

진동만과 가막만에 서식하는 잘피 개체군의 성장 동태 및 탄소고정량 추정

김태환¹ · 박상률¹ · 김영균¹ · 김종협¹ · 김승현¹ · 김정하² · 정익교³ · 이근섭^{1*}

(¹부산대학교 생명과학과, ²성균관대학교 생명과학과, ³부산대학교 지구환경시스템학부)

Growth Dynamics and Carbon Incorporation of the Seagrass, *Zostera marina* L. in Jindong Bay and Gamak Bay on the Southern Coast of Korea

Tae Hwan Kim¹, Sang Rul Park¹, Young Kyun Kim¹, Jong-Hyeob Kim¹,
Seung Hyeon Kim¹, Jeong Ha Kim², Ik Kyo Chung³ and Kun-Seop Lee^{1*}

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

²Department of Biological Science, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

³Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Since seagrasses in the coastal and estuarine ecosystems achieve high levels of production, they require high inorganic carbon and nutrient incorporation. Thus, seagrasses may play a significant role in carbon and nutrient cycling in the coastal and estuarine ecosystems. To examine growth dynamics of *Zostera marina* L. environmental factors such as underwater irradiance, water temperature, and salinity, and biological parameters such as shoot density, biomass, shoot morphology, and leaf productivity were measured in two bay systems (Jindong Bay and Gamak Bay) on the southern coast of Korea. While underwater irradiance did not show distinct seasonal trend, water temperature at both sites exhibited clear seasonal trend throughout the experimental period. Shoot density increased dramatically during winter due to the increased seedlings through germination of seeds in Jindong Bay and due to the increased lateral shoots in Gamak Bay. Eelgrass biomass increased during winter and decreased during summer. Maximum biomass in Jindong Bay and Gamak Bay was 250.2 and 232.3 g dry weight m⁻², respectively. Carbon incorporation into the eelgrass leaf tissues was estimated from productivity and leaf tissues carbon content. The calculated annual carbon incorporations at the Jindong Bay and Gamak Bay sites were 163 and 295 g C m⁻² y⁻¹, respectively. This high carbon incorporation into seagrass tissues suggests that seagrass habitats play an important role as a carbon absorber in the coastal and estuarine ecosystems.

Key Words: carbon incorporation, growth dynamics, productivity, seagrass, *Zostera marina* L.

서 론

잘피는 연안 및 하구 생태계에 서식하는 해양 현화식물로서, 높은 생산성을 나타내며, 많은 해양생물들의 먹이원, 서식처 및 산란장 등을 제공하므로 연안 생태계에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다(Hemminga and Duarte 2000). 또한, 잘피는 해저퇴적물을 안정화시켜 연안의 퇴적물 침식을 감소시키고, 하구로부터 과도하게 유입되는 무기영양염류나 오염물질을 흡수 제거하여 연안의 부영양화를 감소시키는

뛰어난 생태계 정화능력을 가지고 있다(Short and Short 1984; Green and Short 2003; Larkum *et al.* 2006). 최근에는 연안이나 하구 생태계에서 빈번히 발생하고 있는 부영양화 현상을 초기에 예측하는 지표종(indicator)으로도 사용되고 있다(Lee *et al.* 2004). 따라서 잘피 서식지는 하구 및 연안 생태계에서 매우 중요한 구성 요소로 평가되고 있다.

잘피 서식지는 해양 일차생산자 중 가장 높은 생산성을 나타내는 군집 중 하나이다(McRoy and McMillan 1977). 잘피는 초식자에 의한 직접적인 섭식작용이 매우 낮기 때문에, 잘피에 의해서 생산된 탄소의 상당 부분은 퇴적물 층에 매몰되거나, 미소생물학적 먹이연쇄(microbial food chain)를 통

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

해 상위영양단계로 이동하게 된다(Duarte and Cebrian 1996; Cebrian and Durate 2001). 또한 높은 생산성으로 인해, 잘피는 많은 양의 무기탄소와 영양염류의 흡수를 필요로 한다. 잘피는 육상 식물이나 해조류와는 달리 잎과 뿌리, 두 기관 모두를 통해 영양물질을 흡수 할 수 있으며, 잎 조직에 의한 영양물질 흡수는 전체 흡수의 상당한 부분을 차지한다 (Stapel *et al.* 1996; Pedersen *et al.* 1997; Lee and Dunton 1999). 전 세계적으로 잘피 서식 면적은 전체 해양면적의 약 0.15%를 차지하는 것으로 알려져 있지만(Charpy and Charpy-Roubaud 1990), 그들의 생산량은 전체 해양 일차 생산량에 약 12%를 담당한다고 보고되었다(Durate and Cebrian 1996). 따라서 이들 잘피서식지는 연안 및 하구생태계의 탄소 및 물질순환에 중요한 역할을 담당하고 있다고 할 수 있다(Hemminga *et al.* 1991; Blackburn *et al.* 1994).

최근 IPCC(유엔정부간기후변화위원회) 4차년도 보고서에 의하면, 지난 30년간 이산화탄소 배출량은 약 80% 증가하였으며, 이로 인해 지구평균기온은 지난 100년간 약 0.74°C 증가하였다고 보고하였다(IPCC 2007). 따라서 각 나라는 교토 의정서(Kyoto Protocol)에 의해 다양한 이산화탄소 저감방안을 강구 또는 계획하고 있다. 잘피는 대기로부터 이산화탄소 흡수가 가능하며, 그들의 높은 생산성과 낮은 섭식률로 인하여 많은 양의 무기탄소 제거가 가능한 것으로 알려져 있다(Durate and Cebrian 1996; Short and Neckles 1999). Palacios and Zimmerman(2007)는 해수 중에 이산화탄소 농도를 증가시킴으로써 잘피의 생산성이 크게 증가하였다고 보고하였다. 따라서 잘피는 높은 생산성을 통하여 해수 중 무기탄소의 상당량을 제거할 수 있을 것으로 추측된다.

한반도 연안에는 9종의 잘피가 서식하고 있으며, *Phyllospadix* 속의 종들을 제외한 대부분의 잘피 종들은 사질 또는 니질의 연성저질에 분포한다(Lee and Lee 2003; Kim *et al.* submitted). 현재 우리나라의 잘피 서식 면적은 대략적으로 55-70 km²로 추정되고 있으며, 거머리말(*Zostera marina*)이 대부분(50-60 km²)을 차지하고 있다(Lee and Lee 2003). 우리나라 거의 모든 연안에 많은 양의 잘피가 분포하고 있으며, 따라서 우리 연안의 탄소순환에 잘피가 매우 중요한 역할을 하고 있는 것으로 추정된다. 본 연구에서는 진동만과 가막만에 서식하는 잘피 개체군의 성장 동태(growth dynamics)를 알아보기 위해서, 수온, 수중 광량 및 염도와 같은 물리적 환경 요인과 생산성, 생체량 및 생육밀도와 같은 생물학적 특성을 함께 조사하였다. 또한 잘피의 생산량 및 엽체 내 탄소함유량을 통해 잘피에 의한 탄소고정량을 추정하였다.

