

잘피(*Zostera marina*)서식지 복원을 위한 최적 이식방법 및 시기 선정에 관한 연구

박정임¹ · 김영균¹ · 박상률¹ · 김종협¹ · 김영상¹ · 김정배^{1,2} · 이필용² · 강창근¹ · 이근섭^{1*}

(¹부산대학교 생물학과 · ²국립수산과학원 남해수산연구소)

Selection of the Optimal Transplanting Method and Time for Restoration of *Zostera marina* Habitats

Jung-Im Park¹, Young-Kyun Kim¹, Sang Rul Park¹, Jong-Hyeob Kim¹,
Young-Sang Kim¹, Jeong-Bae Kim^{1,2}, Pil-Yong Lee², Chang-Keun Kang¹,
and Kun-Seop Lee^{1*}

¹Department of Biology, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

²South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yosu 556-820, Korea

Seagrass bed is an important component in coastal and estuarine ecosystems, providing food and shelter to a wide variety of fauna. Recently, seagrass coverage has declined significantly due to anthropogenic influences such as reclamation, dredging, and eutrophication and consequently, necessity of seagrass habitat restoration is rising. Transplantation experiments with *Zostera marina* using TERFS, staple method, and shell method have been conducted at Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay on the south coast of Korea to select an optimal transplanting method for restoration of *Z. marina* habitat. Three experimental sites located at the vicinity of natural *Z. marina* beds with an average water depth of about 4m. *Z. marina* plants, which were collected from donor bed in Koje Bay were also transplanted at 7 different time from October 2003 to July 2004 to find appropriate transplanting time. Density of *Z. marina* was monitored monthly at both transplanted areas and natural beds. Transplantation using the staple method showed the highest survival rate of transplant. Shell method was also an effective transplanting method at muddy areas in Kosung Bay and Jindong Bay, but not suitable at sandy areas in Dadae Bay. These results suggest that sediment composition of transplanting areas should be considered for the selection of the optimal transplanting method. *Z. marina* transplanted during fall usually showed the highest survival rate, while most *Z. marina* plants transplanted in summer died due to high lethal temperature during this period.

Key Words: seagrass, sediment composition, transplanting method, transplanting time, transplantation, *Zostera marina*.

서 론

잘피는 높은 생산력을 바탕으로 연안 및 하구생태계에서 경제적 가치를 지닌 많은 해양 동물들에게 먹이, 서식처와 산란장 등을 제공해 줌으로써 연안의 수산생산력 향상에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 잘피는 지상부 조직을 통해 해수 내의 영양염을 흡수 제거하고, 지하부 조직은 저질을 안

정화시켜 수질 향상 및 연안 환경 정화에 매우 중요한 역할을 담당한다(Short and McRoy 1984; Ward et al. 1984; Fonseca and Fisher 1986). 그러나 최근 전 세계적으로 잘피의 서식면적이 급격히 감소하고 있으며, 주요 감소 원인은 매립, 준설 등과 같은 인위적인 요인(Short and Willie-Echeverria 1996)과 wasting disease와 같은 질병(Short et al. 1986; Muehlstein 1989), 태풍 및 기후 변화와 같은 자연적인 원인으로 나눌 수 있으나, 최근에는 인위적인 요인에 의한 잘피 서식지의 파괴가 더욱 심각하다(Larkum and West 1983; Short and Willie-Echeverria 1996). 선진국에서는 잘피

*Corresponding author (klee@pusan.ac.kr)

서식지 보호를 법(Clean Water Act; 33 USC 1341-1987; Section 404c)으로 명문화 하여, 잘피 서식지 파괴를 최소화 하기 위해 노력하고 있으며, 파괴 시 동일한 생태적 기능을 지닌 대체 서식지 조성을 법으로 규정하고 있다(Federal Register 1990). 따라서 잘피 서식지 복원을 위한 여러 프로젝트가 수행되었거나 진행 중에 있다(Churchill *et al.* 1978; Bosworth and Short 1993; Fonseca *et al.* 1996).

성공적인 잘피 서식지 복원을 위해서 이식할 적정 장소를 선정하는 것은 매우 중요하다. 이식장소를 선정할 때, 바닥에 도달하는 광량, 부착생물의 정도, 영양염류 농도, 조류 및 파도의 세기, 수심 등을 고려해야 하며(Campbell *et al.* 2000), 과거 잘피의 생육 여부(Calumpong and Fonseca 2001)와 생물교란(bioturbation)의 정도(Fonseca *et al.* 1996; Davis and Short 1997)등도 평가되어야 한다. Short *et al.* (2002)는 이들 환경 요인 들을 정량화하고 이를 지리적인 요인과 결합시켜 이식 장소 선정 모델을 수립하였다. 또한, 성공적인 서식지 복원을 위해서는 이식 장소에 적합한 대상 종을 선정하고(Lee Long and Thom 2001), 이식에 필요한 잘피묘 제공지(donor site)를 구해야하며, 이식될 잘피묘(donor plant)를 채취하는 과정에서 발생하는 훼손을 최소화할 수 있는 방법 등이 고려되어야 한다(Davis and Short 1997). 마지막으로 최적의 이식시기를 선택하고, 각 장소의 퇴적물의 구성을 고려하여 적절한 이식 방법을 선정해야 한다.

잘피를 이식하는 방법으로는 성체를 이식하는 방법과 종자를 이용하는 방법이 있다. Staple method는 성체를 이식하는 방법 중 하나로 지하부의 퇴적물을 제거하여 대나무나 철사 등으로 고정시켜 이식하는 방법이다. 이 방법은 이식 작업을 할 때 дай버들이 수중에서 장시간동안 작업을 해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 잘피를 이식망에 고정시켜 이식하는 방법인 TERFS(Transplanting Eelgrass Remotely with Frame Systems)가 개발되었다(Short, Univ. of New Hampshire). 이 방법은 이식장소의 화학적 오염이나 기타 위험한 요소로 인해 수중 작업이 불가능할 경우 이용될 수 있는 방법으로, 한꺼번에 많은 양을 이식할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이식 후, 이식망을 수거해야 하는 것과 물 밖에서 준비하는 시간이 오래 걸리는 것이 단점이다. Staple method나 TERFS와는 달리 이식 개체를 퇴적물과 함께 이식하는 방법(Seagrass and sediment method)이 있으며, 이 경우 다양한 기구를 이용해서 이식묘를 채취한다(Kelly *et al.* 1971; Phillips 1990; Fonseca *et al.* 1996). 이 방법은 저질이 단단한 지역에 적용될 수 있으며 잘 발달된 지하부를 지닌 잘피 이식에 적합하다. 또한, 지하부 조직의 손상을 최소화할 수 있으며, 퇴적물에 포함된 영양분이 이식초기 이식 개체(transplant)에 공급되는 장점이 있으나, 잘피묘를 채취하는 동안 자연 서식지를 크게 훼손시키며, 많은 비용과 인력

이 소요되는 단점이 있다(Davis and Short 1997).

