

퇴적물 성상 변화에 따른 섬진강 하구 거머리말의 생장 특성

김정배 · 박정임^{1,*} · 이원찬 · 이근섭²

국립수산과학원 어장환경과

¹해양생태기술연구소

²부산대학교 생명과학과

Growth and Population Dynamics of *Zostera marina* Due to Changes in Sediment Composition in the Seomjin Estuary, Korea

JEONG BAE KIM, JUNG-IM PARK^{1,*}, WON-CHAN LEE AND KUN-SEOP LEE²

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹Marine Eco-Technology Institute, Busan 608-830, Korea

²Department of Biological Sciences, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

퇴적물 성상 변화에 따른 섬진강 하구 거머리말의 생장특성을 알아보기 위해 섬진강 하구 조간대 하부에서 수온, 수중 광량, 퇴적물 입도, 유기물, 노출시간 및 영양염 농도의 환경요인과 함께 거머리말의 밀도, 생물량, 형태적 특성과 성장을 2004년과 2009년의 5월부터 12월까지 월별 조사하였다. 수온은 2004년 및 2009년 모두 계절적인 경향을 보였고, 2009년이 유의하게 낮았다. 수중 광량은 2004년 및 2009년 모두 5월 이후 감소하다가 9월 이후 증가 하였고, 2009년이 유의하게 높았다. 노출은 두 해 사이에 유의한 차이는 없었다. 표층 퇴적물의 입도 조성은 2004년 니사질에서 퇴적물 성상 변화에 의하여 2009년에는 사질로 변형되어 퇴적물 성상이 상대적으로 조립하였고, 퇴적물의 유기물 농도도 낮았다. 해수의 NH_4^+ 농도는 2004년이 유의하게 높았고, 퇴적물 공극수의 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 농도는 2009년이 유의하게 높았으나 그 외 영양염 농도는 년도 별 유의한 차이가 발생하지 않았다. 거머리말의 개체 키, 잎 폭 등 형태적인 특성은 2004년 보다 2009년에 유의하게 낮았다. 두 해 모두 거머리말의 키, 잎 길이 및 엽초 길이는 초여름에 증가하고, 가을에 감소하는 계절적인 경향을 보였다. 단위면적당 서식밀도는 연도 별 유의한 차이가 없었으나, 생물량은 2004년 보다 2009년에 유의하게 적었다. 평균 개체당 잎 생산량은 연도 별 유의한 차이는 없었으나, leaf turnover time은 2009년이 2004년 보다 유의하게 짧았다. 즉, 퇴적물의 성상 변화가 2009년의 거머리말은 개체의 크기와 turnover time을 감소시킨 것으로 판단된다. 따라서 거머리말 서식지의 물리적인 퇴적물의 성상 변화는 섬진강 하구 조간대에 서식하는 갈피의 성장을 제한하는 요소가 될 수 있을 것이다.

The growth and population dynamics of eelgrass (*Zostera marina*) due to changes in sediment composition were examined in the lower intertidal zone of the Seomjin Estuary, Korea. We surveyed environmental factors such as water temperature, underwater irradiance, main types and organic content of sediment, tidal exposure, and nutrient concentrations in the water column and sediment pore water, in relation to the shoot density, biomass, morphological characteristics, and growth of *Z. marina* inhabiting lower intertidal zones. The survey was conducted monthly from May to December of 2004 and 2009. The water temperature showed obvious seasonal trends in both study years. Underwater irradiance was significantly higher in 2009 than in 2004. Tidal exposure was not significantly different between 2004 and 2009. The sediment was muddy-sand in 2004 but became sandy and with a significantly lower organic content in 2009. Water column NH_4^+ concentrations were significantly higher in 2004 than in 2009. Sediment pore water $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ concentrations were significantly higher in 2009 than in 2004. Other nutrient concentrations did not differ significantly between 2004 and 2009. Morphological characteristics, including eelgrass length and leaf width were significantly lower in 2009 than in 2004. Eelgrass shoot height, leaf length, and sheath length showed typical seasonal patterns, increasing in early summer and

decreasing in autumn, in both years. Vegetative shoot density was not significantly different between 2004 and 2009, while the biomass of individual plant parts and the total biomass were significantly lower in 2009. Eelgrass leaf productivity did not differ between years, but leaf turnover time was significantly shorter in 2009 than in 2004. Eelgrass downsizing and decreased turnover time in 2009 compared to 2004 indicate more effective adaptations to the stress of long-term changes in sediment composition. Overall, results suggest that changes in sediment composition can be a limiting factor for seagrass growth in the intertidal zone.

