



말갈피, 게바다말과 새우말 종자의 공기 노출에 따른 발아율

박정임*, 배종일, 황성일

(주)수중생태기술연구소

Effect of Air Exposure on the Germination Rate of Surfgrasses, *Phyllospadix japonicus* and *P. iwatensis* Seeds

Jung-Im Park*, Jong Il Bai and Sung Il Hwang

Underwater Ecology Institute, Yeosu 59769, Korea

*Corresponding author: jipark20@hanmail.net Tel: +82-10-8280-7872

Received 22 November 2023 | Revised 15 December 2023 | Accepted 18 December 2023

초록

말갈피, 게바다말과 새우말은 파동에너지가 높은 해역의 조하대 암반에 생육하는 해양현화식물로서 해양보호생물로 지정되어 있다. 말갈피는 종자 생산량이 많으므로, 종자를 활용한다면 효율적인 말갈피 서식지 복원방법이 될 것이다. 그러나, 서식지 복원을 위해 말갈피 종자를 수확하고 다루는 과정 중에는 필연적으로 말갈피 종자가 공기 중에 노출되게 된다. 침수식물인 갈피 성체가 공기에 노출되면 건조 스트레스를 겪게 되는 것처럼 갈피 종자도 건조 스트레스를 받게 될 것이다. 이번 연구에서는 게바다말과 새우말 종자의 공기 노출 한계를 알아보기 위해 두 종 말갈피 종자를 공기에 노출시킨 후 종자의 발아율과 수분함량의 변화를 알아보았다. 노출 시간에 따른 두 종 말갈피 종자의 발아율은 노출 6시간까지 유지되었으나, 8시간 후 급격히 감소한데 비해 수분함량은 노출 후 지속적으로 감소하였다. 공기에 노출되지 않은 게바다말과 새우말 종자의 평균 발아율은 각각 $86.7 \pm 3.8\%$ 와 $80.0 \pm 5.0\%$ 로 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 10시간 노출된 종자의 발아율은 새우말이 게바다말보다 유의하게 높았다. 그에 비해 노출시간에 따른 두 종 말갈피 종자의 수분함량은 종간에 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 비교적 종자의 크기가 크고 두꺼운 종피를 보유한 새우말 종자가 종자의 크기가 작고, 얇은 종피를 보유한 게바다말 종자보다 공기 노출로 인한 건조 내성이 좀 더 강한 것을 의미한다. 이 결과는 해양보호생물인 말갈피, 게바다말과 새우말 종자 기반의 서식지 복원에 유용한 정보를 제공할 것이다.

주요어: 게바다말, 공기 노출, 발아율, 새우말, 종자

Abstract

Surfgrasses, *Phyllospadix japonicus* and *P. iwatensis* are marine macrophytes that grow on rocky substrates in areas with high wave energy, designated as marine protected species in Korea. Since the seed production of surfgrasses is abundant, utilizing the seeds could be an effective method for restoring surfgrass habitats. During the process of collecting and handling surfgrass seeds for habitat restoration, surfgrass seeds unavoidably come into contact with air. To assess the



tolerance of surfgrass seeds to air exposure, we examined changes in germination rates and moisture content of these two surfgrass species after exposure to air. The average germination rates of *P. japonicus* and *P. iwatensis* seeds not exposed to air were $86.7 \pm 3.8\%$ and $80.0 \pm 5.0\%$, respectively, with no significant difference observed. However, after 10 hours of air exposure, the germination rate of *P. iwatensis* seeds was significantly higher than that of *P. japonicus*. In contrast, the moisture content of the two surfgrass seeds did not show a significant difference depend on exposure time. This suggests that *P. iwatensis* seeds, which are relatively larger in size and have a thicker seed coat, exhibit greater resistance to drying due to air exposure compared to *P. japonicus* seeds, which are smaller in size and have a thinner seed coat. These results provide valuable information for habitat restoration using the seeds of marine protected species, *P. japonicus* and *P. iwatensis*.

Key Words: air exposure, germination rate, *Phyllospadix iwatensis*, *Phyllospadix japonicus*, seed

1. 서론

새우말류(*Phyllospadix* spp.) 잘피인 게바다말(*Phyllospadix japonicus*)과 새우말(*P. iwatensis*)은 파동에너지가 높은 해역의 조하대 암반에 살아가는 해양현화식물이며, 일반적으로 말잘피(Surfgrass)라고 불리운다(Kuo et al. 1990). 말잘피 서식지는 암반해역에서 다양한 생물들의 먹이, 산란장과 서식처를 제공하며 연안생태계의 생산성과 생물다양성 유지에 기여한다(Stewart and Myers 1980; Ruckelshaus and Hays 1998). 그러나 우리나라에서는 과거 수십년간 연안 개발, 해안도로 건설과 발전소 시설 등의 공사 등으로 인하여 많은 말잘피 서식지가 훼손되었고, 2007년 대한민국 정부는 게바다말과 새우말을 해양보호생물로 지정하여 서식지의 보전과 복원을 위해 노력하고 있다(Park and Lee 2010; Park et al. 2018).