잘피 종자를 이용하여 서식지를 복원하는 방법도 여러 연구자들에 의해서 시도되어왔다(Addy 1947; Lewis and Phillips 1982; Fukuda 1987). *Zostera capricorni* 및 *Thalassia*의 종자를 이용한 잘피 서식지 복원이 수행되고 있으며(West *et al.* 1990), 종자발아를 통한 이식묘 생산도 시도되고 있다(Lewis 1987). 종자를 이용한 이식 방법은 대규모 잘피 서식지 복원에 적합한 방법으로 성체를 이용하는 방법보다 손쉽게 이식할 수 있는 장점이 있다(Davis and Short 1997). 그러나 조류, 파도 및 생물교란 등은 종자의 착생을 저해하거나 발아가 불가능한 지역으로 종자를 이동시켜, 발아를 방해하며(Granger *et al.* 2000; Orth *et al.* 2003), 종자를 채취하는 작업에 많은 인력과 비용이 소요되는 단점이 있다. 또한, 대규모의 종자 채취는 자연 잘피 서식지에 새로운 개체의 가입을 저해하여 잘피 서식지를 훼손시킬 수 있다(Davis and Short 1997).

총 8종의 잘피가 서식하는 한반도 연안은 매년 그 서식면적이 감소하고 있는데, 특히 1970년대 산업화를 거치면서 잘피 서식지는 50-70% 이상이 감소한 것으로 추정된다(Lee and Lee 2003). 잘피의 생태적 기능을 고려할 때, 잘피 서식지의 보존 및 복원을 위한 지속적인 프로그램이 시급한 실정이나 국내에서 이에 대한 연구나 투자는 매우 저조한 실정이다. 국내와는 달리 선진국의 경우 수많은 잘피 복원 프로젝트들이 수행되었거나 수행 중에 있다(Fonseca *et al.* 1998; Lord *et al.* 1999). 잘피 이식의 성공에는 다양한 변수가 존재하며, 최적의 이식방법은 이식장소의 물리화학적 환경요인에 따라 달라질 수 있다(Phillips 1982; Larkum and West 1983). 따라서 한반도 연안에 분포하는 잘피의 특성과 이 지역의 환경조건에 적합한 최적의 이식방법 개발이 절실히 요구된다.

적정 이식시기 또한 이식지역의 환경적 특성과 이식 종의 생리적인 특성에 의해 달라질 수 있다. 온대종인 *Zostera marina*는 봄철에 종지(Terminal shoot)가 화지(Reproductive shoot)로 변하고, 무성생식을 통하여 측지(Lateral shoot)가 나오며(Lee *et al.* 2005), 여름철에는 고수온으로 인하여 낮은 성장률과 높은 호흡률을 나타내는 것으로 알려져 있다(Lee 2004). *Z. marina*의 경우, 다양한 계절에 이식된 사례가 보고되어 있으나(Zimmerman *et al.* 1995; van Katwijk *et al.* 2000; Orth *et al.* 2003), 최적의 이식시기를 알아보기 위해 동일 지역에서 여러 시기에 걸쳐 이식이 진행된 사례는 거의 없다. 따라서 본 연구는 한반도 남부 연안의 세 이식장소에서 최적의 이식시기를 선정하기 위해서 사계절에 걸쳐 잘피 이식을 수행하였으며, 각 이식 시기별 생존율의 차이를 측정하였다. 본 연구에서는 퇴적물의 조성이 서로 다른 이식장소에서 각 장소에 적합한 이식방법과 최적의 이식시기를 선정하는 것

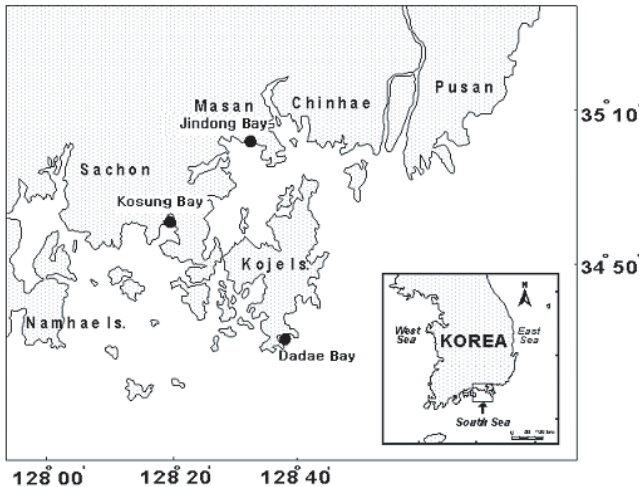


Fig. 1. Study sites in Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay on the south coast of Korea.

이 그 목적이다.

재료 및 방법

이식 장소

이식실험 장소인 다대만, 고성만과 진동만은 과거 만 전체에 갈피가 서식하였으나, 현재 방파제 공사 및 해안선 정비 사업 등으로 인하여 갈피 서식지가 급격히 감소하였다. 다대만(34°45'N, 128°38'E)은 퇴적물이 주로 모래로 이루어졌으며, 고성만(34°54'N, 128°20'E)은 니질로, 진동만(35°06'N, 128°32'E)의 퇴적물은 사니질로 이루어졌다. 다대만은 실험 장소의 인근에 소규모의 갈피 서식지가 존재하였고, 고성만과 진동만은 주변에 비교적 넓은 갈피 서식지가 관찰되었다. 세 이식 장소의 평균 수심은 만조 시 약 4 m 내외였다(Fig. 1).