Key words: Seomjin Estuary, Erosion, Burial, Eelgrass, Growth

서 론

잘피는 해양현화식물로 전 세계 연안에 약 60 여종이 서식하고 있으며, 연안 및 하구 생태계에서 중요한 역할을 하고 있다(den Hartog, 1970). 잘피는 무기 영양염류 및 오염물질을 흡수 제거하고, 조류와 파랑에너지 감소 및 퇴적물의 안정화로 침식 및 퇴적물의 재부유를 방지하며, 많은 해양동물들에게 서식지를 제공하여 연안생태계의 종 다양성을 보존하는 역할을 한다(National Academy of Sciences, 1975; Short and McRoy, 1984; Ward *et al.*, 1984; Fonseca and Fisher, 1986). 그러나 매립, 해안공사, 항만건설 등과 같은 직접적인 훼손으로 세계 여러 지역에서 잘피 서식지가 위협받고 있다(Lee and Lee, 2003; MOMAF, 2007). 최근 해양생태계에서 잘피가 지닌 생태적 중요성으로 인해 잘피 서식지의 감소와 소실에 대해 많은 우려가 제기되고 있으며, 서식지의 보존과 복원에 대한 관심이 깊어지고 있다(Addy, 1947; Fonseca *et al.*, 1996; Davis and Short, 1997; Lee Long and Thom, 2001; Fonseca, 2007; Park and Lee, 2007). 잘피 군락지의 현황과 잘피의 생태적 특성을 파악하는 것은 연안의 잘피 서식지 관리에 필수적인 절차가 될 수 있을 것이다.

우리나라에는 9종의 잘피가 출현하고 있으며, 가장 넓은 서식지를 보유하고 있는 종은 거머리말이다(Lee and Lee, 2003; Kim *et al.*, 2009). 우리나라의 거머리말 군락지는 주로 남해안의 조하대 수심 2-3 m에 넓은 초지를 형성하고 있으며, 투명도가 높은 해역에서는 5 m 이상의 깊은 수심에서도 나타나고, 때로는 조간대에 서식하기도 한다(Lee and Lee, 2003). 거머리말의 성장 동태는 주로 수온의 변화에 따라 조절된다(Lee *et al.*, 2007). 한반도에 자생하는 거머리말의 성장은 봄부터 여름까지 증가하고, 가을과 겨울에는 감소하며, 약 20 °C에서 최적의 성장을 보인다(Lee *et al.*, 2004, 2005). 수온이 상승하면 호흡률이 광합성을 초과하여 성장이 느려지고, 30 °C에서는 잘피의 생존율이 급격히 저하된다(Lee *et al.*, 2007). 수중광량은 거머리말의 생존과 생산성에 영향을 미치며, 거머리말의 원활한 성장을 위해서는 광합성을 위한 충분한 양의 빛이 필요하다(Dennison *et al.*, 1993). 인위적인 요인이나, 적조, 경쟁식물의 급성장 등과 같은 자연적인 요인으로 수중광량이 감소하게 되면 거머리말의 생물량과 생산성은 급감하게 된다(Lee *et al.*, 2007). 일정기간 동안 최소 요구량의 빛이 공급되지 않으면 잘피는 사망에 이른다. 또한 잘피는 높은 생산성을 나타내는 일차생산자로 생존과 성장을 위해 충분한 양의 영양염을 필요로 한다. 잘피가 주로 흡수하는 영양염은 해수와 퇴적물 공극수에 포함된 암모늄염(NH₄⁺), 질산염+아질산염(NO₃⁻+NO₂⁻)과 인산염(PO₄³⁻)을 들 수 있다(Short, 1987; Short *et al.*, 1990; Lee *et al.*, 2007). 따라서 영양염 농도는 잘

피의 성장을 조절하는 요인이 될 수 있다. 거머리말의 생태에 관한 연구는 주로 연안에서 이루어졌고, 하구에 나타나는 거머리말에 대한 자료는 매우 빈약한 실정이다(Park *et al.*, 2011).

섬진강 하구에는 넓은 거머리말 군락지가 존재한다(Kim *et al.*, 2010). 하구는 지속적으로 담수가 유입되어 그 유입량에 따라 수중광량, 염분, 수온과 영양염의 농도가 연안에 비해 역동적으로 나타난다(Day *et al.*, 1989). 강으로부터 유입되는 담수, 영양염과 실트질 부유물은 수중광량을 감소시키고 플랑크톤의 증식과 잘피 잎의 부착 생물량을 증가시켜 잘피 군락에 피해를 입힌다(Day *et al.*, 1989; Koch, 2001; Park *et al.*, 2011). 특히, 섬진강 하구는 우수 기나 댐 방류와 같은 대규모 담수의 유입으로 물의 흐름이 빨라져 퇴적물의 이동이나 흐름이 빨라지게 되어 퇴적물 성상의 변동이 일어나며, 이곳에 서식하는 거머리말 군락지에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 과도하게 유입되는 실트질의 부유물은 유기물 함량이 높아 퇴적물을 혐기성 환경으로 조성하여 잘피의 형태와 성장을 감소시키기도 한다(Marbà and Daurte, 1994). 퇴적과 침식으로 인한 퇴적물 성상의 변동으로 인한 영향은 잘피의 종에 따라 다르게 나타나는데, *Amphibolis griffithii*는 퇴적물의 변동에 내성이 강한 것에 비해 거머리말은 퇴적물의 변동에 민감하여 치명적인 결과가 나타나기도 한다(Mills and Fonseca, 2003). 최근 지구 온난화로 인한 해수면 상승이 보고되고 있으며, 이는 연안의 침식률을 100배 가속화시킨다고 한다(Boer, 2007). 섬진강 하구도 수년 전에 비해 해수면 상승의 증상들이 빈번히 발생하고 있어(Noh *et al.*, 2011) 퇴적물 성상의 변화가 심각해졌을 것으로 추측할 수 있으며, 이 곳에 서식하는 거머리말 군락지에서도 그 영향이 나타날 것으로 보인다. 따라서, 본 연구에서는 2004년과 2009년의 섬진강 하구 조간대 동일 장소에 서식하는 거머리말의 성장 특성을 비교하고자 한다.