재료 및 방법

연구 장소

우리나라 남해 연안의 진동만(128° 32' 41"E, 35° 06' 36"N)과 가막만(127° 43' 16"E, 34° 37' 53"N)에 분포하는 거머리말(*Zostera marina*) 서식지에서 본 조사를 수행하였다(Fig. 1). 퇴적물은 진동만에서는 사니질, 가막만에서는 니질로 구성되어 있었다. 진동만 조사 지역의 잘피 분포 면적은 약 0.1 km²이었으며, 가막만 지역은 약 0.3 km²이었다. 두 조사지역에서 거머리말은 1-5 m 내외의 수심에서 서식하고 있었으며, 본 연구는 전체 잘피군락의 특성을 대표할 수 있는 평균 서식수심에 해당하는 2.5 m 수심에 서식하는 거머리말 개체군을 대상으로 수행하였다. 모든 조사는 SCUBA diving을 통해 2007년 7월부터 2008년 7월까지 진행되었다.

물리적 환경요인

수중광량은 각 조사 장소에서 잘피 지상부 조직이 위치하는 수심에 조도계(Submersible Odyssey Photosynthetic Irradiance Recording System, Dataflow Systems Pty Ltd, New Zealand)를 설치하여 매 15분 간격으로 측정하였다. 조도계는 LI-193SA 센서와 LI-1400 기록계(LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 이용해서 영점 조정하였으며, 센서위의 착생생물을 정기적으로 제거하여 그 영향을 최소화하였다. 측정된 수중광량은 하루 동안의 총 광량인 일일광량(mol photons m⁻² d⁻¹)으로 나타내었다. 수온은 각 조사장소에 수온계(StowAway Tidbit® temperature data logger, Onset computer, USA)를 설치하여 매 15분 간격으로 측정하였으며, 측정된 수온은 일일평균수온으로 나타내었다. 염도는 YSI 85를 이용해서 매달 각 조사장소에서 측정하였다.

해수 및 퇴적물 내 영양염류

해수 및 퇴적물 내 무기영양염류(NH₄⁺, NO₃⁻+NO₂⁻, PO₄³⁻) 농도를 측정하기 위해서 매달 각 조사 지역에서 해수 및 퇴적물 시료를 각각 4개씩 채취하였다. 이 때, 퇴적물 시료 채취는 13 cm 길이의 syringe corer를 이용하였으며, 퇴적물 공극수는 퇴적물을 15분간 원심 분리하여(5,000 g) 채취하였다. NO₃⁻+NO₂⁻ 농도는 구리로 코팅된 카드뮴 환원관을 이용해 NO₃⁻를 NO₂⁻로 환원시켜 측정하였다. 해수 및 퇴적물 내 무기영양염류(NH₄⁺, NO₃⁻+NO₂⁻, PO₄³⁻) 농도는 standard colorimetric techniques에 의해 분석하였다(Parsons *et al.* 1984).

외부형태, 생육 밀도 및 생체량

매월 각 조사장소에서 10-15개체를 채집하여 전체 길이

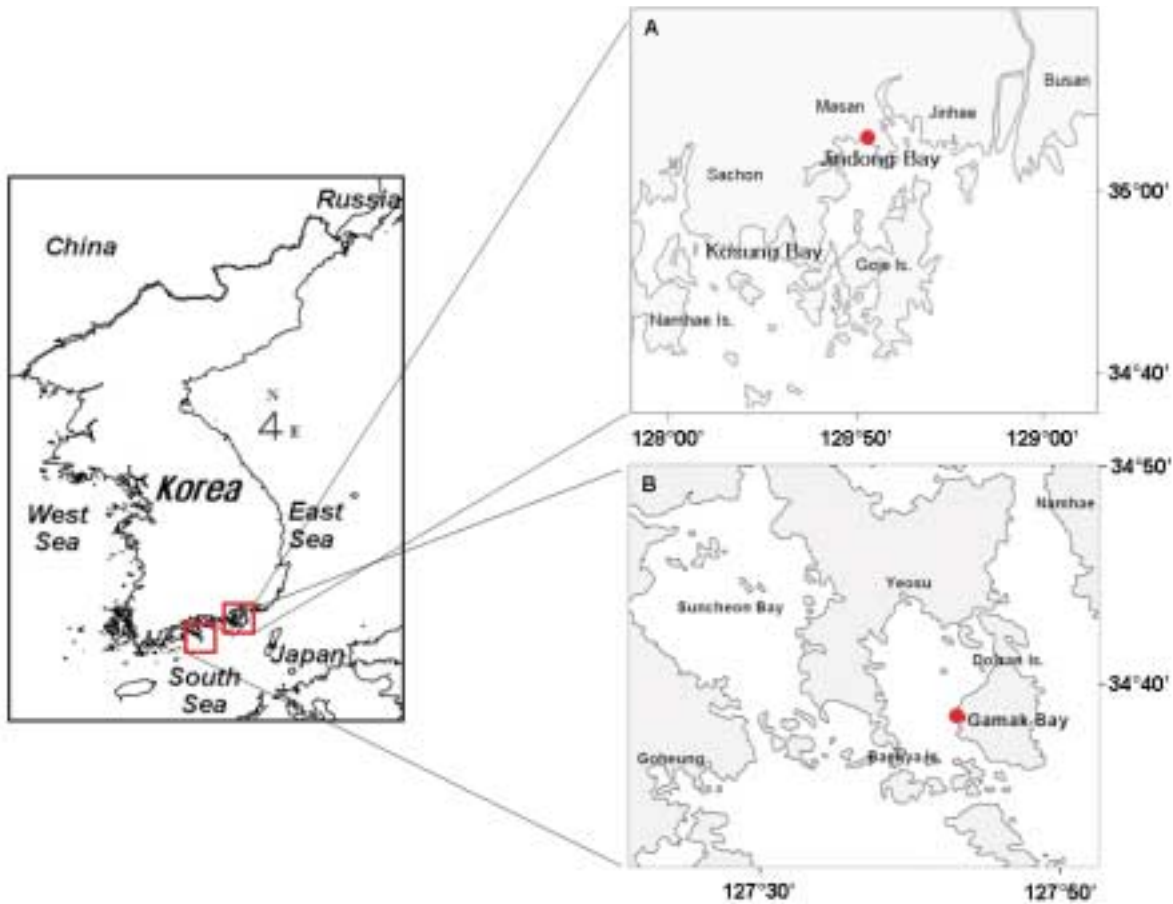


Fig. 1. Study sites in Jindong Bay (A) and Gamak Bay (B) on the southern coast of Korea.

(shoot height), 엽초 길이 (sheath length)와 잎 너비 (leaf blade width) 등을 측정하였다. 전체 길이와 엽초 길이는 각각 성장점에서부터 가장 긴 잎의 끝부분과 엽초의 끝부분의 길이로 측정하였으며, 잎의 너비는 가장 긴 잎의 너비로 측정하였다.

잘피의 생육밀도는 매월 0.1225 m² 내 방형구에 서식하는 개체수를 세어 측정하였으며, 단위면적당 생육밀도 (shoots m⁻²)로 나타내었다. 생체량은 방형구 내 모든 잘피를 채취하여 민물을 이용해 부착생물과 퇴적물을 제거한 후 측정하였다. 지상부와 지하부로 분리하여 60°C에서 무게가 일정할 때까지 건조시킨 후, 각각의 무게를 측정, 단위면적당 생체량 (g dry weight m⁻²)을 추정하였다.

생산성 측정

잘피의 잎 생산성은 blade marking technique (Zieman 1974; Kentula and McIntire 1986)를 이용하여 매월 측정하였다. 각 실험지역에서 10-15개체에 주사바늘을 이용하여 엽초 (sheath)에 구멍을 뚫은 다음, 2주내지 4주 후에 채취하였다. 채취한 개체에서 새로 자란 부분 (new leaf)과 기존 부분 (old leaf)으로 나누어 각각의 건중량 (dry weight)을 측정

하였다. 이렇게 측정된 값으로 개체 당 일일 생산량 (mg dry weight shoot⁻¹ day⁻¹)을 계산하였다. 또한, 단위면적당 잎의 생산성 (g dry weight m⁻² day⁻¹)은 개체 당 생산성에 생육밀도를 곱하여 계산하였다.