물리적 요인과 퇴적물 조성

각 조사 장소에서 갈피 잎이 위치하는 수심에 조도계(HOBO-Light Intensity, Onset Computer, USA)를 설치하여 매 15분마다 수중 광량을 측정하였다. HOBO 조도계로 측정된 수치($\text{lumens} \cdot \text{ft}^{-2}$)는 동 시간에 광측정기(LI-1400, LI-COR, Inc)를 이용하여 측정된 수치와의 회귀분석을 통하여 $\text{photon flux density (PFD, mol photons m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ 로 변환하였다. 이렇게 변환된 수치를 하루 동안의 총 광량인 일광량($\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)으로 나타내었다(Lee 2004). HOBO 측정치의 PFD로의 변환은 HOBO 조도계를 수중에서 사용할 경우 PAR(photosynthetically active radiation) 이외의 파장이 수층에 의해 대부분 흡수되어 두 값 사이에 높은 상관관계를 보이므로 현재 널리 사용되고 있다. 수온은 각 조사장소에 수온계(HOBO RH Temp Light External, Onset Computer, USA)를 설치하여 매 15분 간격으로 측정하였다. 측정된 수

온은 일평균수온으로 나타내었다.

퇴적물의 입도분석을 위해 2003년 12월에 각 장소에서 지름 2.75 cm, 높이 12 cm의 시료채취기를 이용하여 퇴적물을 4회 채취하였다. 토양 입도 분석은 약 5 g의 시료를 10%의 염산(HCl)과 6%의 과산화수소(H_2O_2)와 반응시켜 탄산염과 유기물을 제거하였으며, 잔류물질은 1/16 mm(4 ϕ)체로 물체질하여 모래와 세립질로 분리하였다. 모래부분은 80 ϕ 에서 24 시간 이상 건조하였고, 4 ϕ 이하의 세립질 퇴적물은 calgon을 첨가하여 입자를 분리한 후 입도분석기(Sedigraph 5100, Micromeritics Instrument Corporation)로 분석하였다.

이식 모(transplant)의 채취

이식에 필요한 갈피 개체는 거제만에서 채취하였으며 기존 서식지의 훼손을 최소화하기 위해 일정한 간격을 유지하면서 채취하였다. 채취된 개체는 지하부에 붙어 있는 퇴적물을 해수로 제거한 후, 플라스틱용기에 해수를 담고 공기를 공급하여 보관하였으며, 채집 후 2일 이내에 각 장소에 이식하였다.

최적 이식 방법 선정

퇴적물 조성의 차이에 따른 적정 이식방법을 선정하기 위하여 다대만, 고성만, 진동만에 위치한 이식장소에서 2003년 12월에 TERFS, shell method, staple method 세 가지 방법으로 이식 실험을 수행하였다. TERFS method는 이식망(60 × 60 × 15 cm)에 갈피 72개체(200 shoots · m⁻²)를 고정 한 후, 각 이식 장소에 4개씩 투하하였다. 이식망은 갈피의 뿌리가 퇴적물속에 정착 되는 2개월 후 회수하였다. Shell method는 패각에 갈피를 고정시키는 방법으로 하나의 패각에 2개체씩을 고정하여 50 × 50 cm 면적에 15개씩(120 shoots m⁻²) 투하하였다. Staple method는 staple에 갈피를 고정하여 이식하는 방법으로 한 staple당 두 개체씩 고정하여, 50 × 50 cm 면적에 10개의 staples를(80 shoots m⁻²) 설치하였다. 모든 실험은 4 반복으로 수행되었다.

최적 이식시기 선정

최적의 이식시기를 선정하기 위하여 다대만에서 2003년 12월, 2004년 1월, 2월과 7월에, 고성만에서 2003년 10, 11 그리고 12월, 2004년 1, 2 그리고 7월에, 진동만에서는 2003년 11, 12월, 2004년 1, 2, 3 그리고 7월에 위의 3가지 이식방법으로 실험을 수행하였다.

서식밀도 및 생존율 측정

매월 각 장소에서 이식 방법 및 이식 시기를 달리하여 이식된 갈피의 서식밀도를 영구 방형구를 설치하여 측정하였으며, 자연서식지의 밀도는 35 × 35 cm 방형구를 이용하여

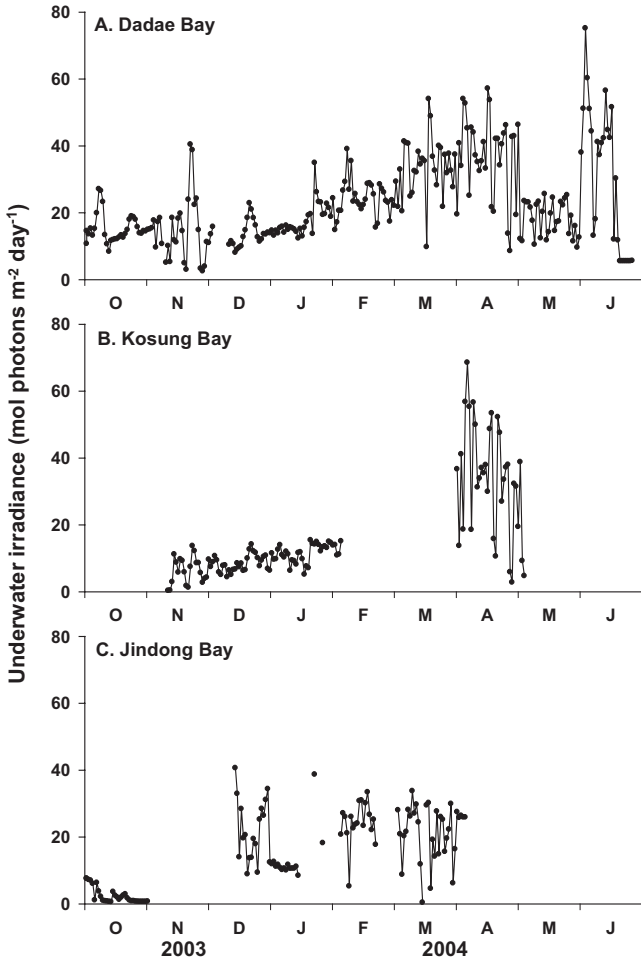


Fig. 2. Underwater photon flux density at the *Zostera marina* beds in Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay from October 2003 to June 2004.

조사하였다. 이식된 개체의 생존율은 이식 개체의 지하부가 퇴적물에 완전히 착생되어 안정화되는 3개월 후에 생존하고 있는 개체수를 측정하여 백분율(%)로 나타내었다.

통계분석

모든 자료는 평균 ±1 표준오차(SE)로 나타내었다. 통계 분석 전 모든 자료의 normality와 homogeneity of variance를 검정하였다. 이식방법 및 장소에 따른 생존율의 차이를 two-way ANOVA를 이용해서 분석하였으며, 각 이식장소에서 이식시기별 차이는 one-way ANOVA를 이용하여 분석하였다. 분석 값이 유의할 경우, Turkey HSD(Honestly Significant Difference)를 이용하여 각 자료의 유의성을 검정하였다. 모든 분석은 SAS(version 8.0, SAS Institute, UAS) 프로그램을 이용하였다.