재료 및 방법

조사지역

섬진강 하구의 거머리말 서식지는 약 1.83 km²로서 약 50%는 조간대에서 출현하고 있다. 평균 수심은 약 1.5 m이고 조차(mean tidal regime)는 반일주조(semi-diurnal)로 약 3 m이다(Kim *et al.*, 2010, 2013). 조사 장소는 섬진강 하구의 거머리말이 서식하고 있는 지역 중에서 갈사 갯벌의 연장선인 조간대 하부에 위치하고 있다(Fig. 1). 조사시기는 대조기에 수행을 하였으며, 대조기 중에서도 간조시에 조사가 이루어졌다.

거머리말 서식지의 환경 특성

섬진강 하구의 조간대 하부에 위치하는 잘피 서식지의 수온, 수

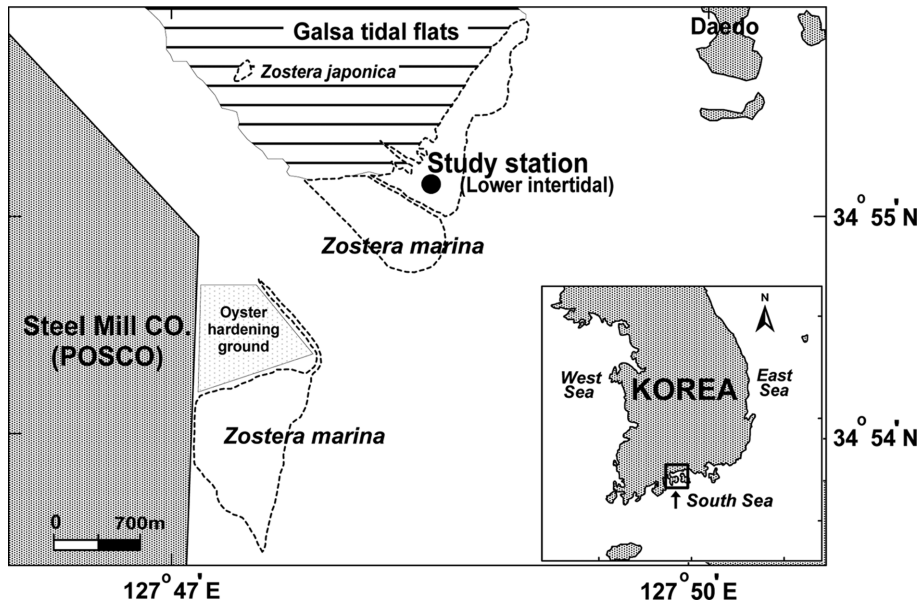


Fig. 1. Location of the study site in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula.

중광량, 노출, 수층과 퇴적물 공극수의 영양염, 퇴적물 입도 및 유기물량 등의 환경특성은 2004년과 2009년에 동일 조사정점에서 5월부터 12월까지 월별로 분석하였다. 수온은 조사장소에 수온계 (StowAway Tidbit® temperature data logger, Onset computer, USA)를 설치하여 매 15분 간격으로 측정하였으며, 측정된 수온은 월 평균으로 나타내었다(Lee *et al.*, 2004, 2005, 2007; Kim *et al.*, 2013). 조사기간 동안 수중광량을 조사하기 위하여 거머리말 잎이 위치하는 수심에 HOBO 조도계(Onset Computer Corp., Bourne, MA, USA)를 설치하여 매 15분 간격으로 측정하였다. HOBO 조도계로 측정된 수치($\text{lumens} \cdot \text{ft}^{-2}$)는 동 시간에 LI-1400 데이터 로그와 LI-193SA 구형광센서(LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA)로 측정된 수치와의 회귀분석을 통하여 유입광량(PFD: $\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)으로 변환하여 월평균으로 나타내었다(Lee *et al.*, 2005, 2007). 노출은 조사 장소에 일정기간 거머리말 잎이 위치하는 수심에 HOBO 수심계(Onset Computer Corp., Bourne, MA, USA)를 정점에 설치하여 매 10분 간격으로 압력을 측정하였으며, 이 값을 수심으로 변환 하였다. HOBO 수심계로 측정된 수치는 국립해양조사원에서 1시간 간격으로 측정하여 제공하는 조위 수치와의 회귀분석을 통하여 조사기간 동안 1시간 간격의 자료를 월간으로 구분하여 노출시간을 계산 하였다.