국내외적으로 말잘피 서식지를 복원하기 위해 성체 이식, 종자 파종 또는 종묘 이식을 시도하고 있다(Holbrook et al. 2002; Bull et al. 2004; Park and Lee 2010; Park et al. 2018). 성체 이식을 통한 말잘피 서식지 복원은 공급용 말잘피가 필수적으로 요구되므로 기존 말잘피 서식지 훼손을 피할 수 없다. 최근에는 성체를 공급할 필요가 없고, 기존 군락지의 훼손을 피할 수 있는 종자를 활용하는 방법에 대한 관심이 증폭되고 있다(Park et al. 2014a, 2014b). 말잘피는 종자 생산량이 많으나, 육수화서(spadix)에서 떨어진 종자 대부분은 거친 파도에 휩쓸려 생육지에서 유실되는 경향이 있다(Williams 1995; Park and Lee 2009). 따라서, 말잘피 종자가 유실되기 전 종자를 수집하여 새로운 말잘피 군락을 조성한다면 말잘피 서식지를 효율적으로 복원할 수 있을 것이다. 그러나, 서식지 복원 중 말잘피 종자는 채취, 보관, 선별과 파종 등의 과정이 포함되며, 이때 말잘피 종자는 일정 시간 공기 중에 노출될 수밖에 없다. 침수식물인 잘피는 조직이 공기에 노출되면 건조 스트레스를 받게 되고 노출 한계 시간을 초과하게 되면 사망에 이르는 것처럼(Shafer et al. 2007) 말잘피 종자도 공기에 노출되면 건조 스트레스가 나타나 종자 활력이 소실될 것이다(Park et al. 2017). 종자 활력 소실은 불가역적인 생리현상으로 활력이 소실된 종자는 발아하지 못하므로 서식지 복원을 위해 말잘피 종자의 공기 노출 한계 시간의 파악은 중요하다.

대부분의 잘피는 해수 중에서 개화, 수분, 열매의 형성과 종자 성숙이 진행된다. 우리나라 연안의 새우말속 잘피와 거머리말속 잘피는 초봄부터 개화하고, 초여름에 종자가 성숙되어 유사한 시기에 종자를 생산한다(Park and Lee 2009; Park et al. 2017). 잘피 종자의 크기는 새우말속 잘피가 거머리말속 잘피보다 큰 것으로 보고된다(Kuo et al. 1990). 종자 크기가 크고 무게가 무거울수록 종자의 내성이 강해지는 경향이 나타나 불리한 외부 환경에서 생존에 더 유리할 수 있다(Westoby et al. 2002). 종피는 물리·화학·생물학적 손상으로부터 종자 내부 조직을 보호하는 기능을 가져 두꺼운 종피 또한 불리한 외부환경으로부터 종자 활력 유지에 유리하게 작용한다(Debeaujon et al. 2000). 육상 식물 분야에서는 종자 형태나 종피 두께가 종자 발아에 미치는 영향이 밝혀지고 있는데 비해 해양현화식물 분야에서는 그 자료가 매우 드문 실정이다(Shafer et al. 2007).

이번 연구에서는 게바다말과 새우말 종자의 노출로 인한 건조 내성을 알아보기 위해 두 종 말잘피 종자를 일정 시간 간격으

로 공기에 노출시킨 후 발아율과 수분함량의 변화를 측정하였다. 또한, 두 종 말잘피 종자의 형태 즉, 크기와 무게, 종피의 두께를 측정하여 건조 내성에 미치는 영향을 확인하였다. 이 결과는 해양보호생물인 말잘피, 게바다말과 새우말의 종자 기반 서식지 복원에 유용한 정보를 제공할 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 말잘피 종자 준비

성숙한 말잘피 종자를 준비하기 위해 2018년 7월 경북 포항(36° 00' 11"N, 129° 34' 31"E)과 강원도 강릉(37° 33' 58"N, 129° 07' 20"E)에서 SCUBA를 이용한 잠수 작업으로 게바다말과 새우말의 육수화서(spadix)를 각각 채취하였다. 채취된 육수화서는 해수가 담긴 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하여 지속적으로 해수가 공급되는 수조에 약 4주 보관 후, 육수화서 조각과 이물질을 제거하고 종자를 수집하였다. 게바다말과 새우말 종자의 활력은 1% 테트라졸리움(2, 3, 5-Triphenylterazolium chloride, Sigma, USA) 30 mL에 종피를 제거한 두 종 말잘피 종자를 각각 실온에서 48시간 빛이 없는 곳에 침지하였다. 그 후 종자의 염색유무와 염색정도를 실체 현미경(SZ61, Olympus, Japan)으로 확인한 결과 두 종 모두 배와 자엽이 짙은 붉은 색으로 염색되어 100% 종자 활력을 보유했다(각 종, n=100).

2.2 종자 형태 측정

게바다말과 새우말 종자는 마름모꼴의 몸통에 거친 털이 빼곡한 양팔을 가진 유사한 형태를 띠고 있다(Fig. 1). 종자의 생중량은 부드러운 종이 타올로 물기를 제거한 즉시 측정하였고, 각각 건조기(60°C)에서 48시간 건조 후 건조량을 측정(0.1 mg)하였다(각 종, n=12). 종자의 크기를 측정하기 위해 몸통 하단부의 높이와 폭, 양팔을 포함한 전체 하단부의 높이와 폭을 각각 버니어캘리퍼스로 측정(0.01 mm)하였다(각 종, n=12). 종자의 종피 두께를 측정하기 위해 종자의 중앙에 위치한 정단부(apical tip)와 육수화서에 연결된 합점(groove region)을 관통하여 얇은 양날칼을 이용하여 정중면(median sagittal)으로 절단 후, 종자 몸통의 등 중앙부, 배 중앙부, 정단부와 합점의 두께를 각각 버니어캘리퍼스로 측정(0.01 mm)하였다(각 종, n=12; Fig. 1).