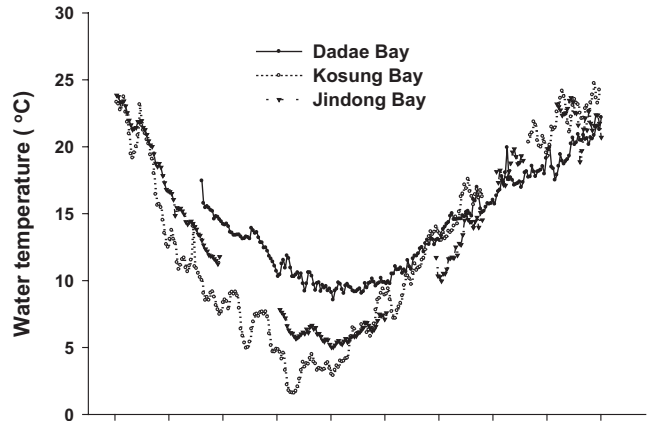


Fig. 3. Seasonal changes in water temperature at the *Zostera marina* beds in Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay from October 2003 to June 2004.

결 과

환경 요인

다대만, 고성만, 진동만의 평균 일일 수중광량은 각각 20.5, 11.8과 10.6 mol photons m⁻² · d⁻¹로 다대만이 가장 높았다(Fig. 2). 조사기간 중 세 지역의 수온은 계절적인 경향을 나타내었으며, 다대만, 고성만, 진동만의 연평균 수온은 각각 16.2, 14.5와 16.8°C로 나타났다(Fig 3). 세 지역의 최저 수온은 2004년 1월에 관찰되었는데, 다대만과 진동만이 각각 8.5와 5.0°C로 비교적 높았고, 고성만은 1.5°C로 매우 낮았다. 최고수온은 2004년 7월에 나타났으며 다대만, 고성만, 진동만에서 각각 26.9, 28.9 그리고 27.5°C였다.

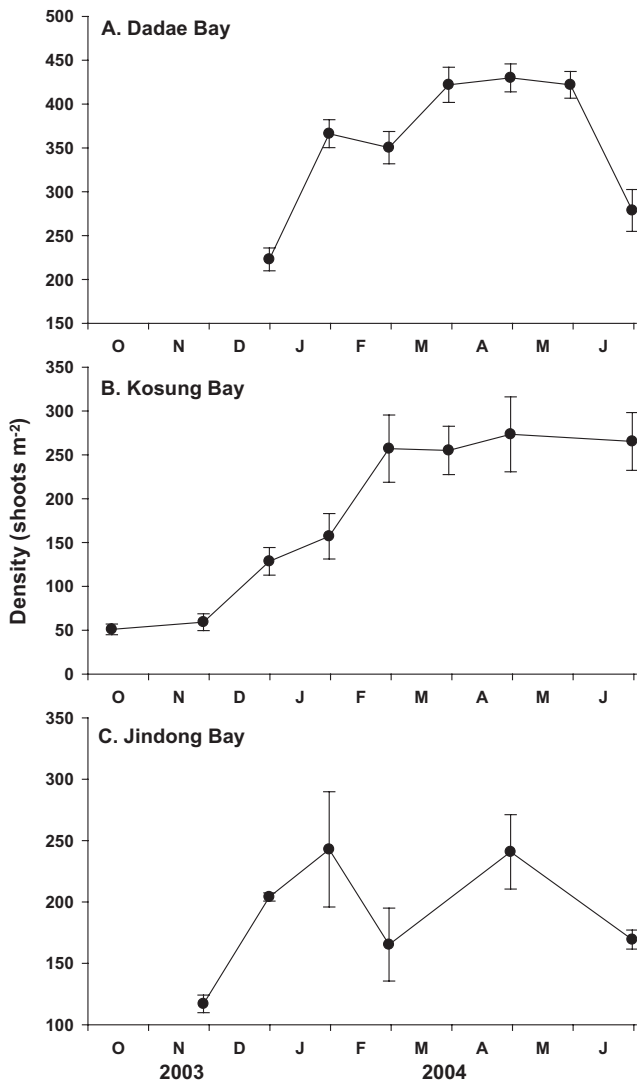
다대만의 퇴적물은 모래 84.9%, 미사 14.9%로 구성되어 주로 모래로 이루어졌고, 고성만의 퇴적물은 약 96%가 점토로 구성되었다. 진동만은 미사 42.9%, 모래 39.9%, 점토 17.2%로 미사와 모래가 우세하였다(Table 1).

자연 서식지의 잘피 서식밀도

세 이식지역 인근의 자연 서식지내 잘피 밀도는 계절과 지역적인 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 4). 일반적으로 봄에 가장 높은 서식밀도를 보였으며, 가을과 겨울에 낮은 서식밀도를 보였다. 다대만의 경우 최대 서식밀도는 12월 말에 약 430 shoots m⁻² 였으며, 최저 밀도는 4월 말에 약 220 shoots m⁻² 였다. 고성만에서는 10월에 최저(51 shoots m⁻²), 4월 말에 최대밀도(273 shoots m⁻²)를 보였으며, 진동만의 경우 11월에 최소밀도(117 shoots m⁻²)를 1월과 4월에 최대밀도(240 shoots m⁻²)를 보였다.

Table 1. Sediment compositions at the study sites in Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay on the south coast of Korea. Values are mean \pm SE (n = 4)

Grain size	Sediment composition (%)		
	Dadae Bay	Kosung Bay	Jindong Bay
Sand	84.9 \pm 1.3	0	39.9 \pm 13.2
Silt	14.9 \pm 1.3	4.0 \pm 0.4	42.9 \pm 9.8
Clay	0.2 \pm 0.2	96.1 \pm 0.4	17.2 \pm 3.5

**Fig. 4.** *Zostera marina*. Shoot density at natural beds in Dadae Bay (A), Kosung Bay (B), Jindong Bay (C) from October 2003 to June 2004.