해수와 퇴적물 공극수의 영양염류 농도를 측정하기 위하여 4-6 개의 샘플을 채취하였고, 퇴적물은 지름 5 cm, 길이 13 cm의 주상 시료 채취기를 이용하여 채취하였다. 퇴적물 공극수의 영양염류 분석을 위한 시료는 퇴적물을 5,000 rpm에서 20분간 원심 분리하여 추출한 다음 0.45 μm 막 여과지로 여과하여 분석할 때까지 -20°C 에서 냉동 보관하였다. 해수 및 퇴적물 공극수의 NH_4^+ , $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 과 PO_4^{3-} 농도는 흡광 광도법으로 흡광도를 측정하여 계산하였다(Parsons *et al.*, 1984).

표층 퇴적물(0-3 cm 깊이)의 입도 조성은 2004년의 경우 5월, 8월 및 12월, 2009년의 경우 5월, 9월 및 12월에 조사되었다. 입도 분

석은 퇴적물 습 시료 약 50 g을 비이커에 넣고 이온교환수를 이용하여 염분을 제거한 다음 10%의 과산화수소(H_2O_2)와 0.1 N 염산(HCl)을 넣어 유기물 및 탄산염(CaCO_3)을 제거하였다. 이후 40(0.0625 mm) 표준체를 이용하여 물체질(wet sieving)을 실시하였으며, 40 보다 큰 조립질 입자는 110°C 에서 24시간 동안 건조한 후 진탕기로 약 20분간 건식체질(dry sieving)을 한 다음 10 간격으로 무게를 구하였다. 40 보다 작은 세립질 입자는 일정시간에 피펫팅으로 미리 무게를 달아놓은 비이커에 옮겨 담은 후 완전히 건조하여 시료무게를 구하였다. 이 무게 값을 그래픽 방법에 따라 자료를 처리하였고, 퇴적물 특성을 나타내는 평균 입도(mean grain size, Mz)는 Folk and Ward(1957)의 계산식을 이용하여 구하였다. 퇴적물 중 유기물 양은 퇴적물 습 시료 약 20 g을 비이커에 담아 건조기에 넣고 110°C 에서 24시간 건조한 후 시료를 곱게 분쇄하여 도가니에 담아 무게를 측정하고, 이후 전기로에 넣어 550°C 에서 2시간 회화시켜 데시케이터 안에서 실온으로 식힌 후 도가니 무게를 측정하여 회화 전후의 무게 차로부터 계산하였다.

거머리말의 형태, 밀도 및 생물량

거머리말의 형태조사는 10개체의 거머리말을 채취하여 잎 수(number of leaves), 잎 폭(leaf width), 엽초 길이(sheath length), 잎 길이(leaf length) 및 개체 키(shoot height) 등을 측정하였다(Lee *et al.*, 2004, 2005; Kim *et al.*, 2010, 2013). 거머리말의 자생밀도는 직경 20 cm 원형 방형구내에 자생하는 개체수를 측정하여 추정하였다(Lee *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2010, 2013). 생물량은 방형구 내 거머리말을 얼음에 채워진 아이스박스 보관하고, 실험실로 가져와 담수로 부착생물 및 퇴적물 등을 제거한 후 지상부와 지하부로 분리하여 60°C 건조기에서 일주일간 건조하였다. 각각의 건조량을 측정하였고, 이를 토대로 단위 면적 당 생물량(g DW m^{-2})을 추정하였다(Lee *et al.*, 2004, 2005; Kim *et al.*, 2010, 2013).

거머리말의 생산성: 조건대 하부 거머리말 서식지의 조사정점

에서 거머리말의 생산성을 측정하기 위하여 조사기간 동안 blade marking technique(Zieman, 1974; Kentula and McIntire, 1986; Lee and Dunton, 2000)을 이용하여 잘피의 생산성을 매달 측정하였다. 실험지역에서 10-15개체에 날카로운 바늘을 이용해 엽초(sheath)에 구멍을 뚫은 다음, 약 4주 후에 채취하였다. 채취한 개체는 새로 자란 부분(new leaf)과 기존 부분(old leaf)으로 구분하여 60 °C 건조기에서 일주일간 건조시킨다(Lee *et al.*, 2004, 2005; Kim *et al.*, 2010, 2013). 각각의 건조량을 측정하였고, 이렇게 측정된 값으로 개체 당 하루 동안 생산된 양(mg dry weight sht⁻¹ d⁻¹)과 서식밀도를 곱하여 단위면적당 하루 동안 생산된 양(g dry weight m⁻² d⁻¹)을 계산하였다.

