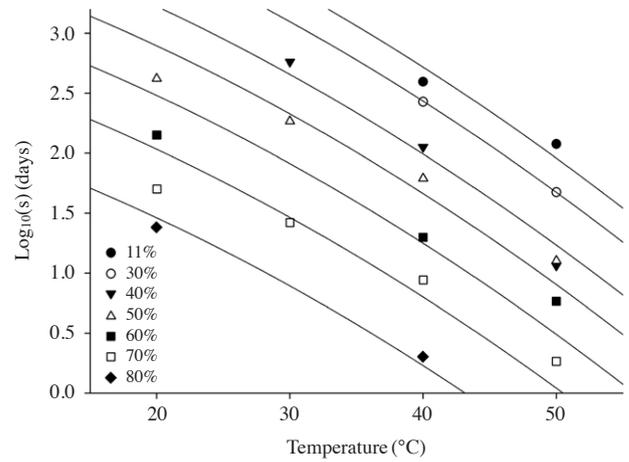


Fig. 3. Relationship between storage temperature ($^{\circ}\text{C}$) and seed longevity ($\text{Log}_{10}\sigma$, days) for *Agastache rugosa* seeds. The line represent a regression model with universal temperature parameter (C_H, C_Q) of the seed viability equation.

2). 이는 배초향 종자의 낮은 상대습도에서의 저장 생리의 변화 가능성을 보여주며 이에 대한 생리적 분석 연구가 필요하다. 하지만 높은 상대습도 조건에서는 뚜렷한 양상이 확인되지 않았다. 온도에 대한 수명의 반응은 2차 선형 반응을 보였으며, 모델의 예측값에 대하여 특별한 경향이 나타나지 않았다(Fig. 3). 이러한 결과는 배초향 종자가 진정 종자임을 보여준다.

배초향 종자의 저장조건별 시간에 따른 활력 감소는 예측된 종자 활력 곡선을 활용하여 예측되었다(Fig. 4). 높은 온도, 높은 수분함량에서는 비교적 모델과 비슷한 경향이 관찰되었으나, 낮은 온도, 낮은 수분함량에서는 데이터의 변이가 크게 나타나는 경향이 관찰되었다. 이는 야생 종자인 배초향 종자가 지닌 휴면, 활력의 불균일성과 같은 요인에 의한 것으로 판단된다. 향후 다양한 수집 종들의 수명 연구, 정밀한 활력 검정 기술의 개발을 통하여 야생식물들의 예측의 정확성을 높일 수 있을 것이다.

배초향 종자의 수명 공식의 계수를 산출하기 위한 4가지 방법에 대한 비교 결과 온도계수를 독립적으로 예측하였을 때는 F-value가 유의성이 없었으며, C_H 계수 또한 음수의 값이 도출되어 활용에 문제가 있었다. 온도계수를 Universal constant를 사용한 예측 방법 중에서는 Two step model이 One step model에 비하여 낮은 Residual mean square가 나타나 온도계수를 Universal constant를 사용한 Two step model을 최종적으로 선발하였다(Table 2).

3. 배초향 종자의 종자은행에서의 저장 기간 예측

배초향 종자의 저장 기간을 예측하기 위하여 종자은행에

서의 표준 조건에서의 건조, 저장이 이루어졌을 때를 포함하여 9가지의 건조, 저장조건에서의 P85, P50, P35를 예측하였다. 또한 예측 방법을 달리했을 때의 영향을 평가하기 위하여 one step과 two step 예측에서 도출된 모형 간의 값들도 비교하였다. 그 결과 두 모형 모두 종자은행에서의 표준 조건에서 가장 긴 저장 기간을 보였다. 종자은행의 표준 건조 조건에서 건조된 배초향 종자의 P85는 Two step 모형에서 종자은행 장기저장조건 (-20°C)이 196년으로 예측되었으며, 종자은행 단기저장고 조건(5°C)에서는 45년, 상온(20°C)에서는 9년으로 예측되었다. 그에 비하여 상온, 일반 상대습도조건에서 건조된 배초향 종자의 P85는 저장 온도별로 13, 3, 1년으로 나타나 10배 이상의 상당한 수명의 차이가 나타났다.

같은 데이터를 활용하여 예측 방법만을 다르게 한 one step model과 two step model의 비교 결과 -20°C 표준 종자은행 조건에서 P85가 one step 모형이 560년 two step 모형이 196년으로 one step 모형이 2.8배 높게 나타났다. 이는 향후 활력 공식을 활용한 수명 예측을 종자은행 운영에 활용할 때 활력 공식의 예측 방식 선정의 중요성을 보여준다.