이식 방법에 따른 생존율 차이

퇴적물 조성이 다른 세 이식장소에서 수행된 최적의 이식 방법 선정에 관한 실험에서 이식묘의 생존율은 이식장소 및 이식방법에 따라 유의한 차이를 나타내었다($P < 0.001$; Table 2, 3). 가장 높은 생존율을 나타낸 이식 방법은 staple method이었으며 (Table 2), 세 장소 모두에서 이식

6개월 후에는 무성생식을 통하여 개체수가 증가하였다(Fig. 5). TERFS는 사질로 구성된 다대만에서는 shell method에 비해 유의하게 높은 생존율을 나타내었으나($P < 0.001$), 니질의 고성만과 사니질의 진동만에서는 shell method가 TERFS보다 더 높은 생존율을 보여 주었다(Table 2). Shell method는 사질의 다대만에서는 5%의 매우 낮은 생존율을 나타내었다.

이식 시기에 따른 생존율 차이

적정 이식 시기 선정을 위한 이식실험에서 사질의 다대만에서 shell method로 이식한 경우를 제외하고는 잘피 이식묘의 생존율이 이식시기에 따라 유의한($P < 0.001$) 차이를 나타냈다(Table 4, 5). 사질의 다대만에서는 TERFS나 staple method로 이식한 경우 2004년 2월에 이식한 개체들이 가장 높은 생존율을 나타내었으며, 2004년 7월에 이식된 개체들은 일반적으로 10% 이하의 낮은 생존율을 보였다(Table 4). 다대만에서 shell method로 이식한 경우는 모든 시기에서 6% 이하의 생존율을 보였으며 이식시기에 따라 유의한($P = 0.2$) 차이가 나타나지 않았다.

고성만에서 TERFS를 이용한 경우 10, 11 그리고 12월에 이식된 개체들이 가장 높은 생존율을 보였으며, 1월과 2월에 이식된 개체들도 약 60% 정도의 생존율을 보였다(Table 4). Shell method를 이용한 경우는 11월에 이식된 개체들이, 그리고 staple method의 경우는 12월에 이식된 개체들이 가장 높은 생존율을 나타내었다. 7월에 이식된 개체들은 이식방법에 상관없이 3개월 후 모두 사라졌다(Table 4).

진동만에서 TERFS를 이용한 경우 가을과 겨울에 이식된 개체들은 60% 이상의 생존율을 나타내었으며, 7월에 이식된 개체들은 3% 이하의 낮은 생존율을 보였다(Table 4). Shell method를 이용한 경우는 11월에, staple method를 이용한 경우에는 12월에 이식된 개체들이 가장 높은 생존율을 나타내었다. 7월에 shell method로 이식된 개체들은 3개월 후 모두 사라졌으며, staple method로 이식된 개체들도 1.3%의 낮은 생존율을 나타내었다(Table 4).

Table 2. Survival rates of *Zostera marina* transplanted using TERFS, shell and staple methods at Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay. Values are mean \pm SE (n = 4)

Method	Survival rate (%)		
	Dadae Bay	Kosung Bay	Jindong Bay
TERFS	47.2 \pm 2.5	77.1 \pm 0.8	63.9 \pm 4.9
Shell method	5.0 \pm 2.9	83.3 \pm 1.4	71.7 \pm 2.9
Staple method	93.8 \pm 3.2	101.3 \pm 1.1	103.8 \pm 2.1

Table 3. Summary of ANOVA results for survival rates of *Zostera marina* transplanted using three different methods in three bay systems on the south coast of Korea

Source	SS	df	MS	F-ratio	P value
Method	10514.4	2	5257.2	403.0	< 0.001
Site	5972.7	2	2986.4	228.9	< 0.001
M \times S	5329.6	4	1332.4	102.1	< 0.001

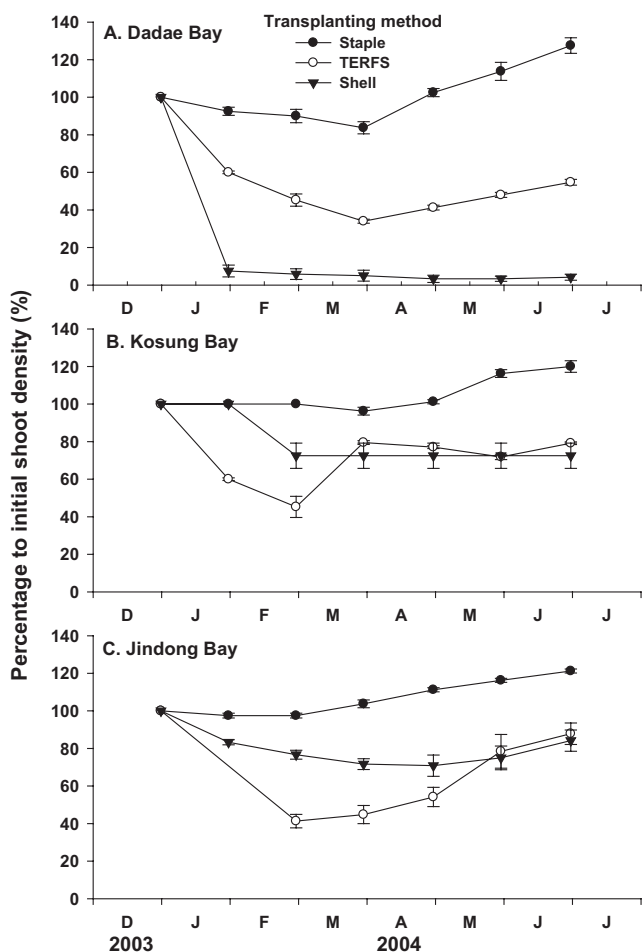


Fig. 5. *Zostera marina*. Changes in percent to initial shoot density at the transplanted areas in Dadae Bay (A), Kosung Bay (B), and Jindong Bay (C)

고찰

최적 이식방법 선정

본 연구에서 사용된 세 가지 이식 방법 중 staple method로 이식된 잘피 이식묘들이 가장 높은 생존율을 나타내었다. Staple method는 지하경을 고정하는 방법에 따라 다양하나, 이번 실험에서는 지하경을 서로 교차해서 이식하는 지하경 교차방법(The horizontal rhizome method)을 사용하였다. 이 방법은 생장점이 서로 교차되어 두 방향으로 성장할 수 있어, 생존율과 밀도를 높일 수 있다(Davis and Short, 1997). 본 실험에서 staple method를 이용한 경우 여름철에 이식된 개체들을 제외하면 대부분 이식묘의 3개월 후 생존율이 90% 이상으로, 이전에 보고된 생존율에 비해 높게 나타났다(Philips 1974; Thom 1990; Fonseca *et al.* 1996; Orth *et al.* 1999). 이식 작업 시 잘피 개체들의 지하부 조직이 퇴적물에 위치하는 상태에 따라 이식묘의 생존율이 달라질 수 있는데, TERFS와 shell method에서는 지하부가 퇴적물 위에 놓이는 반면, staple method에서는 이식 개체의 지하부 조직이 퇴적물 속에 고정되므로 높은 생존율을 나타낼 수 있다. 이식된 개체들이 이식 초기에 퇴적물 속에 지하부를 완전히 정착시키지 못하면 비교적 약한 교란에도 이식묘들이 쉽게 죽을 수 있다. Kelly *et al.*(1971)은 *Thalassia testudinum*을 이용한 이식 실험에서 이식 초기 3개월의 생존율이 매우 중요하다고 하였다. Staple method는 이식장소의 퇴적물의 조성에 상관없이 가장 높은 생존율을 나타내었으나, 이식의 용이함과 비용 측면에서 효과적이지 못한 것으로 여겨진다.