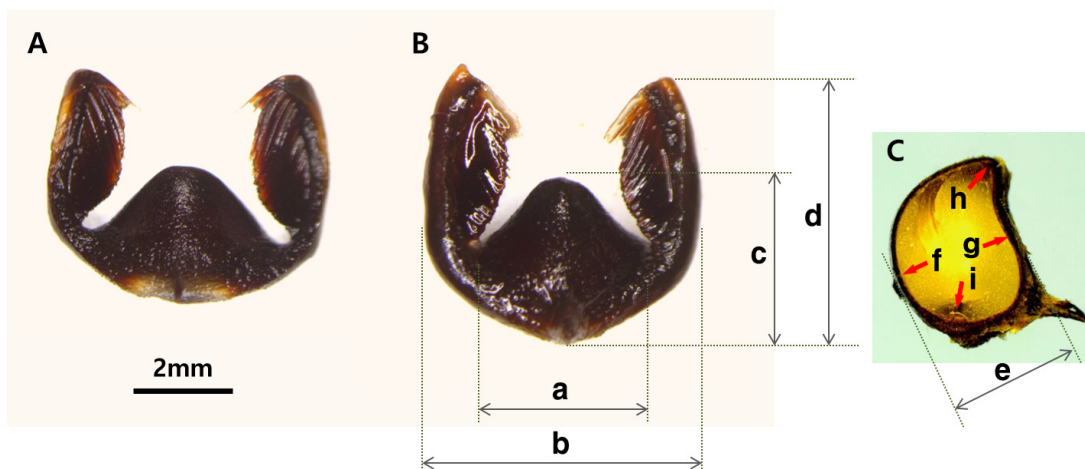


Fig. 1. Measurement of seed size and seed coat thickness in *Phyllospadix japonicus* (A) and *P. iwatensis* (B). Seed size is measured at the bottom of seed body (a), the entire bottom of seed (b), the height of the seed body (c), the height of the entire seed (d), and the width of the seed body (e). Seed coat thickness is measured at the dorsal center (f), the ventral center (g), the top (h) and groove region (i) of the seed body.

2.3 노출 시간에 따른 말잘피 종자 발아율과 수분함량

공기 노출로 인한 게바다말과 새우말 종자의 발아율을 조사하기 위해 두 종 말잘피 종자를 상대습도 50%, 온도 20°C의 항온 항습기에 넣은 후 실험 설계된 시간 단위로 꺼낸 후 발아율(각 종, n=30)과 수분함량(각 종, n=12)을 측정하였다(n=3). 말잘피 종자의 공기 노출 시간은 0~3시간까지 30분 단위, 이후 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20시간으로 설계하였다. 각 시간별 공기에 노출된 말잘피 종자는 즉시 여과 해수(32 psu, GF/C, Watman, Maidstone, England) 50 mL를 주입한 페트리디쉬(직경 9 cm)에 넣은 후 실온(17°C)에서 $50 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (12L:12D) 광조건 하에 발아실험을 실시하였다(Park et al. 2022). 격주마다 각 페트리디쉬에서 발아한 종자의 수를 계수하여 합산하였고, 이때 발아한 종자는 제거하였으며 여과해수를 교환하였다. 게바다말과 새우말 종자는 종자 정단부에서 잎이 종피 외부로 출현한 것을 발아한 것으로 간주하였다(Kuo et al. 1990; Park et al. 2022).

$$\text{발아율(\%)} = \frac{\text{발아한 종자수}}{\text{전체 종자수}} \times 100$$

말잘피 종자의 수분함량은 상대습도 50%, 온도 20°C의 항온 항습기에 실험 설계된 시간 단위로 노출 후 측정된 중량과 각각 건조기(60°C)에서 48시간 건조 후 측정된 건조중량의 차이로 구하였다(각 종, n=12).

$$\text{합수율(\%)} = \frac{\text{노출 후 종자 무게} - \text{건조 후 종자 무게}}{\text{노출 후 종자 무게}} \times 100$$

2.4 통계 처리

모든 측정치는 평균(mean)과 표준오차(Standard Error, SE)로 표기하였으며, 통계 처리는 SPSS version 10.1 (spss Inc., Chocago, IL, USA)을 이용하였다. 모든 자료는 Kolmogorow-Smirnov 및 Levene의 테스트를 사용하여 정규성과 등분산성을 검정하였으며, 이러한 가정이 충족되지 않을 경우 비모수 상관 테스트(Spearman)를 이용하였다. 말잘피 종자의 형태 즉, 공기에 노출되지 않은 두 종 말잘피 종자의 크기와 종피 두께는 t-test로 비교하였다. 각 종 말잘피의 노출시간에 따른 발아율과 수분함량은 one-way ANOVA를 이용하였고, 노출시간에 따른 두 종 말잘피 종자의 발아율과 수분함량은 two-way ANOVA를 이용하여 비교하였다. 분석값이 유의할 경우, Turkey HSD (Honestly Significant Difference)를 이용하여 각 자료의 유의성을 검정하였다. 노출시간에 따른 각 종 말잘피 종자의 발아율과 수분함량의 상관관계는 Pearson's correlations를 이용하여 분석하였다.