무기탄소 고정량 추정

잘피 잎 조직에 의한 무기탄소 흡수량은 잎 생산성과 잎 조직 내 탄소 함량을 이용하여 추정하였다. 여기서 무기탄소 흡수량은 새로 생산되는 잘피 잎 조직으로 동화되는 탄소의 양을 말한다. 잎 조직 내 탄소 함량은 Lee et al. (2005)에 제시된 자료를 이용하였으며, 그 값은 평균 34%이었다. 잘피 잎에 의한 탄소 흡수량은 다음과 같은 식에 의해서 계산되었다.

$$\text{탄소고정량 (carbon incorporation)} = \text{잎 생산성 (leaf productivity)} \times \text{잎 조직 내 탄소 함량 (leaf tissue C content)}$$

통계 분석

모든 자료는 평균 (mean) ± 1 표준오차 (SE)로 나타내었다. 통계 분석 전 모든 자료의 정규성 (normality)과 등분산성

Table 1. Mean values and ranges of environmental parameters and biological characteristics of *Zostera marina* in Jindong Bay and Gamak Bay on the southern coast of Korea

	Jindong Bay	Gamak Bay
Underwater irradiance (mol photons m ⁻² day ⁻¹)	15.6 (0.6-33.0)	6.4 (0.1-32.9)
Temperature (°C)	17.2 (4.8-28.9)	16.4 (4.7-28.1)
Salinity	30.8 (29.4-33.0)	31.3 (29.4-32.5)
Water column (M)		
NH ₄ ⁺	5.7 (0.8 - 28.4)	2.7 (1.0 - 6.3)
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻	3.1 (0.5 - 15.8)	5.5 (1.9 - 14.8)
PO ₄ ³⁻	1.2 (0.5 - 1.6)	1.0 (0.5 - 1.3)
Sediment pore water (M)		
NH ₄ ⁺	146.6 (66.2 - 275.9)	309.5 (88.6 - 1146.1)
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻	1.8 (0.1 - 10.1)	-
Shoot morphology		
Shoot height (cm)	104.2 (63.8-156.7)	117.5 (86.3-155.3)
Sheath length (cm)	21.1 (14.0-29.3)	25.2 (18.3-33.4)
Leaf blade width (mm)	10.6 (8.2-12.5)	12.4 (11.2-14.5)
Eelgrass shoot density (shoots m ⁻²)		
Total shoot	157 (43-422)	131 (63-278)
Vegetative shoot	154 (43-422)	124 (63-278)
Reproductive shoot	3 (0-18)	7 (0-35)
Biomass (g dry weight m ⁻²)		
Total	98.4 (32.1-250.2)	144.9 (72.8-232.3)
Above-ground	75.3 (20.1-195.9)	113.6 (45.5-211.4)
Below-ground	23.1 (12.0-54.4)	31.3 (18.6-53.6)
Production		
Leaf productivity (mg dry weight shoot ⁻¹ day ⁻¹)	14.6 (4.4-25.3)	22.1 (15.4-36.0)
Areal leaf productivity (g dry weight m ⁻² day ⁻¹)	1.3 (0.4-2.5)	2.4 (1.4-3.8)
Leaf C incorporation		
Daily C incorporation (g C m ⁻² day ⁻¹)	0.44 (0.14-0.85)	0.79 (0.47-1.19)
Monthly C incorporation (g C m ⁻² month ⁻¹)	13.6 (4.5-26.2)	24.6 (14.5-36.8)

(homogeneity of variance)을 검정하였다. 외부형태학적 특징, 생육 밀도, 생체량, 생산성과 환경요인의 조사장소 및 조사시기별 유의한 차이는 two-way ANOVA를 이용하여 분석하였다. 분석 값이 유의할 경우, Turkey HSD 검정법을 이용하여 각 자료의 유의성을 검정하였다. 모든 분석은 SPSS(version 12.0) 프로그램을 이용하였다.

결 과

물리화학적 환경요인

두 지역의 일일 평균 수중광량은 뚜렷한 계절적 양상을 보이지 않았으나, 지역적으로 유의한 차이를 나타내었다(Fig. 2A). 진동만 지역의 평균 수중광량은 15.6 mol photons m⁻² d⁻¹이었으나, 가막만 지역의 평균 수중광량은 6.4 mol photons m⁻² d⁻¹로 매우 낮았다(Table 1). 두 지역의 수온은 봄부터 증가하여 가을에 감소하는 뚜렷한 온대 지역의 특징을 나타내었다(Fig. 2B). 진동만 지역의 수온은 4.8-28.9°C로 관찰되었으며, 가막만의 수온은 4.7-28.1°C로 관찰되었다.

염도는 연중 거의 일정하였으며, 진동만과 가막만 지역의 평균 염도는 각각 30.8 psu과 31.3 psu로 조사되었다(Fig. 2C).

진동만 지역의 해수 내 NH₄⁺ 농도는 0.8-28.4 μM이었으며, 가막만 지역은 1.0-6.3 μM이었다(Table 1). 평균 NO₃⁻ + NO₂⁻ 농도는 가막만 지역이 진동만 지역보다 높았으며, 평균 PO₄³⁻ 농도는 두 지역에서 약 1.0 μM이었다(Table 1). 퇴적물 공극수의 NH₄⁺ 농도는 가막만 지역이 진동만 지역보다 유의하게 높았다(p < 0.001). 가막만 지역은 평균 309.5 μM이었으며, 진동만 지역은 146.6 μM이었다(Table 1).

외부형태학적 특징

잘피의 전체 길이는 두 지역에서 뚜렷한 계절적 변동을 나타내었다(Fig. 3A). 두 지역에서 잘피의 전체 길이는 2007년 10월에 최저값을 보였으며, 최고값은 진동만 지역의 경우 2008년 6월에, 가막만 지역은 2008년 4월에 나타났다. 엽초 길이의 계절적인 변동 양상은 전체 길이의 변동 양상과 유사하였으며, 평균 엽초 길이는 가막만 지역이 진동만 지역보다 유의하게 더 길었다(p < 0.001, Fig. 3B). 잎의 너비도 계절적