결 과

거머리말 서식지의 환경 특성

수온은 2004년에 평균 23.1±0.3 °C로서 12월에 최저 12.3 °C에서 8월에 최고 29.5 °C로 기록 되었고, 2009년에는 평균 20.7±0.3 °C로서 12월에 최저 8.1 °C에서 8월에 최고 28.4 °C로 기록되어 2004년 및 2009년 모두 계절적인 경향을 보였고, 2009년이 2004년 보다

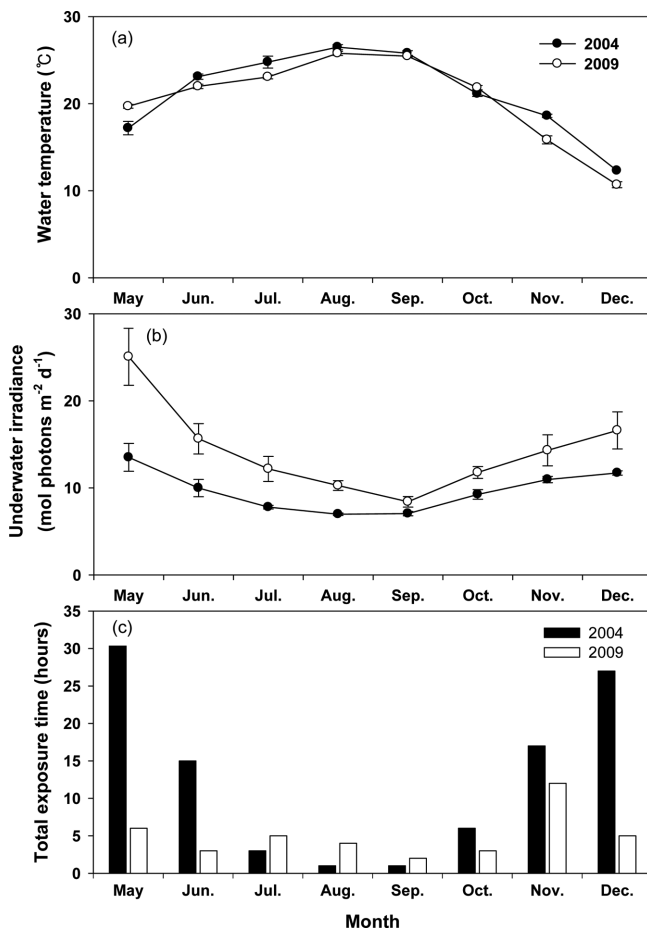


Fig. 2. Seasonal variations in the water temperature (a) and average daily photon flux density (b) measured underwater at the canopy level (c) observed frequency (hours) of low-tidal exposure of the *Zostera marina* bed in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula in 2004 and 2009.

유의하게 낮게 나타났다(*t*-test, $p < 0.001$; Fig. 2a). 수중 광량은 2004년에는 평균 9.7±0.8 mol photons m⁻² day⁻¹로서 9월에 최저 7.0 mol photons m⁻² day⁻¹에서 5월에 최고 13.5 mol photons m⁻² day⁻¹로 기록 되었고, 2009년에는 평균 14.3±1.8 mol photons m⁻² day⁻¹로서 9월에 최저 8.4 mol photons m⁻² day⁻¹에서 5월에 최고 25.1 mol photons m⁻² day⁻¹로 기록되어 2004년 및 2009년 모두 5월 이후 감소하다가 9월 이후 증가 하였고, 2009년이 2004년 보다 유의하게 높은 수중광량을 보였다(*t*-test, $p < 0.05$; Fig. 2b). 노출 시간은 2004년에 평균 12.6±4.2(1.0-31.0) hours month⁻¹이었고, 2009년에는 평균 5.0±1.1(2.0-12.0) hours month⁻¹로 2004년과 2009년에는 유의한 차이는 없었다(*t*-test, $p = 0.116$; Fig. 2c).

표층 퇴적물의 입도분석 결과 2004년에 모래는 평균 87.1%(85.4-88.3%), 실트는 평균 7.0%(6.2-7.9%), 점토는 평균 6.0%(5.5-6.8%)이었고, 2009년에 모래는 평균 95.5%(94.9-96.0%), 실트는 평균 2.9%(2.6-3.1%), 점토는 평균 1.6%(1.4-2.2%)이었다. 따라서, 표층 퇴적물의 입도를 비교해 보면 2004년과 2009년의 동일 연도에서는 계절별 차이는 없었으나, 동일 조사점점 입에도 불구하고 2004년에 니사질에서 2009년에 사질로 나타나 퇴적물 성상의 변형이 있었다(Table 1). 퇴적물의 유기물 함량의 경우 2004년에는 평균 2.4%(1.6-3.1%), 2009년에는 평균 1.4%(1.2-1.8%)로 나타났다(Fig. 3). 퇴적물의 입도와 유기물 함량을 비교해 볼 때 2009년이 2004년 보다 상대적으로 조립하였고, 유기물 함량도 낮은 값을 보였다. 조사기간 동안 조사지역 주변에서 퇴적물의 침식과 퇴적물 변화를 MLTM(2010)의 하구역 관리체제 구축연구에서 표로 나타나 있는 부분을 발체하여 그림으로 재구성하였을 때 섬진강 하구의 갈사리 조간대 하부에서는 2009년 5월 말부터 8월 초순까지 5.9 mm의 침식이 일어났고, 2009년 8월 초순부터 11월 중순 까지 9.3 mm가 침식되었으며, 2009년 11월 중순부터 2010년 1월 초순에는 10.9 mm가 퇴적되어 조사기간 동안 섬진강 하구는 침식과 퇴적이 활발하게 일어나고 있었다(Fig. 4).