3. 결과

3.1 말잘피 종자 형태

말잘피 종자의 생중량은 새우말($18.37 \pm 0.68 \text{ mg seed}^{-1}$)이 게바다말($15.73 \pm 0.43 \text{ mg seed}^{-1}$)보다 유의하게 무거웠고($t = -3.288$, $p < 0.01$), 종자의 건조중량도 새우말($10.86 \pm 0.45 \text{ mg seed}^{-1}$)이 게바다말($9.52 \pm 0.20 \text{ mg seed}^{-1}$)보다 유의하게 무거웠다($t = -2.715$, $p < 0.05$; Table 1).

말잘피 종자 몸통 하단부와 전체 하단부의 길이는 게바다말이 각각 $3.75 \pm 0.09 \text{ mm}$ 와 $5.40 \pm 0.11 \text{ mm}$, 새우말이 각각 $3.86 \pm 0.07 \text{ mm}$ 와 $5.41 \pm 0.07 \text{ mm}$ 로 유의한 차이가 나타나지 않았다(몸통 하단부 $t = -0.900$, $p = 0.378$; 전체 하단부 $t = -0.053$,

$p=0.958$). 말잘피 종자 몸통 높이와 전체 높이는 계바다말이 각각 2.74 ± 0.04 mm와 4.75 ± 0.05 mm, 새우말이 각각 3.47 ± 0.23 mm와 5.76 ± 0.15 mm로 새우말이 계바다말보다 유의하게 컸다(몸통 높이 $t=-3.095$, $p<0.01$; 전체 높이 $t=-6.415$, $p<0.001$). 말잘피 종자 몸통 폭은 계바다말(1.82 ± 0.03 mm)과 새우말(1.83 ± 0.03 mm)이 유의한 차이가 나타나지 않았다($t=-0.145$, $p=0.886$; Table 1).

말잘피 종자 배 중앙부와 등 중앙부의 종피 두께는 계바다말이 각각 0.15 ± 0.01 mm와 0.17 ± 0.01 mm, 새우말이 각각 0.16 ± 0.00 mm와 0.23 ± 0.01 mm로 새우말이 계바다말보다 유의하게 두꺼웠다(배 중앙부 종피 두께 $t=-2.747$, $p<0.05$; 등 중앙부 종피 두께 $t=-3.855$, $p<0.001$). 종자 정단부의 종피 두께는 계바다말(0.13 ± 0.00 mm)과 새우말(0.14 ± 0.00 mm)이 유의한 차이가 나타나지 않았다($t=-1.975$, $p=0.061$). 종자 합점의 종피 두께는 새우말(0.49 ± 0.02 mm)이 계바다말(0.43 ± 0.01 mm)보다 유의하게 두꺼웠다($t=-2.700$, $p<0.05$; Table 1).

Table 1. Morphological characteristics and moisture content of *Phyllospadix japonicus* and *P. iwatensis*

		<i>P. japonicus</i>		<i>P. iwatensis</i>		<i>t</i> -Value
		Mean	\pm SE	Mean	\pm SE	
Seed weight (mg seed ⁻¹)	FW	15.73	0.43	18.37	0.68	-3.288**
	DW	9.52	0.20	10.86	0.45	-2.715*
Moisture content (%)		39.31	0.90	40.97	0.58	-1.546
Seed size (mm)	a	3.75	0.09	3.86	0.07	-0.900*
	b	5.40	0.11	5.41	0.07	-0.053
	c	2.74	0.04	3.47	0.23	-3.095**
	d	4.75	0.05	5.76	0.15	-6.415***
	e	1.82	0.03	1.83	0.03	-0.145
Seed coat thickness (mm)	f	0.15	0.01	0.16	0.00	-2.747*
	g	0.17	0.01	0.23	0.01	-3.855***
	h	0.13	0.00	0.14	0.00	-1.975
	i	0.43	0.01	0.49	0.02	-2.700*

Seed size is measured at the bottom of seed body (a), the entire bottom of seed (b), the height of the seed body (c), the height of the entire seed (d), and the width of the seed body (e). Seed coat thickness is measured at the dorsal center (f), the ventral center (g), the top (h) and groove region (i) of the seed body.

3.2 공기 노출시간에 따른 말잘피 종자 발아율과 수분함량

공기 노출시간에 따른 두 종 말잘피 종자의 발아율은 노출 6시간까지 유지되다가 8시간 후 급격히 감소하였다. 공기 노출시간에 따른 종자 발아율은 계바다말($F=290.823$, $p<0.001$)과 새우말($F=82.782$, $p<0.001$) 모두 유의한 차이가 나타났고, 종간에도 유의한 차이($F=2.079$, $p<0.05$)가 나타났다. 공기에 노출되지 않은 말잘피 종자의 발아율은 계바다말($86.7\pm 3.8\%$)과 새우말($80.0\pm 5.0\%$)이 유의한 차이가 나타나지 않았지만($t=1.045$, $p=0.355$), 10시간 공기에 노출된 종자의 발아율은 새우말($16.7\pm 1.9\%$)이 계바다말($0.0\pm 0.0\%$)보다 유의하게 높았다($t=-8.617$, $p=0.001$; Fig. 2).