TERFS의 경우 잘피 이식묘들이 이식망에 고정되어 투하되기 때문에 조류와 파도의 영향을 거의 받지 않으며, 저서생물의 활동으로부터 이식된 개체들이 보호될 수 있다. 많은

Table 4. Survival rates of *Zostera marina* transplanted using TERFS, shell and staple methods in Dadae Bay, Kosung Bay and Jindong Bay during 2003 and 2004. Values are mean \pm SE (n = 4). n.d = no data

Site	Transplanting time	Survival rate (%)		
		TERFS	Shell method	Staple method
Dadae Bay	2003			
	December	47.2 \pm 2.5	5.0 \pm 2.9	93.8 \pm 3.2
	2004			
	January	63.9 \pm 8.3	5.8 \pm 1.6	60.0 \pm 6.1
	February	91.0 \pm 4.8	5.8 \pm 0.8	102.5 \pm 1.3
	July	3.1 \pm 0.0	1.7 \pm 1.0	11.3 \pm 1.1
Kosung Bay	2003			
	October	75.0 \pm 2.0	63.3 \pm 7.9	n.d
	November	76.7 \pm 3.7	94.2 \pm 2.8	n.d
	December	77.1 \pm 0.8	83.3 \pm 1.4	101.3 \pm 1.1
	2004			
	January	64.2 \pm 0.8	90.0 \pm 1.4	76.3 \pm 2.1
	February	59.0 \pm 0.6	86.7 \pm 8.2	96.3 \pm 2.1
	July	0	0	0
Jindong Bay	2003			
	November	67.1 \pm 7.3	93.3 \pm 2.7	n.d
	December	63.9 \pm 4.9	71.7 \pm 2.9	103.8 \pm 2.1
	2004			
	January	66.3 \pm 3.5	84.2 \pm 1.6	93.8 \pm 2.1
	February	70.5 \pm 3.5	71.7 \pm 3.2	98.8 \pm 1.1
	March	69.8 \pm 0.9	68.3 \pm 1.7	92.5 \pm 1.3
	July	2.8 \pm 0.9	0	1.3 \pm 1.1

잘피 서식지에서 저서동물에 의한 생물교란이 심하게 발생하는 것이 관찰되는데, 이러한 퇴적물의 교란은 잘피의 생존에 크게 영향을 미친다. TERFS를 이용한 방법은 대규모 이식 작업에 유리하며 활발한 어로 활동 및 양식으로 인해 잠수가 불가능할 경우에 적절한 방법이라고 할 수 있다 (Phillips and McRoy, 1990). 그러나 이식 초기에 서식 밀도가 급격하게 감소하는 단점이 있는데, 이는 잘피 이식망이 퇴적물 위에 투착되므로 이식된 개체들의 지하부 조직이 퇴적물에 정착되는데 상대적으로 오랜 시간이 걸리기 때문이며, 따라서 퇴적물에 뿌리를 내리지 못한 많은 개체들은 이식 초기에 사망하게 된다.

본 연구진에 의해 개발된 shell method는 이식장소의 퇴적물 구성에 의해 성공 여부가 좌우되었다. 세 지역에서 진행된 shell method에 의한 이식은 퇴적물의 구성성분이 점토와 미사가 우세한 고성만과 진동만에서는 70% 이상의 높은 생존율을 보였으나, 사질의 다대만에서는 5% 정도의 매우 낮은 생존율을 나타내었다. 패각에 고정되어 투착된 이식 개체는 TERFS와 같이 퇴적물 위에 놓이게 되며, 지하부 조직이 퇴적물에 정착하기 위해서는 패각 위로 지하부가 성장하여 퇴적물 속으로 파묻혀야 한다. 퇴적물의 퇴적밀도에 따라 정착되는 시간이 달라질 수 있는데 모래로 구성된 퇴적물은 미

사나 점토를 구성된 퇴적물보다 지하부 조직이 퇴적물 속으로 정착하기가 매우 어렵다. 또한 조류나 파도도 패각에 고정된 이식묘가 퇴적물에 정착되는 것을 방해하였는데, TERFS에 비해 위에서 눌러주는 힘이 약해 조류나 파도에 의해 이식묘들이 쉽게 움직였다.

Shell method가 특정지역에 한정되어 사용될 수밖에 없는 단점에도 불구하고, 작업시간이나 비용 면에서 매우 효과적인 이식 방법이라고 볼 수 있었다. Shell method는 수중작업을 최소화하여 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. Staple method가 가장 높은 생존율을 나타내었으나 장시간동안 잠수를 해야 하는 단점이 있으며, shell method는 이런 단점을 보완하여 대부분의 작업이 육상에서 이루어져 비용을 최대한 절감할 수 있다. 그리고 기존의 이식 방법보다 환경친화적이다. 기존의 방법들은 환경친화적인 재료들을 사용하더라도 최소한의 환경오염을 피할 수는 없었으나, shell method는 모든 재료들이 바다에서 기원된 것이므로, 이식장소에 새로운 오염물을 가하지 않는다. 또한, shell method는 이식 후 추가적인 비용이 들지 않는데, TERFS는 일정기간 후, 구조물을 제거해야 하는 번거로움이 있으나, 본 방법은 패각을 투하한 즉시 모든 작업이 종료되며, 어업 활동이 활발한 장소나 잠수가 불가능한 장소에서도 쉽게 이식할 수 있다. 따

Table 5. Summary of one-way ANOVA results for survival rates of *Zostera marina* transplanted during 2003 and 2004. Survival rate is the dependent variable, while transplanting time is the independent variable

Site	Method	SS	df	MS	F-ratio	P value
Dadae Bay	TERFS	7,311.7	3	2,437.2	13.1	<0.001
	Shell method	6.2	3	2.1	1.8	0.200
	Staple method	635.0	3	211.7	47.9	<0.001
Kosung Bay	TERFS	1,496.3	4	374.1	64.1	<0.001
	Shell method	296.3	4	74.1	15.5	<0.001
	Staple method	56.0	2	28.0	15.5	<0.01
Jindong Bay	TERFS	80.1	5	16.0	10.7	<0.001
	Shell method	6.8	5	1.4	8.2	<0.001
	Staple method	16.7	4	4.2	10.0	<0.001

라서 shell method가 우리 연안의 잘피 서식지의 복원 사업에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다.