수층의 영양염 중 NH₄⁺ 농도의 경우 2004년에는 평균 4.6±0.2 μM로서 8월에 최저 2.4 μM, 9월에 최고 6.9 μM이었고, 2009년에는 평균 3.8±0.3 μM로서 12월에 최저 2.4 μM, 5월에 최고 5.5 μM로 2009년이 2004년 보다 유의하게 낮은 농도 값을 보였다(*t*-test, $p < 0.05$; Fig. 5a). NO₃+NO₂ 농도의 경우 2004년에는 평균 9.4±0.3 μM로서 8월에 최저 3.9 μM, 9월에 최고 27.9 μM이었고, 2009년에는 평균 8.5±0.5 μM로서 6월에 최저 3.2 μM, 5월에 최고 12.1 μM로 2004년과 2009년에는 유의한 차이가 없었다(*t*-test, $p = 0.491$; Fig. 5b). PO₄³⁻ 농도의 경우 2004년에는 평균 0.8±0.0 μM로서 9월에 최저 0.50 μM, 8월에 최고 1.2 μM이었고, 2009년에는 평균 0.7±0.1 μM로서 6월에 최저 0.3 μM, 7월에 최고 1.2 μM로 2004년과 2009년에는 유의한 차이가 없었다(*t*-test, $p = 0.170$; Fig. 5c).

퇴적물 공극수의 영양염 중 NH₄⁺ 농도의 경우 2004년에는 평균 215±3 μM로서 5월에 최저 202 μM, 12월에 최고 235 μM이었고, 2009년에는 평균 191±17 μM로서 11월에 최저 111 μM, 6월에 최고 331 μM로 2004년과 2009년에는 유의한 차이는 없었다(*t*-test, $p = 0.181$; Fig. 5d). NO₃+NO₂ 농도의 경우 2004년에는 평균 5.6±0.6 μM로서 5월에 최저 1.4 μM, 6월에 최고 10.1 μM이었고, 2009년에는 평균 15.8±1.2 μM로서 11월에 최저 9.6 μM, 5월에 최고 22.5 μM로 2009년이 2004년 보다 유의하게 높은 농도 값을

Table 1. Mean values and ranges of physical and chemical parameters, shoot density, biomass, morphology, and leaf productivity of eelgrass at the study site in the intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December of 2004 and 2009 respectively

	2004	2009
Temperature (°C)	23.1 (12.3-29.5)	20.7 (8.1-28.4)
Underwater irradiance (mol photons m ⁻² day ⁻¹)	9.7 (7.0-13.5)	14.3 (8.4-25.1)
Exposure (hours month ⁻¹)	12.6 (1.0-31.0)	5.0 (2.0-12.0)
Water column		
NH ₄ ⁺ (μM)	4.6 (2.4-6.9)	3.8 (2.4-5.5)
NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ (μM)	9.4 (3.9-27.9)	8.5 (3.2-12.1)
PO ₄ ³⁻ (μM)	0.8 (0.5-1.2)	0.7 (0.3-1.2)
Sediment pore water		
NH ₄ ⁺ (μM)	215 (202-235)	191 (111-331)
NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ (μM)	5.6 (1.4-10.1)	15.8 (9.6-22.5)
PO ₄ ³⁻ (μM)	1.5 (1.0-2.8)	2.5 (0.6-7.7)
Sediment type (%)		
Sand	87.1 (85.4-88.3)	95.5 (94.9-96.0)
Silt	7.0 (6.2-7.9)	2.9 (2.6-3.1)
Clay	6.0 (5.5-6.8)	1.6 (1.4-2.2)
Organic content (%)	2.4 (1.6-3.1)	1.4 (1.2-1.8)
Shoot density (shoots m ⁻²)		
Vegetative shoot density	203 (135-374)	202 (127-302)
Reproductive shoot density	99.5 (95.5-104)	39.8
Biomass		
Leaf biomass (g DW m ⁻²)	271 (121-488)	62.1 (19.8-119.6)
Below-ground biomass (g DW m ⁻²)	66.2 (44.2-89.6)	18.7 (9.0-24.1)
Total biomass (g DW m ⁻²)	337 (179-578)	80.8 (28.8-143.4)
Ab/be ratio per biomass	4.0(1.6-5.7)	3.3(1.7-6.0)
Shoot morphology		
Shoot height (cm)	118 (73.0-179.8)	87.2 (57.2-128.3)
Leaf length (cm)	90.3 (54.9-139.1)	67.8 (44.9-100.2)
Sheath length (cm)	27.2 (15.0-41.3)	19.4 (9.9-28.2)
Blade width (mm)	10.3 (9.7-11.1)	8.7 (7.0-10.2)
Number of leaves per shoot	5.1 (4.5-5.8)	4.6 (3.9-6.0)
Ab/be ratio per shoot	5.0 (3.9-6.7)	4.5 (3.8-5.3)
Production		
Leaf productivity (mg DW shoot ⁻¹ day ⁻¹)	28.9 (13.5-44.9)	22.3 (10.3-47.5)
Areal leaf productivity (g DW m ⁻² day ⁻¹)	4.7 (1.9-10.0)	5.0 (1.4-11.9)
Relative growth rate (g g ⁻¹ day ⁻¹)	0.022 (0.016-0.024)	0.026 (0.022-0.029)
Leaf turnover time (days)	47.6 (42.3-62.9)	38.7 (34.8-46.2)