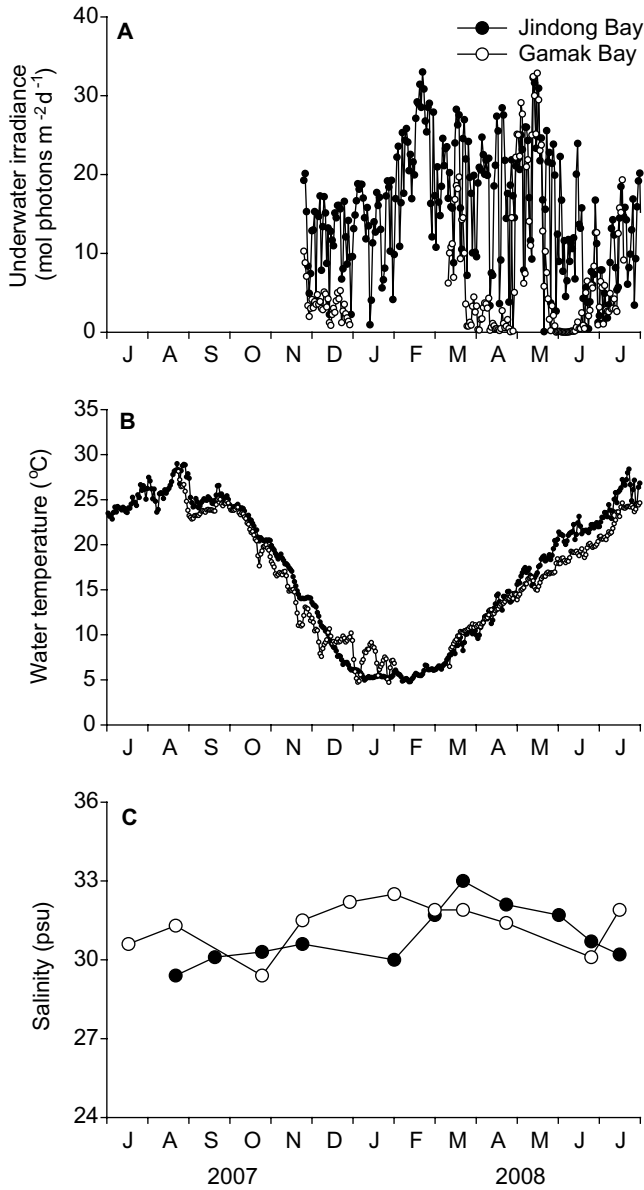


Fig. 2. Seasonal changes in underwater irradiance (A), water temperature (B), and salinity (C) in Jindong Bay and Gamak Bay.

인 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 3C). 평균 잎의 너비는 가막만 지역이 12.4 mm, 진동만 지역이 10.6 mm로 가막만 지역이 진동만 지역보다 유의하게 더 넓게 나타났다($p < 0.001$).

생육밀도 및 생체량

진동만과 가막만 지역에서 잘피의 생육밀도는 겨울과 봄 동안 증가하고, 여름과 가을 동안 감소하는 뚜렷한 계절적인 변동을 나타냈으며, 생육밀도의 변동 폭은 진동만 지역이 가막만 지역보다 더 큰 것으로 관찰되었다(Fig. 4A). 진동만 지역의 생육밀도는 43–423 shoots m^{-2} 인데 반해, 가막만 지역의 생육밀도는 63–278 shoots m^{-2} 로 나타났다. 영양지

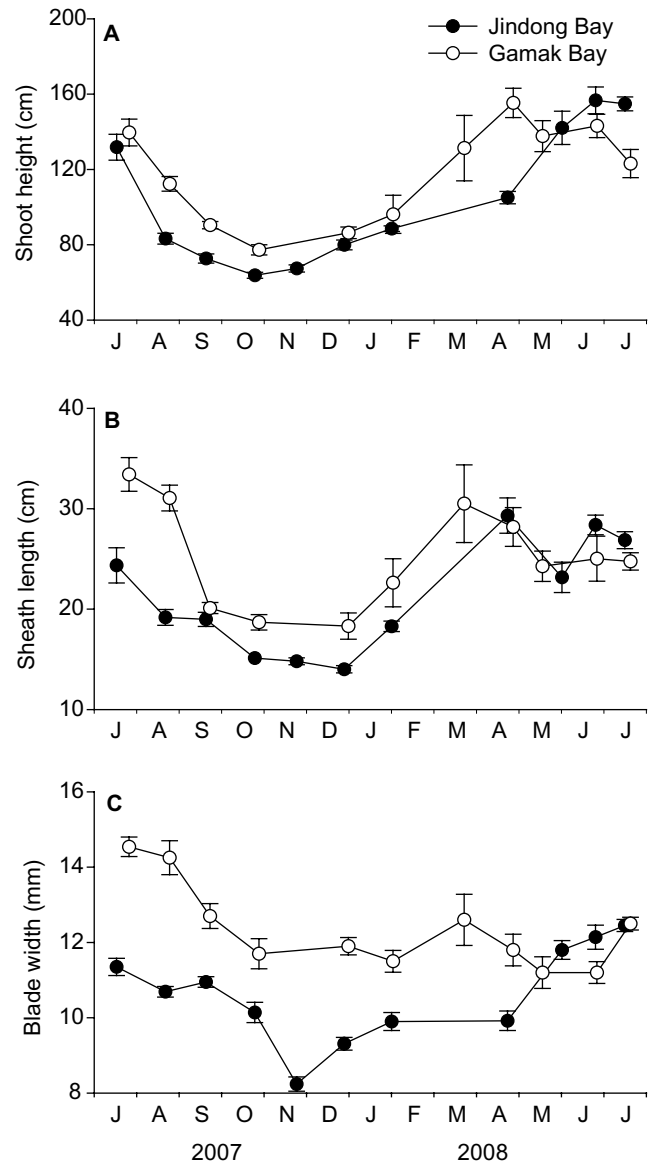


Fig. 3. *Zostera marina*. Seasonal variations in shoot height (A), sheath length (B), and leaf blade width (C) from July 2007 to July 2008 in Jindong Bay and Gamak Bay. Data represent means \pm SE ($n = 10-15$).

(vegetative shoot)는 전체 생육밀도와 유사한 계절경향을 나타냈으며, 화지(reproductive shoot)는 2월부터 7월까지만 관찰되었다(Figs 4B and 4C)

생체량도 계절 변동을 나타내었다(Fig. 5). 진동만 지역의 총 생체량은 2007년 7월에 250.2 g dry weight m^{-2} 로 가장 높았고, 2007년 10월에 32.1 g dry weight m^{-2} 로 가장 낮았다. 가막만 지역은 2006년 5월에 최고값(232.3 g dry weight m^{-2})을, 2007년 12월에 최저값(72.8 g dry weight m^{-2})을 나타내었다. 진동만과 가막만 지역의 평균 지상부 생체량은 각각 75.3 g dry weight m^{-2} 와 113.6 g dry weight m^{-2} 이었으며, 가막만 지역이 진동만 지역보다 유의하게 더 높은 수치를 나타내었다($p < 0.001$). 지하부 생체량은 연중 매우 일정한 수