최적 이식 시기 선정

지역적으로 다양한 환경 요인과 잘피 종간의 다양한 생리적 특성으로 인해, 서식지 복원을 위한 최적의 이식 시기는 지역에 따라 달라질 수 있다. 일반적으로 이식 시기는 계절적으로 심한 스트레스가 발생한 후, 생리적으로 서서히 회복 단계에 접어드는 시기가 최적이라고 알려져 있다 (Calumpong and Fonseca 2001). Chesapeake Bay와 North Carolina에서 수행된 잘피 이식 실험에서 최적의 이식 시기는 가을이라고 보고되었다 (Orth and Moore 1982, Calumpong and Fonseca 2001). 이들 지역에서는 여름동안의 고수온 현상으로 잘피가 생리적으로 심한 스트레스를 받으며, 가을에 서서히 회복되어진다. 잘피는 고수온에서 호흡량이 급격하게 증가하여 생물량 및 생산성이 감소하는 것으로 알려져 있다 (Wetzel and Penhale 1983; Orth and Moore 1986; Lee *et al.* 2003; Lee 2004). 본 연구에서도 기존의 결과와 유사하게 나타났는데 적정 이식 시기 선정을 위한 실험의 결과, 최적의 이식 시기는 가을 및 겨울인 것으로 나타났다. 한반도 연안에 서식하는 잘피 개체군들은 주로 수온에 많은 영향을 받는 것으로 보고되었으며, 잘피의 생산성은 여름동안 급격하게 감소하였다 (Lee 2004; Lee *et al.* 2005). 이는 이들 지역에 서식하는 잘피가 여름동안 고수온으로 인해 호흡량이 광합성량에 비해 급격하게 증가하기 때문이다 (Lee 2004; Lee *et al.* 2005). 남반구(남부 오스트레일리아)에서 수행된 이식 실험에서는 가을과 겨울에 이식된 개체의 생존율이 봄과 여름에 이식된 개체의 생존율보다 낮게 관찰되었는데, 이는 겨울철의 강한 바람에 의해 이식된 개체들이 물리적인 교란을 받았기 때문이었다 (Paling *et al.* 2001).

겨울철에 이식된 잘피 개체들의 생존율도 매우 높게 나타났으나 낮은 수온으로 인해 이식묘 채취 및 이식 작업에 많

은 어려움이 있고, 채취된 개체의 이동시 저온 스트레스를 받게 되는 단점이 있다. 봄철은 영양지가 화지로 변하여 종자를 생산하는 시기이므로 (Lee *et al.* 2005), 이 기간 동안 채집활동은 매우 조심스럽게 이루어져야 한다. 초기 화지의 형태는 영양지와 매우 유사하여 현장에서 구별하기가 매우 어려우며, 따라서 이식묘 채취 시 많은 수의 화지를 손상시킬 수 있다. 따라서 자연 서식지의 손상을 줄이기 위해 봄철 이식은 적합하지 않다. *Zostera marina*는 15~20°C에서 최고의 성장을 나타내며 고 수온에서는 생장이 급속히 감소하므로 (Lee *et al.* 2005) 높은 수온을 나타내는 여름철은 이식하기에 적합하지 않다. 본 연구에서도 여름철에 이식한 개체는 세 지역 모두에서 3개월 이내에 거의 모두 사망하였다. 본 연구는 연안 생태계 복원 및 정화를 위하여 한반도 연안에 적합한 잘피 이식방법을 개발하고 최적의 이식시기를 선정할 수 있게 함으로써 앞으로 진행될 잘피 서식지 복원 사업에 매우 중요한 자료를 제공할 것으로 여겨진다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 수산특정연구개발사업(20040053)과 부산대학교 해외장기파견 사업의 지원에 의하여 수행되었습니다. 무명의 심사자의 지적에 의해 본 논문의 질이 향상되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Addy C.E. 1947. Eel grass planting guide. *Md. Conserv.* **24**: 16-17.
- Bosworth W. and Short F.T. 1993. *Mitigation plan for the New Hampshire commercial marine terminal development project in Portsmouth, NH.* NH Department of Transportation, Port Authority.
- Calumpong H.P. and Fonseca M.S. 2001. Seagrass transplanta-