두 종 말잘피 종자의 수분함량은 공기 노출 시간이 경과함에 따라 지속적으로 감소하였고, 계바다말($F=48.437$, $p<0.001$)과 새우말($F=76.813$, $p<0.001$) 모두 유의한 차이가 나타났다. 공기에 노출되지 않은 종자의 수분함량은 계바다말($39.31\pm 0.90\%$)과 새우말($40.97\pm 0.58\%$)이 유의한 차이가 나타나지 않았고($t=-1.546$, $p=0.136$), 공기 노출시간에 따라서 종간에도 유의한 차

이가 나타나지 않았다($F=0.08, p=1.000$; Fig. 2).

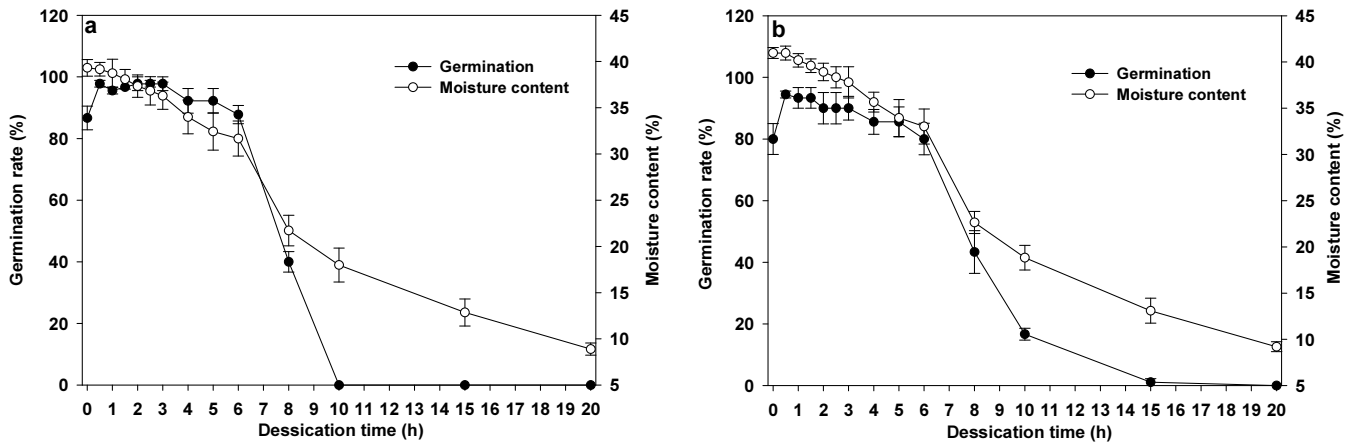


Fig. 2. Changes in germination rate and moisture content of *Phyllospadix japonicus* (a) and *P. iwatensis* (b) exposed at relative humidity of 50% under 20°C.

말잘피 종자의 발아율과 수분함량은 양의 상관관계(게바다말: $r^2=0.93, F=155.85, p<0.001$; 새우말: $r^2=0.96, F=267.88, p<0.001$)을 보였으며, 종자의 수분함량이 높을수록 발아율도 증가(게바다말: $y=-43.88+3.76x$; 새우말: $y=-33.82+3.12x$; y =발아율, x =수분함량)하는 경향을 보였다(Fig. 3).

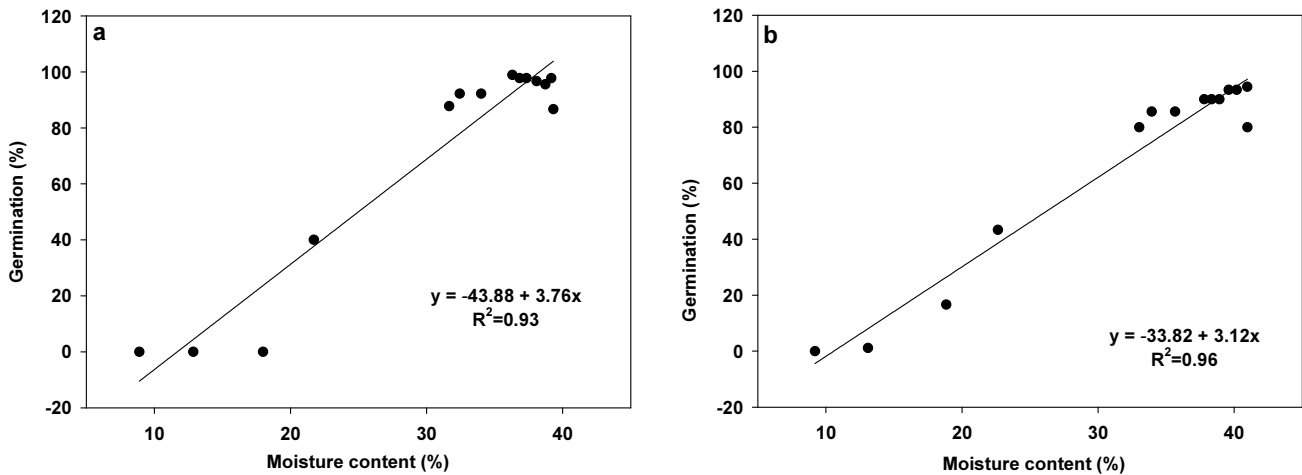


Fig. 3. Linear relationship between moisture content and germination rate of *Phyllospadix japonicus* (a) and *P. iwatensis* (b) exposed at relative humidity of 50% under 20°C.