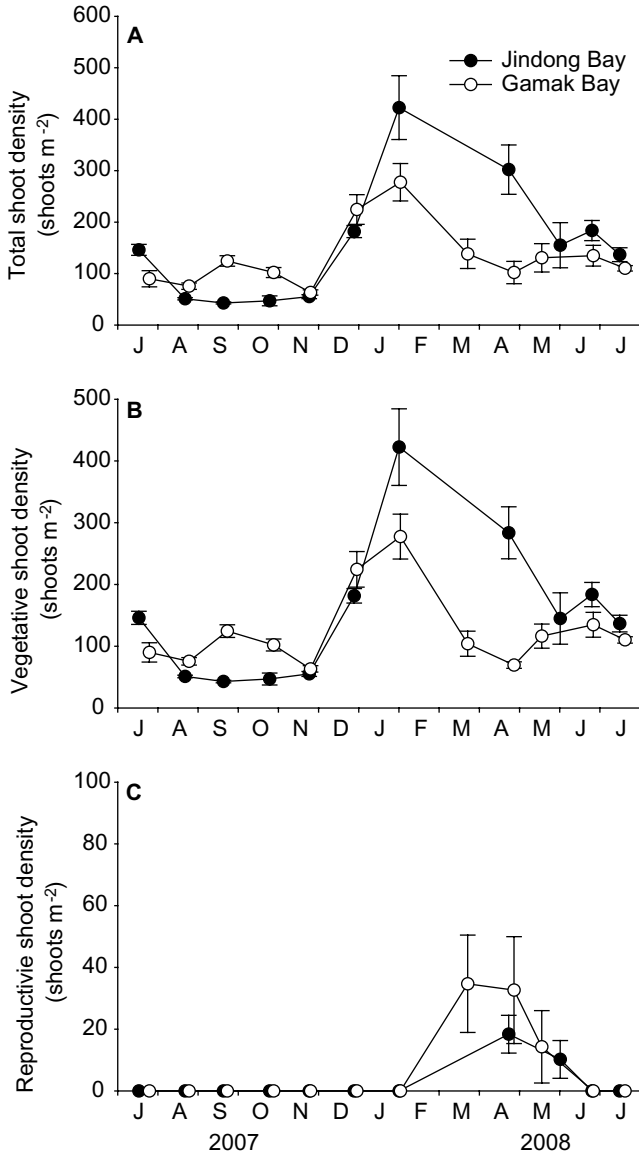


Fig. 4. *Zostera marina*. Seasonal variations in total shoot density (A), vegetative shoot density (B), and reproductive shoot density (C) in Jindong Bay and Gamak Bay. Data represent means \pm SE (n = 4).

치를 나타내었으며 (Fig. 5C), 진동만과 가막만 지역의 평균 값은 각각 23.1과 31.3 g dry weight m⁻²이었다.

잘피 잎의 생산성

잘피 잎의 개체당 생산성은 진동만 지역에서 뚜렷한 계절적 변동을 보였으나, 가막만 지역에서는 계절적 변동을 나타내지 않았다 (Fig. 6A). 진동만 지역에서 지상부의 개체당 생산성은 봄부터 증가하여 여름에 최고값 (2007년 7월: 25.3 mg dry weight shoot⁻¹ d⁻¹; 2008년 7월: 20.7 mg dry weight shoot⁻¹ d⁻¹)에 이르렀으며, 늦여름부터 감소하여 겨울에 최저값 (2008년 2월: 4.4 mg dry weight shoot⁻¹ d⁻¹)을 나타냈

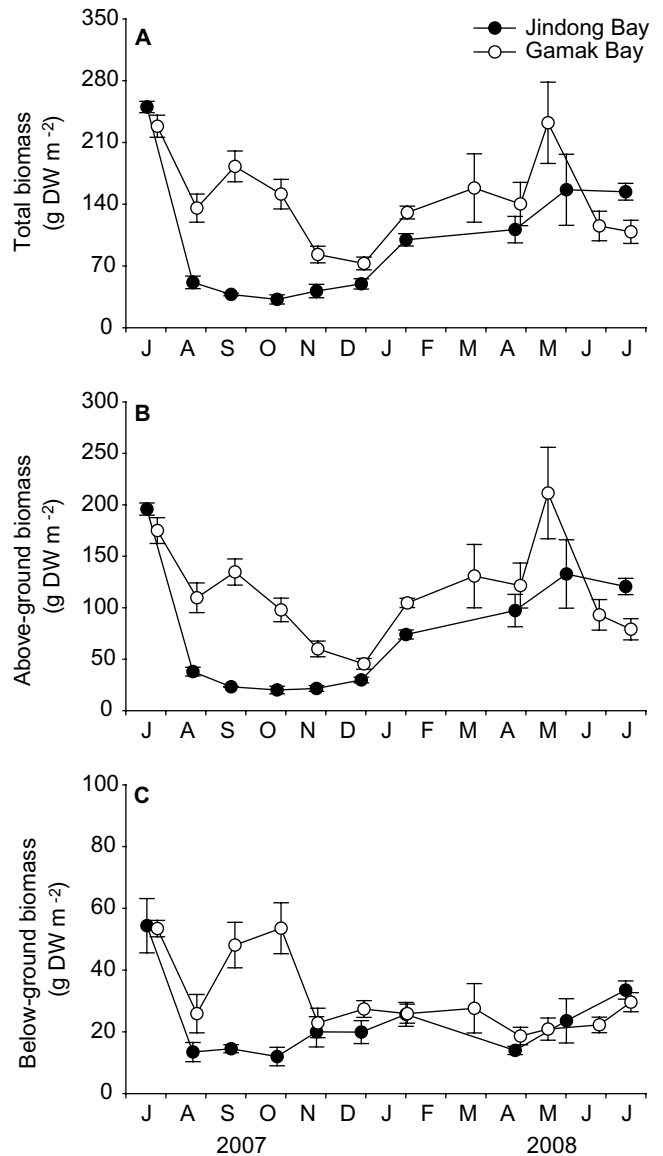


Fig. 5. *Zostera marina*. Seasonal variations in total biomass (A), above-ground biomass (B), and below-ground biomass (C) in Jindong Bay and Gamak Bay. Data represent means \pm SE (n = 4).

다. 가막만 지역에서 지상부의 개체당 생산성은 15.4-36.0 mg dry weight shoot⁻¹ d⁻¹를 나타내었다.

단위면적당 생산성은 개체 당 생산성과 달리 두 지역 모두 뚜렷한 계절적 변동을 나타내었다 (Fig. 6B). 진동만 지역의 단위면적당 생산성은 2008년 2월에 최소값 (0.4 g dry weight m⁻² d⁻¹)을, 2008년 7월에 최대값 (2.5 g dry weight m⁻² d⁻¹)을 보였다. 가막만 지역의 단위면적당 생산성은 2007년 12월 (1.4 g dry weight m⁻² d⁻¹)에 가장 낮았으며, 2008년 4월 (3.8 g dry weight m⁻² d⁻¹)에 가장 높았다. 연구기간동안 진동만과 가막만 지역의 연간 지상부 생산성은 각각 480 g dry weight m⁻² y⁻¹과 867 g dry weight m⁻² y⁻¹이었다.

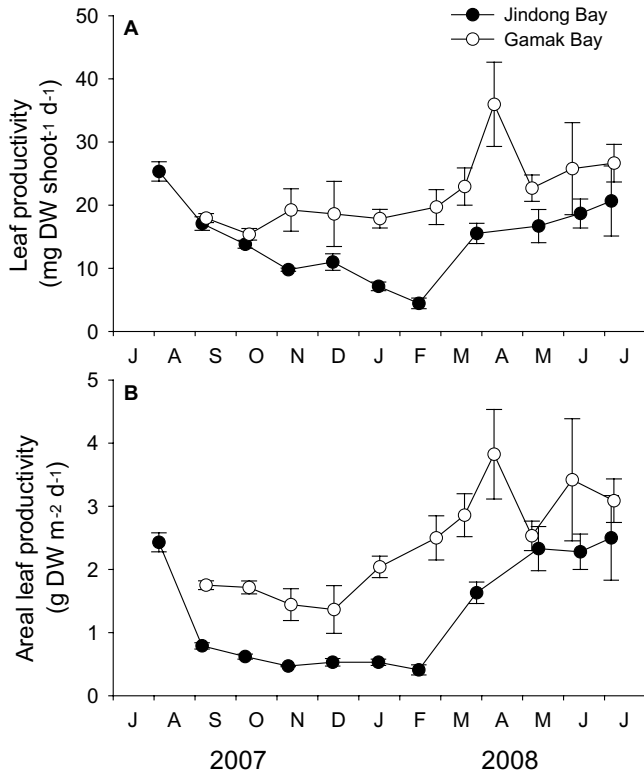


Fig. 6. *Zostera marina*. Seasonal variations in leaf productivity per shoot (A), and areal leaf productivity (B) in Jindong Bay and Gamak Bay. Data represent means \pm SE (n = 10-12).