종자 활력 공식에 대한 연구는 다양한 종, 품종들에 대하여 수행되어 왔다. 현재까지 26과 66종의 수명 데이터들이 보고되었으나 그중 3분의 1은 콩과와 벼과이다(Ellis and Roberts 1980; Pritchard and Dickie 2003). 이는 벼과, 콩과의 작물 종들이 경제적 중요성이 높아 우선적으로 연구가 수행되었으며, 연구재료로서의 품질 좋은 종자의 확보가 용이하기 때문이다. 야생식물 종자의 연구는 비교적 최근에 수행되기 시작하였으나, 야생식물 종자는 연구를 수행할 정도로

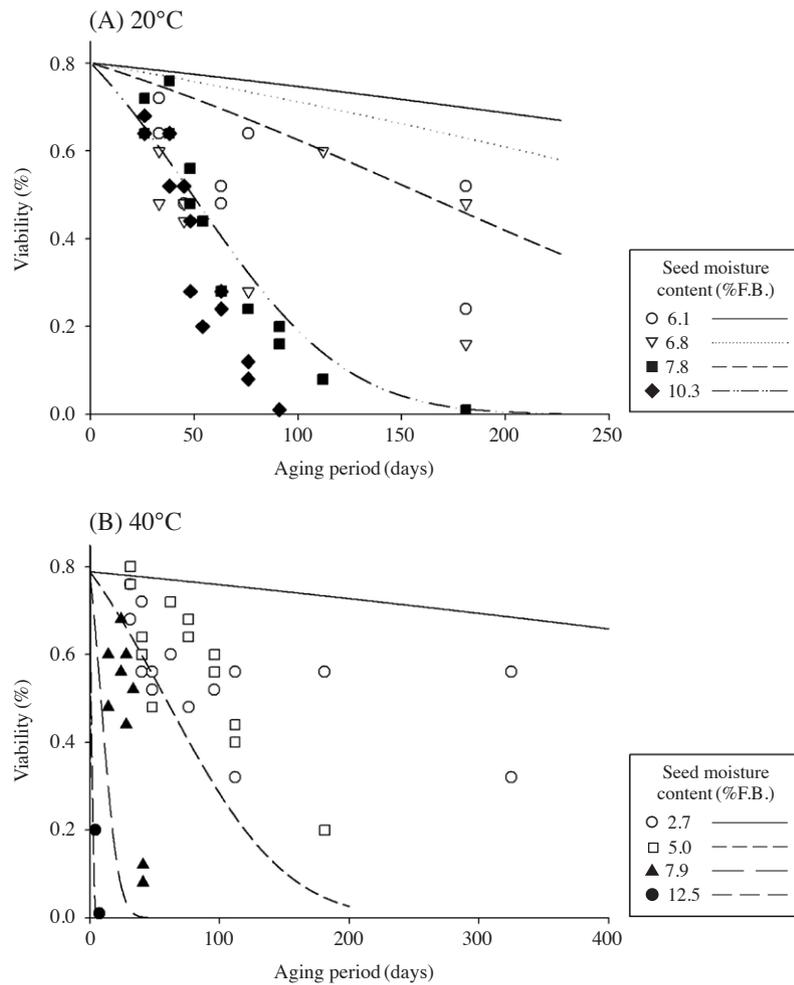


Fig. 4. Survival data and estimated longevity models for *Agastache rugosa* seeds stored at (A) 20°C and (B) 40°C. Seed viability equation derived from the one step model with universal temperature constants.

Table 2. One step and two step estimation of the viability equation parameters for *Agastache rugosa*, using either independent estimates of the temperature constants (C_H and C_Q) or universal constants ($C_H=0.0329$, $C_Q=0.00048$)

Estimation	Temperature constants	K_i	K_E	C_w	C_H	C_Q	Residual mean square (d.f.)	F-value
One step	Independent	0.3508 (0.0597)	5.1952 (0.2523)	4.1043 (0.1580)	-0.0582 (0.0127)	0.0015 (0.0002)	0.2975 (222)	68.37ns
	Universal	0.1520 (0.0584)	7.5979 (0.1364)	4.5958 (0.1586)	0.0329	0.00048	0.3790 (224)	82.48**
Two step	Independent	-	4.7867 (0.6232)	3.9281 (0.3071)	-0.0658 (0.0337)	0.0017 (0.0005)	0.0450 (16)	72.87ns
	Universal	-	7.0806 (0.2938)	4.4470 (0.3572)	0.0329	0.00048	0.0817 (20)	154.98**

ns, not significant

** , significant at $P < 0.01$

품질과 양을 확보하기 어려우며, 휴면 기작들에 대한 이해 부족으로 정확한 활력의 측정이 어렵고, 연구의 기간이 오래 걸리기 때문에 그 결과의 수가 작물에 비하여 매우 부족