4. 고찰

4.1 말잘피 종자 형태 및 발아율

게바다말과 새우말 종자는 마름모꼴의 몸통과 양쪽에 뿔뿔한 털이 배곡한 팔을 가진 유사한 형태를 나타낸다. 두 종 말잘피는 종자 몸통 하단부와 전체 하단부 길이, 몸통 폭은 유사하나, 종자 몸통 높이와 팔을 포함한 전체 높이는 게바다말보다 새우

말이 길게 나타나 몸통의 형태는 새우말이 게바다말보다 더 마름모꼴에 유사한 모습을 띠게 되고 종자 크기는 새우말이 게바다말보다 컸다. 말잘피 종자의 생중량과 건중량 또한, 새우말(생중량: $18.37 \pm 0.68 \text{ mg seed}^{-1}$, 건중량: $10.86 \pm 0.45 \text{ mg seed}^{-1}$)이 게바다말(생중량: $15.73 \pm 0.43 \text{ mg seed}^{-1}$, 건중량: $9.52 \pm 0.20 \text{ mg seed}^{-1}$)보다 유의하게 무거웠다. 새우말 종자가 게바다말 종자보다 크고 무거운 것은 모체의 형태와 연관될 수 있다. 게바다말과 새우말은 파력 에너지가 높은 해역의 암반에 착생하여 높은 밀도로 생육하는 공통점이 있으나, 잎 폭은 새우말(2.4~4.0 mm)이 게바다말(2.0~2.5 mm)보다 넓게 나타난다. 거머리말속 잘피에서도 넓은 잎 폭을 가지는 종일수록 크고 무거운 종자가 나타나는 것처럼(Wyllie-Echeverria et al. 2006) 새우말속 잘피에서도 잎 폭이 넓은 새우말이 잎 폭이 좁은 게바다말보다 크고 무거운 종자를 생산하는 것으로 추측된다.

본 실험결과 새우말속 잘피인 게바다말과 새우말 종자의 길이(4.75~5.76 mm)와 폭(1.82~1.83 mm)은 거머리말속 잘피를 대표하는 거머리말 종자의 길이(3.0~3.8 mm)와 폭(1.2~1.6 mm)보다 매우 길고 넓었다(Wyllie-Echeverria et al. 2003; Delefosse et al. 2016). 게바다말과 새우말 종자의 생중량($15.73 \sim 18.37 \text{ mg seed}^{-1}$)과 건중량($9.52 \sim 10.86 \text{ mg seed}^{-1}$) 또한 거머리말 종자의 생중량($2.3 \sim 10.8 \text{ mg seed}^{-1}$)이나 건중량($2.6 \sim 4.1 \text{ mg seed}^{-1}$)보다 월등히 무거웠다(Wyllie-Echeverria et al. 2003; Delefosse et al. 2016; Park et al. 2017). 큰 종자는 작은 종자보다 내부에 더 많은 전분, 단백질 등의 영양물질을 보유할 수 있어 발아 후 유식물의 착생에 유리할 수 있다(Delefosse et al. 2016). 또한, 수생식물은 조직내 높은 수분함량을 보유하므로 종자가 커질수록 공기에 노출시 천천히 건조되어 불리한 외부환경으로부터 내부 조직을 더 오래 보호할 수 있다(Daws et al. 2004; Jørgensen et al. 2019).

종자가 커질수록 두터운 종피를 갖는 경향이 있으며(Kim et al. 1990; Daws et al. 2004; Jørgensen et al. 2019), 종피 두께는 식물 종에 따라 다르게 나타난다(Wyllie-Echeverria et al. 2006; Wada et al. 2011). 종피는 외부환경으로부터 종자 내부를 보호하지만, 두꺼운 종피로 종자 발아가 억제되어 발아속도가 지연된다(Daws et al. 2004; Jørgensen et al. 2019). 발아는 종자가 물을 흡수하면서 시작하는데, 식물에 따라서는 종피를 연화시키거나 벗겨 발아를 촉진시키기도 한다. 말잘피 종자는 종피로 둘러싸인 배와 자엽으로 구성된 마름모꼴 몸통의 정단부에서 자엽이 돌출하면서 발아가 확인된다. 실험 결과 종자 몸통의 볼록한 등 중앙부, 납작한 배 중앙부와 합점 부분의 종피 두께는 새우말이 게바다말보다 유의하게 두터웠다. 따라서, 종피가 얇은 게바다말이 새우말보다 발아가 유리할 수 있으며, 두 종 말잘피의 발아실험에서도 게바다말이 새우말보다 높은 발아율(게바다말: $95.6 \pm 4.4\%$; 새우말: $82.2 \pm 1.1\%$)과 발아속도(게바다말: $1.95 \pm 0.04 \text{ seeds d}^{-1}$; 새우말: $1.46 \pm 0.05 \text{ seeds}^{-1}$)를 보일 수 있었을 것이다(Park et al. 2022). 그러나, 본 실험에서 2018년 7월 포항과 강릉에서 각각 채취한 게바다말과 새우말 종자의 발아율은 각각 $86.7 \pm 3.8\%$ 와 $80.0 \pm 5.0\%$ 로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이것은 동일 종의 잘피라도 잘피 종자의 수확 장소나 채취 시기에 따라 종자 중량, 수분함량과 발아율은 차이가 나타나기 때문으로 판단된다(Pan et al. 2011, 2012; Park et al. 2012, 2014a, 2014b, 2017, 2022).