잘피 잎에 의한 탄소고정량

잘피 잎 조직에 의한 탄소고정량도 뚜렷한 계절변동을 나타내었다(Fig. 7). 진동만 지역에서 잘피 잎 조직에 의한 일일 탄소고정량은 0.14-0.85 g C m⁻² d⁻¹를 나타냈으며, 가막만 지역은 0.47-1.19 g C m⁻² d⁻¹로 나타났었다(Fig. 7A). 월별 탄소고정량은 진동만 지역에서 2008년 7월에 최고값(26.2 g C m⁻² month⁻¹)을, 2008년 2월에 최저값(4.5 g C m⁻² month⁻¹)을 나타내었으며, 가막만 지역에서는 2008년 4월에 최대값(36.8 g C m⁻² month⁻¹)을, 2007년 11월에 최소값(14.5 g C m⁻² month⁻¹)을 나타내었다(Figs 7B and 7C). 연구기간 동안 매달 추정된 값을 토대로 계산된 연간 탄소고정량은 진동만 지역이 163 g C m⁻² y⁻¹이었으며, 가막만 지역은 진동만 지역보다 높은 295 g C m⁻² y⁻¹이었다(Table 2). 진동만과 가막만 지역의 조사 장소에서 고정된 총 탄소량은 각각 16.5톤과 87.9톤이었다(Table 2).

고찰

생장 동태

진동만과 가막만 지역에서 잘피의 생장은 뚜렷한 계절적 변이를 나타내었다. 잘피 생장의 계절 변동은 우리나라 연안

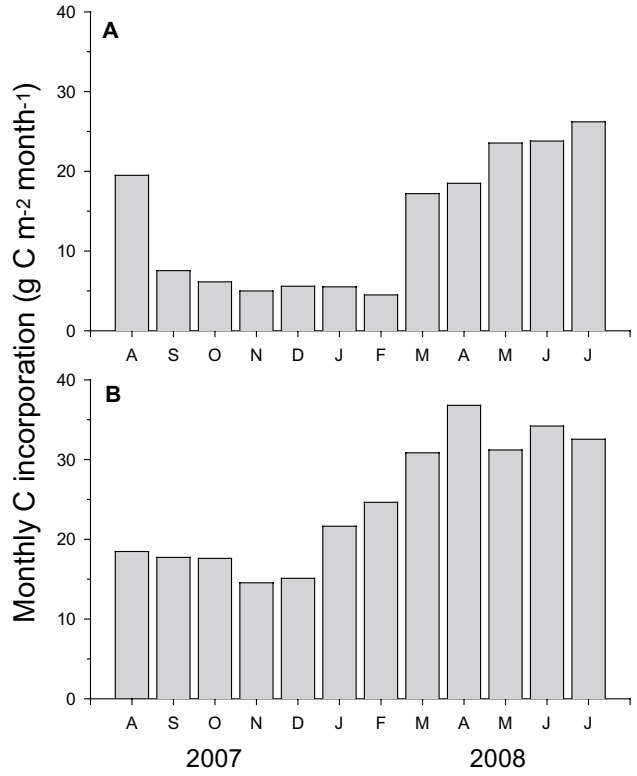


Fig. 7. Monthly estimate of carbon incorporation through the above-ground tissues of *Zostera marina* in Jindong Bay (A) and Gamak Bay (B).

의 다른 지역에서 보고된 양상과 유사하였으며, 이러한 계절 변동은 주로 수온과 수중 광량에 의해 조절되는 것으로 알려져 있다(Kim and Choi 2004; Lee et al. 2005; Kaldy and Lee 2007). 수온은 잘피의 성장과 생산성의 계절 변동을 조절하는 가장 중요한 요인으로 고려되고 있다(Phillips et al. 1983; Lee and Dunton 1996; Lee et al. 2005). 이번 연구 결과, 잘피의 생체량과 생산량은 수온의 영향을 가장 많이 받는 것으로 보였다. 수온이 15-20°C일 때, 잘피의 생체량과 생산성이 가장 높았으며, 수온이 30°C에 도달하는 8월에 생체량과 생산성이 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 수온 변화에 따른 잘피의 광합성과 호흡의 비율 변화와 관련이 있는 것으로 추정된다. 일반적으로 고수온에서는 잘피의 광합성은 거의 증가하지 않으나, 호흡은 급격히 증가하여 생장이 저해된다고 보고되었다(Barber and Behrens 1985). Lee et al.(2007)에 의하면, 온대 지방에 서식하는 잘피 생장의 최적온도는 15-20°C 내외이며, 아열대 및 열대 지방에 서식하는 잘피의 최적온도는 25-31°C 내외이다.

그러나 잘피의 생육밀도는 이전의 연구결과와 다른 양상을 보였다(Kim and Choi 2004; Lee et al. 2005; Kaldy and Lee 2007). 이전 보고에서는 잘피의 생육밀도가 봄과 이른 여름에 가장 높았으나, 이번 결과에서는 두 지역 모두 수온이 가장 낮은 1-2월에 가장 높은 생육밀도를 보였다(Fig. 4).

Table 2. *Zostera marina*. Distributional area, and annual and total carbon incorporation in Jindong Bay and Gamak Bay on the southern coast of Korea

	Jindong Bay	Gamak Bay
Eelgrass coverage (km ²)	0.1	0.3
Annual carbon incorporation (g C m ⁻² year ⁻¹)	163	295
Total carbon incorporation (kg C year ⁻¹)	16,500	87,900

이러한 결과는 잘피의 개체군 구조와 관련이 있는 것으로 추정된다. 진동만 지역에서 1월에 나타난 생육밀도의 급격한 증가는 유식물(seedling)의 가입에 의한 것으로 보인다. 이 지역에서 유식물의 가입은 11월부터 관찰되었으며, 2월 가장 높은 가입률을 보였다. 그러나 이 기간 동안, 가막만 지역에서는 유식물의 가입대신 측지(lateral shoot)가 급속히 생성되어 생육밀도가 급격히 증가하였다. 그 후, 여름동안 생식지(reproductive shoot)의 탈락과 고수온으로 인한 사망으로 인해 생육밀도는 급격히 감소하는 경향을 보여주었다.

연구기간 동안 일일 수중 광량은 뚜렷한 계절경향을 나타내지 않았으나 변이가 매우 심하였으며, 진동만 지역의 수중 광량이 가막만 지역보다 높았다. 이러한 결과는 두 연구 지역의 퇴적물 조성과 조류세기의 차이에 의한 것으로 추정된다. 수중 광량은 식물플랑크톤과 부유물질의 양에 의해 영향을 받는다(Dennison *et al.* 1993). 부유물질은 유속 및 선박 활동 등의 증가로 인해 증가할 수 있는데, 이 때 퇴적물이 니질인 지역이 사질인 지역보다 상대적으로 영향을 더 받는다(Van Duin *et al.* 2001) 진동만 내 조사장소의 퇴적물은 주로 모래와 실트로 구성되어 있으나(Park and Lee 2007), 가막만 지역은 주로 실트와 점토로 구성되어 있다(Lee *et al.* 1995). 또한 가막만 지역의 조사장소는 굴양식장이 위치하고 있어 어민의 출입과 어업 활동이 매우 활발했으며, 보다 서쪽에 위치한 가막만 지역이 조류의 세기가 더 강했다. 따라서 부유물에 의한 탁도가 가막만 지역에서 더 높았으며 결과적으로 수중광량이 가막만 지역에서 낮게 나타난 것으로 추정된다.