- tion and other seagrass restoration methods. In: Short F.T., Coles R.G. and Short C.A. (eds), *Global Seagrass Research Methods*. Elsevier, Amsterdam. pp. 424-443.
- Campbell M.L., Bastyan G.R. and Walker D.I. 2000. A decision-based framework to increase seagrass transplantation success. *Biol. Mar. Medit.* **7**: 332-335.
- Churchill A.C., Cok A.E. and Riner M.I. 1978. *Stabilization of subtidal sediments by the transplantation of the seagrass Zostera marina* L. New York Sea Grant Report Series. NYSSGP RS-78-15.
- Davis R.C. and Short F.T. 1997. Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique: The horizontal rhizome method. *Aquat. Bot.* **59**: 1-15.
- Federal Register. 1990. *Memorandums of Agreement (MOA)*. Clean Water Act Section 404(b)(1) Guidelines. Correction 55(48). pp. 9210-9213.
- Fonseca M.S. and Fisher J.S. 1986. A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restoration. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **29**: 5-22.
- Fonseca M.S., Kenworthy W.J. and Courtney F.X. 1996. Development of planted seagrass beds in Tampa Bay, FL, USA: I. Plant components. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **132**: 127-139.
- Fonseca M.S., Kenworthy W.J. and Thayer G.W. 1998. *Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters*. NOAA Coastal Ocean Program/Decision Analysis Series NO. 12. NOAA Coastal Ocean Office, Silver Spring, MD.
- Fukuda T. 1987. Development of the techniques for marine macrophyte (*Zostera marina*) bed creation-VIII: Manual for *Zostera* bed creation by the sowing method. *Bull. Fish. Exper. Stn. Okayama Prefecture* **2**: 35-37.
- Granger S.L., Traber M.S. and Nixon S.W. 2000. The influence of planting depth and density on germination and development of *Zostera marina* L. seeds. *Biol. Mar. Medit.* **7**: 55-58.
- Kelly Jr. J.A., Fuss J.A. and Hall J.R. 1971. The transplanting and survival of turtle grass, *Thalassia testudinum* in Boca Ciega Bay, Florida. *Fish. Bull.* **69**: 273-280.
- Larkum A.W.D. and West R.J. 1983. Stability, depletion and reservation of seagrass beds. *Proc. Linn. Soc. NSW.* **106**: 201-212.
- Lee K.-S. and Lee S.Y. 2003. The seagrasses of the Republic of Korea. In: Green E.P., Short F.T. and Spalding M.D. (eds), *World Atlas of Seagrasses: present status and future conservation*. University of California Press, Berkeley. pp. 193-198.
- Lee K.-S., Kang C.K. and Kim Y.S. 2003. Seasonal dynamics of the seagrass *Zostera marina* on the south coast of the Korean peninsula. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **38**: 68-79.
- Lee K.-S. 2004. Production assesment of eelgrass, *Zostera marina* using the plastochrone method compared with the conventional leaf marking technique. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **39**: 186-196.
- Lee K.-S., Park S.R. and Kim J.B. 2005. Production dynamics of the eelgrass, *Zostera marina* in two bay systems on the south coast of the Korean peninsula. *Mar. Biol.* **147**: 1091-1108.
- Lee Long W.J. and Thom R.M. 2001. Improving seagrass habitat quality. In: Short F.T., Coles R.G. and Short C.A. (eds), *Global Seagrass Research Methods*. Elsevier, Amsterdam. pp. 407-423.
- Lewis III R.J. 1987. The restoration and creation of seagrass meadows in the southeastern United States. In: Durako M.J., Phillips R.C. and Lewis R.J. III (eds), *Proceedings of the Symposium on Subtropical-Tropical Seagrasses of the Southern United States*. pp. 153-173.
- Lewis R.R. and Phillips R.C. 1980. Occurrence of seeds and seedlings of *Thalassia testudinum* Banks ex Konig in the Florida Keys (USA). *Aquat. Bot.* **9**: 377-380.
- Lord D., Paling E.I. and Gordon D. 1999. Review of Australian rehabilitation and restoration programs In: Butler A.J. and Jernakoff P. (eds), *Seagrass in Australia: Strategic review and development of an R&D plan*. SCIRO Publishing, Collingwood. pp. 65-115.
- Muehlstein L.K., 1989. Perspectives on the wasting disease of eelgrass *Zostera marina*. *Dis. Aquat. Org.* **7**: 211-221.
- Orth R.J. and Moore K.A. 1982. *The biology and propagation of Zostera marina, eelgrass, in the Chesapeake Bay, Virginia*. Final Report to the U.S.E.P.A. Chesapeake Bay Program. Annapolis, Maryland.
- Orth R.J. and Moore K.A. 1986. Seasonal and year-to-year variations in the growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) in the lower Chesapeake Bay. *Aquat. Bot.* **24**: 335-341.
- Orth R.J., Harwell M.C. and Fishman J.R. 1999. A rapid and simple method for transplanting eelgrass using single unanchored shoots. *Aquat. Bot.* **64**: 77-85.
- Orth R.J., Fishman J.R., Harwell M.C. and Marion S.R. 2003. Seed density effects on germination and initial seedling establishment in eelgrass in the Chesapeake Bay region, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **250**: 71-79.
- Paling E.I., Keulen M., Wheeler K., Phillips J. and Dyrhberg R. 2001. Mechanical seagrass transplantation in Western Australia. *Ecol. Eng.* **16**: 331-339.
- Phillips R.C. 1974. Transplantation of seagrasses with special emphasis on eelgrass, *Zostera marina* L. *Aquaculture* **4**: 161-176.
- Phillips R.C. 1982. Seagrass Areas. In: Lewis III R.R. (ed.), *Creation and restoration of coastal plant communities*. CRC Press, Florida. pp. 173-201.
- Phillips R.C. and McRoy C.P. 1990. Transplant methods. In: Phillips R.C. and McRoy C.P. (eds), *Seagrass Research Methods*. UNESCO, Paris. pp. 51-54.
- SAS Institute. Inc. 1989. *SAS/STAT guide for personal computers, version 6, 4th ed.* SAS Institute, Cary, North Carolina.
- Short F.T. and McRoy C.P. 1984. Nitrogen uptake by leaves and roots of the seagrass *Zostera marina* L. *Bot. Mar.* **27**: 547-555.
- Short F.T., Mathieson L.K. and Porter D. 1986. Recurrence of the eelgrass wasting disease at the border of New Hampshire and Maine, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **29**: 89-92.
- Short F.T. and Wyllie E.S. 1996. National and human-induced disturbance of seagrasses. *Environ. Conserv.* **23**: 17-27.
- Short F.T., Davis R.C., Kopp B.S., Short C.A. and Burdick D.M.

2002. Site-selection model for optimal transplantation of eelgrass *Zostera marina* in the northeastern US. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **227**: 253-267.
- Thom R.M. 1990. A review of eelgrass (*Zostera marina* L.) transplanting projects in the Pacific Northwest. *Northeast Environ. J.* **6**: 121-137.
- van Katwijk. M.M., Hermus D.C.R., de Jong D.J., Asmus R.M. and de Jonge V.N. 2000. Habitat suitability of the Wadden Sea for restoration of *Zostera marina* beds, *Helgol. Mar. Res.* **54**: 117-128.
- Ward L.G., Kemp W.M. and Boynton W.R. 1984. The influence of waves and seagrass communities on suspended particulates in an estuarine embayment. *Mar. Geol.* **59**: 85-103.
- West R.J., Jacobs N.E. and Roberts B.E. 1990. Experimental transplanting of seagrasses in Botany Bay, Australia. *Mar. Poll. Bull.* **21**: 97-203.
- Wetzel R.G. and Penhale P.A. 1983. Production ecology of seagrass communities in the lower Chesapeake Bay. *Mar. Techn. Soc. J.* **17**: 22-31.
- Zimmerman R.C. Reguzzoni J.L. and Alberte R.S. 1995. Eelgrass (*Zostera marina* L.) transplants in San Francisco Bay: Role of light availability on metabolism, growth and survival. *Aquat. Bot.* **51**: 67-86.
-

Received 19 September 2005

Accepted 5 November 2005