4.2 공기노출에 따른 말잘피 종자 발아율

게바다말 종자와 새우말 종자는 각각 $39.3 \pm 0.9\%$ 와 $40.9 \pm 0.6\%$ 의 수분함량을 보유하여 30~70% 이상의 수분함량을 띠는 난저장성 종자(recalcitrant seed)에 해당되었다(Chin 1995; Umarani et al. 2015). 난저장성 종자는 건조에 민감하여 수분함량이 감소하면 세포가 손상되고, 대사의 불균형이 발생하여 종자 활력의 상실로 발아능이 감소하게 된다(Hay et al. 2000). 생리적으로 큰 손상을 받지 않고 특정 수준까지 건조될 수 있는 안전한 한계를 임계수분함량(critical water content)이라 하고, 임계수분함량은 식물 종마다 다르게 나타나며 발아율로 확인된다(Chandel et al. 1995; Chin 1995; Daws et al. 2004; Umarani et al. 2015).

높은 수분함량을 지니는 난저장성 종자는 크고 무거운 종자일수록 두꺼운 종피를 보유하는 경향이 있으며 건조에 노출시 더욱 긴 건조시간이 소요되어 건조 내성이 강해진다(Debeaujon et al. 2000; Westoby et al. 2002; Daws et al. 2004). 본 실험 결과 공기에 노출된 계바다말과 새우말 종자의 발아율은 노출 6시간까지 높게 유지되었으나, 6시간을 초과하면서 현저히 낮아졌다. 8시간 공기에 노출된 계바다말 종자는 노출되지 않은 종자에 비해 발아율이 약 53.8% 감소하였고, 10시간 이상 노출된 종자는 전량 발아하지 않았다. 새우말 종자는 8시간, 10시간 공기에 노출되었을 때 노출되지 않은 종자에 비해 발아율이 각각 약 45.8%, 79.2% 감소하여 계바다말 종자보다 공기 노출에 더 강한 내성을 보였다. 이것은 계바다말 종자보다 형태적으로 크고 무거우며, 두터운 종피를 보유한 새우말 종자가 더 천천히 건조되었기 때문으로 추측된다.

두 종 말잘피 종자의 발아율은 노출 후 6시간까지 유지된데 비해, 수분함량은 공기에 노출된 후 지속적으로 감소가 나타났다. 높은 발아율이 유지되는 노출 6시간까지의 수분함량은 계바다말과 새우말 종자가 각각 $31.7 \pm 1.9\%$ 와 $33.0 \pm 1.9\%$ 이상을 유지하였으나, 노출 8시간의 수분함량은 각각 $21.7 \pm 1.6\%$ 와 $22.6 \pm 1.22\%$ 로 나타났다. 10시간 노출된 계바다말과 새우말 종자의 수분함량은 각각 $17.9 \pm 1.8\%$ 와 $18.8 \pm 1.3\%$ 로 낮아졌다. 거머리말 종자는 공기에 노출되면 수분함량의 감소와 함께 지속적으로 발아율의 감소가 나타나기 시작하여 2시간 노출된 거머리말 종자는 노출되지 않은 종자에 비해 35.8% (Park et al. 2017)와 51.1% (Pan et al. 2012)의 발아율 감소를 보였다. 계바다말 종자와 새우말 종자가 6시간의 공기 노출이 가능한데 비해 거머리말 종자는 짧은 시간의 공기 노출로도 발아율의 감소를 보이는 것은 거머리말 종자의 크기와 무게가 두 종 새우말 속 잘피 종자보다 작고, 종피의 두께 또한 얇기 때문으로 추측된다.

이 결과로 계바다말과 새우말 종자의 공기 노출 시간이 6시간 이하에서는 종자 발아율이 유지되나, 노출시간이 6시간을 초과하면 종자 활력의 상실로 발아율이 감소하는 것을 확인하였다. 침수 식물인 잘피 종자의 공기 노출은 종자를 활용한 복원 과정에서 필수적으로 포함되므로 종자 활력을 유지할 수 있는 노출 한계 시간의 규명은 종자 기반 잘피 서식지 복원에 중요한 정보를 제공할 것이다.

사사

본 연구는 2017년 한국해양과학기술진흥원(Korea Institute of Marine Science Promotion)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bull JS, Reed DC and Holbrook SJ. 2004. An experimental evaluation of different methods of restoring *Phyllospadix torreyi* (surfgrass). Restor. Ecol. 12, 70-79.
- Chandel KPS, Chaudhury R, Radhamani J and Maillk SK. 1995. Desiccation and freezing sensitivity in recalcitrant seeds of Tea, Cocoa and Jackfruit. Ann. Bot. 76, 443-450.
- Chin HF. 1995. Storage of recalcitrant seeds. In: Seed quality basic mechanisms and agriculture implications, edited by Basra AS, The Haworth Press Inc, NY, pp. 209-222.
- Daws MI, Gaméné CS, Glidewell SM and Pritchard HW. 2004. Seed mass variation potentially masks a single critical water content in recalcitrant seeds. Seed Sci. Res. 14, 185-195.
- Debeaujon I, Le'on-Kloosterziel KM and Koornneef M. 2000. Influence of the testa on seed dormancy, germination, and longevity in *Arabidopsis*. Plant Physiol. 122, 403-413.
- Delefosse M, Povidisa K, Poncet D, Kristensen E and Olesen B. 2016. Variation in size and chemical composition of seeds from the