이번 연구에서 가막만 지역의 일일 수중 광량은 평균 6.4 mol photons m⁻² d⁻¹였으며, 특히 2008년 6월 중순에는 일일 수중 광량이 평균 0.1 mol photons m⁻² d⁻¹로 매우 낮았다. 그러나 수중 광량이 매우 낮은 기간 동안에도 잘피의 생육밀도, 생체량과 생산량 등은 비교적 잘 유지되었다. 두 지역에서 연구기간동안 잘피에 도달된 평균 수중 광량은 150 μmol photons m⁻² s⁻¹이었다. 일반적으로 거머리말의 포화광은 100-200 μmol photons m⁻² s⁻¹이며(Dennison 1987), 따라서 두 조사장소 내의 잘피들은 대부분의 시간동안 포화광량 이상의 빛을 받았다고 볼 수 있다. 가막만 지역의 H_{sat}(포화광

량 이상의 광량이 비추는 시간)은 약 5.1시간이었으나, 여름철의 장마기간을 제외하면 평균 6시간 이상이었다. 또한, 장마기간을 제외하면 6시간 이내의 H_{sat}이 이틀이상 지속되지 않았다. H_{sat}이 6시간 이내라도 잘피의 생존과 성장에 지장이 없는 것으로 보고되었으며(Dennison and Alberte 1985), 단기간 동안 H_{sat}이 4시간 이내로 감소하여, 잘피 조직 내 탄소 농도에 심각한 불균형이 초래된 경우에도 장기적인 잘피의 생존에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보고되었다(Fourqurean and Zieman 1991; Herzka and Dunton 1998). 따라서 두 조사지역 모두에서 수중 광량이 잘피의 성장과 생존의 제한 요인으로 작용하지 않은 것으로 추정되며, 두지역의 생산성 및 생체량의 차이가 수중광량의 차이에 의한 것이 아니라고 볼 수 있다.

일반적으로 지역 간의 생산성 차이는 퇴적물 공극수 내 영양염류 농도 차이에 의해 나타난다(Lee *et al.* 2007). 진동만 지역의 수중 광량은 가막만 지역보다 높음에도 불구하고, 생체량 및 생산성은 가막만 지역보다 낮았는데, 이러한 현상은 퇴적물 공극수 내 NH₄⁺ 농도와 관련이 있는 것으로 사료된다. 진동만과 가막만 지역의 퇴적물 공극수 내 NH₄⁺ 농도는 평균 146.6 μM과 309.5 μM로 가막만 지역이 두 배 이상 높았다. 퇴적물 공극수 내 영양염류의 농도가 높은 지역에서 높은 잘피 생산성 및 생체량을 보인다는 것은 여러 지역에서 보고되었다(Short 1983, 1987; Lee and Dunton 2000). 따라서 가막만 지역의 높은 생산성은 높은 퇴적물 공극수 내 NH₄⁺ 농도에 의한 것으로 추정된다.

잘피 잎에 의한 탄소고정량

잘피는 높은 생산성과 생체량으로 인하여 많은 수산 어패류의 생산성과 밀접하게 관련되어 있으며, 다양한 해양생물들에게 서식처, 산란장 및 먹이원을 제공한다(Holmquist *et al.* 1989; Montague and Ley 1993; Kwak and Klumpp 2004). 지금까지 보고된 우리나라 연안의 잘피에 의한 탄소 고정량은 약 113-175 g C m⁻² y⁻¹이었으며(Lee *et al.* 2005; Kaldy and Lee 2007), 이는 일본의 Funakoshi Bay(190 g C m⁻² y⁻¹)와 미국의 Yaquina Bay(200 g C m⁻² y⁻¹)에서 보고된 탄소고정량과 유사한 수치이다(Nakaoka and Kouchi 2003; Kaldy 2006). 이번 연구 결과, 진동만과 가막만 지역에서 잘피의 연간 탄소고정량은 각각 163 g C m⁻² y⁻¹와 295 g C m⁻² y⁻¹이었으며, 이 값은 건강하게 유지되고 있는 다른 지역의 잘피 서식지와 유사하다(Nakaoka *et al.* 2003; Lee *et al.* 2005; Kaldy 2006).

잘피의 단위 면적당 탄소고정량은 산림의 단위면적당 탄소고정량보다 매우 높았다(Table 3). 국제적으로 온실가스 흡수원으로서 인정받는 산림은 단위면적당 연간 164 g의 탄소를 고정하는 것으로 평가되었다(Kim *et al.* 2004). 본 연구

Table 3. Estimations of inorganic carbon incorporation through seagrasses and terrestrial plants in Korea

	Total distributional area (km ²)	Carbon incorporation per unit area (g C m ⁻² y ⁻¹)	Total carbon incorporation (ton C y ⁻¹)	Reference
Seagrass	55 - 70	230	12,650 - 16,100	This study
Terrestrial forest	62,620	164	10,281,000	Kim et al. (2004)

결과 잘피에 의한 탄소흡수능은 산림에 비해 약 1.4배 높았으며 (Table 3), 이는 잘피가 우리나라 연안생태계에서 매우 많은 양의 이산화탄소를 흡수하는 것을 의미한다.

그러나 잘피는 해조류와 육상식물에 비해 서식 면적이 제한되어 있으며, 따라서 총 탄소고정량은 이들에 비해 낮은 것으로 평가된다 (Table 3). 해양에 서식하는 해조류는 대부분 경성저질에 부착하며 많은 양의 탄소를 흡수한다. 그러나 잘피는 대부분 연성저질에 서식하며 연안생태계에서 잘피의 기능을 대체할 수 있는 일차생산자가 존재하지 않는다. 따라서 잘피는 해조류와 경쟁하지 않고 공존할 수 있으며, 연안 및 하구 생태계에서 다양한 탄소흡수원 확보를 위해 이들 잘피서식지의 보존은 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 잘피서식지는 연안 지역의 개발로 인해 급속하게 줄어들고 있으며, 우리 연안의 잘피서식지는 1970년대 이후 약 70% 이상이 감소하였다고 보고되었다 (Lee and Lee 2003). 따라서 잘피서식지가 이산화탄소 흡수원으로서 안정적인 기능을 수행하기 위해서는 잘피 서식지의 지속적인 관리 및 복원이 필요하다. 본 연구는 잘피서식지가 이산화탄소 흡수원으로서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다는 것을 보여주었으며, 이러한 연구결과는 이산화탄소 저감 사업에 중요한 기초 자료를 제공할 것이다.