하다(Hay and Probert 2013). 하지만 수집이 어렵고, 저장되는 양이 적은 야생식물의 특성 상 일반적인 작물 종자의 장기저장 프로세스와는 다르게 빈번한 모니터링이 불가능하기

Table 3. Estimation of σ (years), P85, P50 and P35 (years) for *Agastache rugosa* seeds, using the seed viability equation with constants derived from one step and two step estimation

Estimation	Seed moisture content	Storage temperature (°C)											
		- 20				5				20			
		σ	P85	P50	P35	σ	P85	P50	P35	σ	P85	P50	P35
One step (universal temperature constants)	5% moisture content	195	251	453	528	44	57	103	120	9	12	22	26
	Equilibrium with 15% RH @ 15°C (Seedbank storage)	434	560	1010	1178	99	127	230	268	21	27	49	57
	Equilibrium with 50% RH @ 20°C (Ambient RH)	22	29	52	61	5	7	12	14	1	1	3	3
Two step (universal temperature constants)	5% moisture content	72	93	168	196	16	21	38	45	3	5	8	9
	Equilibrium with 15% RH @ 15°C (Seedbank standard)	152	196	354	412	35	45	80	94	7	9	17	20
	Equilibrium with 50% RH @ 20°C (Ambient RH)	10	13	23	27	2	3	5	6	0	1	1	1

Seeds were assumed to have an initial viability of 99%

때문에 저장 시점에 최적 저장을 위한 전처리를 추구하여야 하며, 수명 예측을 활용하여 갱신 시기, 모니터링 시기의 최적화가 필요하다(Rao *et al.* 2006; Hay *et al.* 2012). 배초향 종자의 활력 공식 예측 결과 도출된 P85는 이러한 프로세스의 최적화의 기준으로 활용 가능할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서 배초향 종자의 다양한 저장조건에서의 활력 변화를 조사하여 종자 등온흡습곡선, 활력 공식을 예측하였다. 그 결과 배초향의 등온흡습곡선은 전형적인 S 형태로 나타났으나 Phase I이 관찰되지 않아 상대습도 11% 이전에서 단분자층 수분함량이 형성될 것으로 보인다. Log 수분함량에 대한 Log 수명(σ)의 영향은 선형 반응을 보였다. 하지만 낮은 상대습도 조건(RH 11%)의 수명은 예측값보다 비교적 낮게 나타났다. 온도에 대한 수명의 반응은 2차 선형 반응을 보였으며, 모델의 예측값에 대하여 특별한 경향이 나타나지 않았다. Universal constant를 사용하는 Two step model을 활용한 배초향 종자 활력 공식의 예측 결과 높은 온도, 높은 수분함량에서는 비교적 모델과 비슷한 경향이 관찰되었으나, 낮은 온도, 낮은 수분함량에서는 데이터의 변이가 크게 나타나는 경향이 관찰되었다. 이는 야생 종자인 배초향 종자가 지닌 휴면, 활력의 불균일성과 같은 요인에 의한 것으로 판단된다. 배초향 종자의 활력 공식을 활용한 P85예측 결과 종자은행에서의 표준 조건에서 가장 긴 저장 기간을 보였다. 종자은행의 표준 건조조건에서 건조된 배초향 종자의 P85는 종자은행 장기저장조건(-20°C)이 196년으로 예측되었다. 하지만 one step 모형에서는 P85가 560년으로 예측되어 활

력 공식의 예측 방식 선정의 중요성을 보여줬다. 배초향 종자와 같은 야생식물은 대량의 연구재료를 확보하기 쉽지 않기 때문에 일반적인 작물 종자 장기저장 프로세스와는 다르게 수명 예측을 활용하여 갱신 시기, 모니터링 시기의 최적화가 필요하다. 본 결과로 도출된 배초향 종자의 P85는 이러한 프로세스의 최적화의 기준으로 활용 가능할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 산림청(과제번호: 2014S1100006)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

Cochrane JA, AD Crawford and LT Monks. 2007. The significance of ex situ seed conservation to reintroduction of threatened plants. *Aust. J. Bot.* 55:356-361.