- seagrass *Zostera marina*—Ecological implications. *Aquat. Bot.* 131, 7-14.
- Hay F, Probert R, Marro J and Dawson M. 2000. Towards the ex situ conservation of aquatic angiosperms: a review of seed storage behaviour. In: *Seed biology: advances and applications*, edited by Black, M., K.J. Bradford and J. Vázquez-Ramos, CABI Publishing, New York, pp.161-178.
- Holbrook SJ, Reed DC and Bull JS. 2002. Survival experiments with outplanted seedlings of surfgrass (*Phyllospadix torreyi*) to enhance establishment on artificial structures. *ICES J. Mar. Sci.* 59, S350-S355.
- Jørgensen MS, Labouriau R and Olesen B. 2019. Seed size and burial depth influence *Zostera marina* L. (eelgrass) seed survival, seedling emergence and initial seedling biomass development. *PLoS ONE* 14, e02215157.
- Kim DM, Jin J-S and Kim K-H. 1990. Morphological characteristics and proximate compositions of the recommended Soybean varieties in Korea. *Korean J. Food Sci. Technol.* 22, 398-404.
- Kuo J, Lizumi H, Nilsen B and Aioi K. 1990. Fruit anatomy, seed germination and seedling development in the Japanese seagrass *Phyllospadix* (Zosteraceae). *Aqu. Bot.* 37, 229-245.
- Pan J, Jiang X, Li X, Cong Y, Zhang Z, Li Z, Zhou W, Han H, Luo S and Yang G. 2011. Influence of temperature and salinity on germination of eelgrass (*Zostera marina* L.) seeds. *J. Ocean Univ. China* 10, 147-152.
- Pan J, Han H, Jiang X, Zhang W, Zhao N, Song S, Li X and Li X. 2012. Desiccation, moisture content and germination of *Zostera marina* L. Seed. *Restor. Ecol.* 20, 311-314.
- Park J-I and Lee K-S. 2009. Peculiar growth dynamics of the surfgrass *Phyllospadix japonicus* on the southeastern coast of Korea. *Mar. Biol.* 156, 2221-2233.
- Park J-I, Kim J-H and Kim J-R. 2017. Germination rate and moisture content of eelgrass, *Zostera marina* upon desiccation. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 22, 69-76.
- Park J-I, Kim J-H, Kim JH and Shim JH. 2018. A new and effective transplanting technique using wire netting for restoration of the surfgrass, *Phyllospadix japonicus*, in exposed rocky shores. *J. Coast. Res.* 85, 326-330.
- Park J-I, Kim J-H, Song H-J and Kim GY. 2022. Effects of light, salinity and temperature on germination characteristics of surfgrass, *Phyllospadix japonicus* and *P. iwatensis* seeds. *Ocean Sci. J.* 57, 467-474.
- Park J-I and Lee K-S. 2010. Development of transplantation method for the restoration of surfgrass, *Phyllospadix japonicus*, in an exposed rocky shore using an artificial underwater structure. *Ecol. Eng.* 36, 450-456.
- Park J-I, Lee K-S and Son MH. 2012. Germination rate of *Zostera marina* and *Phyllospadix japonicus* related to environmental factors. *Korean J. Environ. Biol.* 30, 280-285.
- Park J-I, Lee K-S and Son MH. 2014a. Germination rate of *Phyllospadix japonicus* seeds relative to storage methods and periods. *Ocean Sci. J.* 49, 1-6.
- Park J-I, Son MH, Kim JB and Lee K-S. 2014b. An effective seeding method for restoring the surfgrass *Phyllospadix japonicus* using an artificial reef. *Ocean Sci. J.* 49, 403-410.
- Ruckelshaus MH and Hays CG. 1998. Conservation and management of species in the sea. In: *Conservation biology for the coming decade*, edited by Fiedler, P.L. and P.M. Karevia, Chapman and Hall, New York, pp. 112-156.
- Shafer DJ, Sherman TD and S Wyllie-Echeverria. 2007. Do desiccation tolerances control the vertical distribution of intertidal seagrasses? *Aquat. Bot.* 87, 161-166.
- Stewart JG and Myers B. 1980. Assemblages of algae and invertebrates in southern California *phyllospadix*-dominated intertidal habitats. *Aqu. Bot.* 9, 73-94.
- Umarani R, Kanthaiya Adhavan E and Mohamed Faisal M. 2015. Understanding poor storage potential of recalcitrant seeds. *Curr. Sci.* 108, 2023-2034.
- Wada S, Kennedy JA and Reed BM. 2011. Seed-coat anatomy and proanthocyanidins contribute to the dormancy of *Rubus* seed. *Sci.*

Hortic. 130, 762-768.

Westoby M, Falster DS, Moles AT, Vesk PA and Wright IJ. 2002. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 33, 125-159.

Williams SL. 1995. Surfgrass (*Phyllospadix torreyi*) reproduction: reproductive phenology, resource allocation, and male parity. *Ecology* 76, 1953-1970.

Wyllie-Echeverria S, Cox PA, Churchill AC, Brotherson JD and Wyllie-Echeverria T. 2003. Seed size variation within *Zostera marina* L. (Zosteraceae). *Bot. J. Linn. Soc.* 142, 281-288.

Wyllie-Echeverria S, Wyllie-Echeverria VR, Churchill AC and Cox PA. 2006. Further Evidence for Seed Size Variation in the Genus *Zostera*: Exploratory Studies with *Z. japonica* and *Z. asiatica*. *Aliso* 22, 243-247.