사 사

본 연구는 국토해양부 '해조류를 이용한 온실가스 저감기술 개발' 연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Barber B.J. and Behrens P.J. 1985. Effects of elevated temperature on seasonal *in situ* leaf productivity of *Thalassia testudinum* Banks ex König and *Syrigodium filiforme* Kützinger. *Aquat. Bot.* **22**: 61-69.
- Blackburn T.H., Nedwell D.B. and Wiebe W.J. 1994. Active Mineral cycling in a Jamaican seagrass sediment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **110**: 233-239.
- Cebrian J. and Duarte C.M. 2001. Detrital stocks and dynamics of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delille in the Spanish Mediterranean. *Aquat. Bot.* **70**: 295-309.
- Charpy L. and Charpy-Roubaud C.J. 1990. A model of light primary production relationship in an atoll lagoon (Tikehau, Tuamotu Archipelago, French Polynesia). *UK, J. Mar. Biol. Assoc.* **70**: 357-369.
- Dennison W.C. 1987. Effects of light on seagrass photosynthesis, growth and depth distribution. *Aquat. Bot.* **27**: 15-26.
- Dennison W.C. and Alberte R.S. 1985. Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **25**: 51-61.
- Dennison W.C., Orth R.J., Moore K.A., Stevenson J.C., Carter V., Kollar S., Bergstrom P.W. and Batiuk R.A. 1993. Assessing water quality with submerged aquatic vegetation. *BioScience* **43**: 86-94.
- Duarte C.M. and Cebrian J. 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnol. Oceanogr.* **41**: 1758-1766.
- Fourqurean J.W. and Zieman J.C. 1991. Photosynthesis, respiration and whole plant carbon budget of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **69**: 161-170
- Green E.P. and Short F.T. 2003. *World atlas of seagrasses*. Prepared by the UNEP World Conservation Monitoring Centre. University of California Press, Berkeley, 298 pp.
- Hemminga M.A. and Duarte C.M. 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, 298 pp.
- Hemminga M.A., Harrison P.G. and Vanlent F. 1991. The balance of nutrient losses and gains in seagrass meadows. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **71**: 85-96.
- Herzka S.Z. and Dunton K.H. 1998. Light and carbon balance in the seagrass *Thalassia testudinum*: evaluation of current production models. *Mar. Biol.* **132**: 711-721.
- Holmquist J.G., Powell G.V.N. and Sogard S.M. 1989. Decapod and stomatopod Assemblages on a system of seagrass-covered mud banks in Florida Bay. *Mar. Biol.* **100**: 473-483.
- IPCC 2007. Summary for Policymakers. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (eds), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kaldy J.E. 2006. Carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metal budget: how large is the eelgrass (*Zostera marina* L.) sink in a temperate estuary? *Mar. Poll. Bul.* **52**: 342-353.
- Kaldy J.E. and Lee K.-S. 2007. Factor controlling *Zostera marina* L. growth in the eastern and western Pacific Ocean: Comparisons between Korea and Oregon, USA. *Aquat. Bot.* **87**: 16-126
- Kentula M.E. and McIntire C.D. 1986. The autecology and production dynamics of eelgrass (*Zostera marina*) beds. *Mar. Biol.* **66**: 59-65.

- Kim J.H., Lee K.H., Park C.W., Seo J.W., Son Y.M., Kim K.H., Youn H.J., Park C.R., Lee S.W. and Oh J.S. 2004. Nonmarket valuation of forest resources in Korea. *Korean Institute of Forest Restoration* **10**: 7-15.
- Kim K.Y. and Choi T.S. 2004. Variability in abundance and morphological attributes of *Zostera marina* L. from the southern coast of Korea. *Bot. Mar.* **47**: 287-294.
- Kwak S.N. and Klumpp D.W. 2004. Temporal variation in species composition and abundance of fish and decapods of a tropical seagrass bed in Cockle Bay, North Queensland, Australia. *Aquat. Bot.* **78**: 119-134.
- Larkum A.W.D., Orth R.J. and Duarte C.M. 2006. *Seagrasses: biology, ecology and conservation*, Springer, Netherlands, 691 pp.
- Lee K.-S. and Dunton K.H. 1996. Production and carbon reserve dynamics of the seagrass *Thalassia testudinum* in Corpus Christi Bay, Texas, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **143**: 201-210.
- Lee K.-S. and Dunton K.H. 1999. Inorganic nitrogen acquisition in the seagrass *Thalassia testudinum*: development of a Whole-plant nitrogen budget. *Limnol. Oceanogr.* **44**: 1204-1215.
- Lee K.-S. and Dunton K.H. 2000. Effects of nitrogen enrichment on biomass allocation, growth, and leaf morphology of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **196**: 39-48.
- Lee, K.-S and Lee S.Y. 2003. The seagrass of the republic of Korea. In: Green E.P. and Short F.T. (eds), *World atlas of seagrasses*. Prepared by the UNEP World conservation monitoring centre. University of California Press, Berkeley, pp. 193-198.
- Lee K.-S., Short F.T. and Burdick D.M. 2004. Development of a nutrient pollution indicator using the seagrass, *Zostera marina*, along nutrient gradients in three New England estuaries. *Aquat. Bot.* **78**: 197-216.
- 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, K.-S., Park S.R. and Kim Y.K. 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **350**: 144-175.
- Lee Y.G., Hwang J.Y. and Jung K.K. 1995. Surface sediment characteristics and clay minerals in Kamag Bay. *J. Korean Earth Science Society* **6**: 477-488.
- McRoy C.P. and McMillan C. 1977. Production and ecology and Physiology of seagrasses. In: McRoy C.P. and Helffferich P. (eds), *Seagrass Ecosystems: A Scientific Perspective*. Dekker, New York. pp. 53-88.
- Montague C.L. and Ley J.A. 1993. A possible effect of salinity fluctuation on abundance of benthic vegetation and associated fauna in northeastern Florida Bay. *Estuaries* **16**: 703-717.
- Nakaoka M. and Kouchi N. 2003. Seasonal dynamics of *Zostera caulescens*: relative importance of flowering shoots to net production. *Aquat. Bot.* **77**: 277-293.
- Palacios S.L. and Zimmerman R.C. 2007. Response of eelgrass *Zostera marina* to CO₂ enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **344**: 1-13.
- Park J.I. and Lee K.-S. 2007. Site-specific success of three transplanting methods and the effect of planting time on the establishment of *Zostera marina* transplants. *Mar. Pollut. Bull.* **54**: 1238-1248.
- Parsons T.R., Maita Y. and Lalli C.M. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Pedersen M.F., Paling E.I. and Walker D.I. 1997. Nitrogen uptake and allocation in the seagrass *Amphibolis antarctica*. *Aquat. Bot.* **6**: 105-117.
- Phillips R.C., McMillan C. and Bridges K.W. 1983. Phenology of eelgrass, *Zostera marina* L., along latitudinal gradients on North America. *Aquat. Bot.* **15**: 145-156.
- Short, F.T. 1983. The seagrass, *Zostera marina* L.: Plant morphology and bed structure in relation to sediment ammonium in Izembek Lagoon, Alaska. *Aquat. Bot.* **16**: 149-161.
- Short, F.T. 1987. Effects of sediment nutrients on seagrasses: literature review and mesocosm experiment. *Aquat. Bot.* **27**: 41-57.
- Short F.T. and Short C.A. 1984. The seagrass filter: purification of coastal water. In: Kennedy V.S. (ed.), *The estuary as a filter*. Academic Press. pp. 395-413.
- Short F.T. and Neckles H.A. 1999. The effects of global Climate Change on seagrasses. *Aquat. Bot.* **63**: 169-196.
- Stapel J., Arts T.L., van Duynhoven B.H.M., de Groot J.D., van den Hoogen P.H.W. and Hemminga M.A. 1996. Nutrient uptake by leaves and roots of the seagrass *Thalassia hemprichii* in the Spermonde Archipelago, Indonesia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **134**: 195-206.
- Van Duin E.H.S., Blom G., Los F.J., Maffione R., Zimmerman R., Cerco C.F., Dortch M. and Best E.P.H. 2001. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation resuspension, water quality and autotrophic growth. *Hydrobiologia* **444**: 25-42.
- Zieman J.C. 1974. Methods for the study of growth and production of turtle grass, *Thalassia testudinum* Konig. *Aquaculture* **4**: 139-143.

Received 3 August 2008

Accepted 28 August 2008