보였다(*t*-test, $p < 0.001$; Fig. 5e). PO₄³⁻ 농도의 경우 2004년에는 평균 1.5±0.1 μM로서 8월에 1.0 μM 최저, 5월에 최고 2.8 μM이었고, 2009년에는 평균 2.5±0.6 μM로서 7월에 0.6 μM 최저, 11월에 최고 7.7 μM로 2004년과 2009년에는 유의한 차이는 없었다(*t*-test, $p = 0.157$; Fig. 5f).

거머리말의 형태, 밀도 및 생물량

거머리말의 형태적인 특성 중 개체 키는 2004년 평균 118±5 cm로서 10월에 최저 73.0 cm, 6월에 최고 180 cm이었고, 2009년 평균 87.2±3.4 cm로서 12월에 최저 57.2 cm, 6월에 최고 128 cm로 봄에는 개체 키가 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 계절 경향을 보였으며, 2009년이 2004년 보다 유의하게 개체 키가 작았

다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 6a). 잎 길이는 2004년 평균 90.3±3.9 cm로서 10월에 최저 54.9 cm, 6월에 최고 139 cm이었고, 2009년 평균 67.8±2.6 cm로서 10월에 최저 44.9 cm, 6월에 최고 100 cm로 봄에는 잎 길이가 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 계절 경향을 보였으며, 2009년이 2004년 보다 유의하게 잎 길이가 작았다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 6b). 엽초 길이의 경우 2004년에는 평균 27.2±1.2 cm로서 12월에 최저 15.0 cm, 7월에 최고 41.3 cm이었고, 2009년에는 평균 19.4±0.8 cm로서 12월에 최저 9.9 cm, 6월에 최고 28.2 cm로 봄에는 엽초 길이가 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 계절 경향을 보였으며, 2009년이 2004년 보다 유의하게 엽초 길이가 작았다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 6c). 잎 폭의 경우 2004년에는 평균 10.3±0.1 mm로서 11월과 12월에 최저

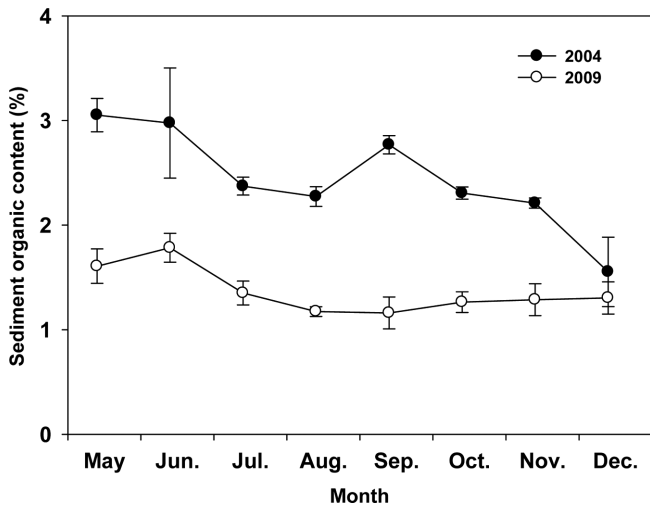


Fig. 3. Seasonal changes in sediment organic content of *Zostera marina* bed in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December in 2004 (black bars) and 2009 (white bars). Values represent means \pm SE (n=4-6).

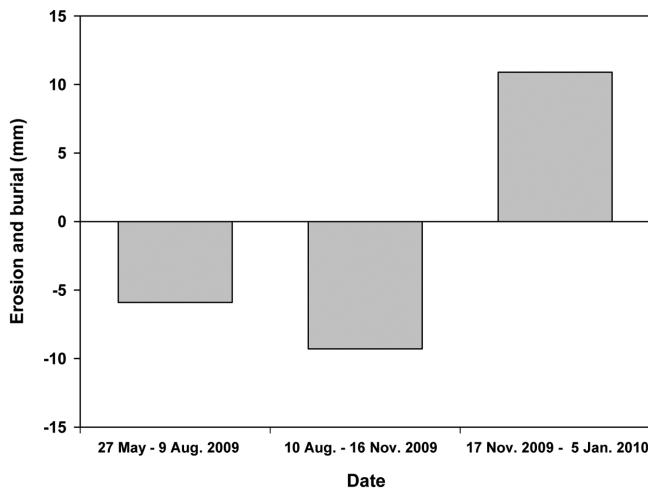


Fig. 4. Seasonal changes in erosion and burial at *Zostera marina* bed in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December 2009. Data are derived from MLTM (2010).