Crawford AD and L Monks. 2009. The road to recovery: the contribution of seed conservation and reintroduction to species recovery in Western Australia. *Aust. Plant. Conserv.* 17:15-17.

Crawford AD, KJ Steadman, JA Plummer, A Cochrane and RJ Probert. 2007. Analysis of seed-bank data confirms suitability of international seed-storage standards for the Australian flora. *Aust. J. Bot.* 55:18-29.

Dickie JB, RH Ellis, HL Kraak, K Ryder and PB Tompsett. 1990. Temperature and seed storage longevity. *Ann. Bot.*

- 65:197-204.
- Ellis RH and EH Roberts. 1980. Improved equations for the prediction of seed longevity. *Ann. Bot.* 45:13-30.
- Godefroid S, A Van de Vyver and T Vanderborght. 2010. Germination capacity and viability of threatened species collections in seed banks. *Biodiv. Conserv.* 19:1365-1383.
- Gold K and F Hay. 2014. Equilibrating seeds to specific moisture levels. Technical Information Sheet_09, Royal Botanic Gardens Kew, UK.
- Gold K and K Manger. 2008. Measuring seed moisture status using a hygrometer. Technical Information Sheet_04, Royal Botanic Gardens Kew, UK.
- Hay FR, F de Guzman, D Ellis, H Makahiya, T Borromeo and NRS Hamilton. 2012. Viability of *Oryza sativa* L. seeds stored under Genebank conditions for up to 30 years. *Genetic Resources and Crop Evolution*.
- Hay FR, A Mead, K Manger and FJ Wilson. 2003. One-step analysis of seed storage data and the longevity of *Arabidopsis thaliana* seeds. *J. Exp. Bot.* 54:993-1011.
- Hay FR, P Thavong, P Taridno and S Timple. 2012. Evaluation of zeolite seed 'Drying Beads' for drying rice seeds to low moisture content prior to long-term storage. *Seed Sci. Technol.* 40:374-395.
- Hay FR and RJ Probert. 2013. Advances in seed conservation of wild plant species: a review of recent research. *Conservation Physiol* 1.
- Hamilton MB. 1994. Ex situ conservation of wild plant species: time to reassess the genetic assumptions and implications of seed banks. *Conserv. Biol.* 8:39-49.
- ISTA. 2007. Determination of moisture content. in International rules for seed testing The International Seed Testing Association: Bassersdorf, Switzerland.
- Lee YH, JY Byun, CS Na, TW Kim, JG Kim and SH Hong. 2015. Moisture Sorption Isotherms of Four *Echinochloa* Species Seeds. *Weed Turfgrass Sci.* 4:111-117.
- Lingington SK Manger. 2014. Seed bank design: seed drying rooms. Technical Information Sheet_11, Royal Botanic Gardens Kew, London, UK.
- Merritt DJ and KW Dixon. 2003. Seed storage characteristics and dormancy of Australian indigenous plant species: from the seed store to the field. in *Seed conservation: turning science into practice*. Royal Botanic Gardens, Kew. London. UK.
- Pritchard HW and JB Dickie. 2003 Predicting seed longevity: the use and abuse of seed viability equations. in *Seed Conservation: turning science into practice*. Royal Botanic Gardens Kew, London, UK.
- Probert RJ. 2003. Seed viability under ambient conditions, and the importance of drying. in *Seed conservation: turning science into practice*, Royal Botanic Gardens Kew, London, UK.
- Probert RJ, MI Daws and FR Hay. 2009. Ecological correlates of ex situ seed longevity: a comparative study on 195 species. *Ann. Bot.* 104:57-69.
- Rao NK, J Hanson, ME Dulloo, K Ghosh, D Nowell and M Larinde. 2006. *Manual of Seed Handling in Genebanks*. Bioversity International, Rome.
- Roberts EH. 1973. Predicting the storage life of seeds. *Seed Sci. Technol.* 1:499-514.
- Rockland LB and GF Stewart. 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.
- Vertucci CW and EE Roos. 1993. Theoretical basis of protocols for seed storage II. The influence of temperature on optimal moisture levels. *Seed Sci. Res.* 3:201-213.
- Vertucci Christina W and A Carl Leopold. 1987. Water binding in legume seeds. *Plant Physiol.* 85:224-231.
- Walters C, LM Wheeler and JM Grotenhuis. 2005. Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics. *Seed Sci. Res.* 15:1-20.

Received: 5 June 2017

Revised: 16 June 2017

Revision accepted: 16 June 2017