9.7 mm, 5월에 최고 11.1 mm이었고, 2009년에는 평균 8.7 \pm 0.1 mm로서 12월에 최저 7.0 mm, 5월에 최고 10.2 mm로 2004년 및 2009년 모두 봄부터 점차 감소하는 경향을 보였고, 2009년이 2004년 보다 유의하게 잎 폭이 작았다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 6d). 잎 수의 경우 2004년에는 평균 5.1 \pm 0.1개로서 7월에 최저 4.5개, 6월에 최고 5.8개이었고, 2009년에는 평균 4.6 \pm 0.1개로서 7월에 최저 3.9개, 6월에 최고 6.0개를 보여 2009년이 2004년 보다 유의하게 잎 수가 적었다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 6e). 개체당 지상부와 지하부의 비는 2004년에는 평균 5.0 \pm 0.3이고, 2009년에는 4.5 \pm 0.2로 2004년과 2009년에는 유의한 차이가 없었다(ANOVA, $p = 0.258$; Fig. 6f).

단위면적당 영양주의 서식밀도의 경우 2004년에는 평균 203 \pm 20 shoots m^{-2} , 2009년에는 평균 202 \pm 13 shoots m^{-2} 로 2004년과 2009년에는 유의한 차이가 없었으나(ANOVA, $p = 0.191$; Fig. 7a), 월

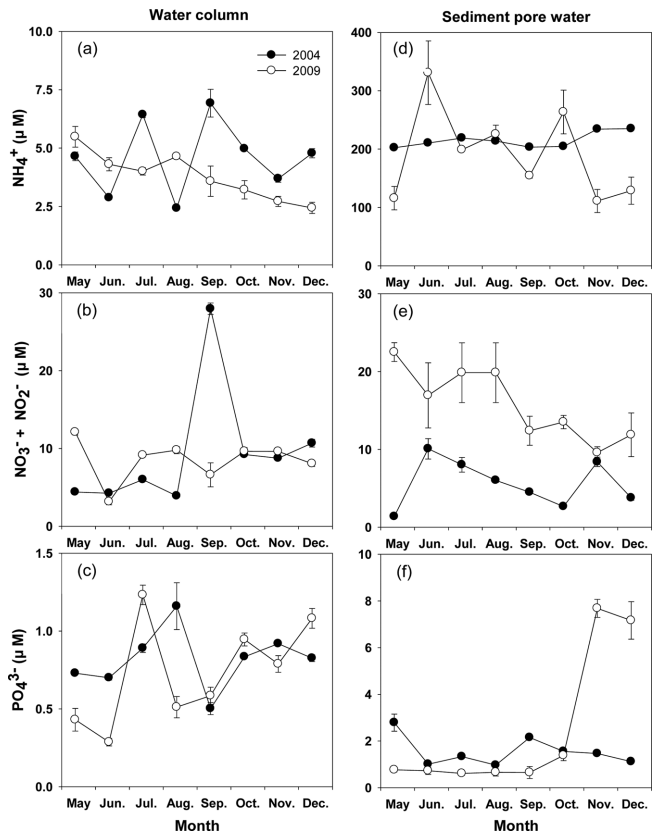


Fig. 5. Seasonal changes in water column (a, b, c) and sediment pore water (d, e, f) nutrient concentrations at *Zostera marina* bed in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December in 2004 (black bars) and 2009 (white bars). Values represent means \pm SE (n=4-6).

간에는 유의한 값을 보였다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 7a). 단위면적당 개화주의 서식밀도의 경우 조사기간 동안 2004년은 99.5 \pm 27.2 shoots m^{-2} 로 높은 밀도 값을 이었고, 2009년에는 39.8 \pm 8.0 shoots m^{-2} 이었다(Fig. 7b). 단위면적당 영양주의 서식밀도의 경우 2004년과 2009년의 평균 서식밀도 값은 비슷하였으나, 서식 양상은 2004년의 경우 terminal shoot 밀도 보다는 later shoot 밀도가 높은 반면 2009년에는 그 반대의 양상을 보였다. 또한, 2004년은 5월에 103.5 shoots m^{-2} 의 높은 개화주 서식밀도를 보였고 6월에도 개화주가 출현하여 안정된 값을 보이거나, 2009년에는 5월에만 출현하여 2004년 개화주 출현 양상과는 달랐다.

지상부 생물량은 2004년 평균 271 \pm 28 g DW m^{-2} , 2009년에는 평균 62.1 \pm 5.2 g DW m^{-2} 로 봄에는 지상부 생물량이 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 계절적 경향을 보였으며, 2009년이 2004년 보다 유의하게 지상부 생물량이 적었다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 7c). 지하부 생물량은 2004년 평균 66.2 \pm 4.4 g DW m^{-2} , 2009년 평균 18.7 \pm 1.7 g DW m^{-2} 로 계절적 경향을 보이지 않았으며, 2009년이 2004년 보다 유의하게 지하부 생물량이 적었다(ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 7d). 총 생물량 역시 2004년 평균 336.9 \pm 29.8 g DW m^{-2} , 2009년 평균 80.8 \pm 5.8 g DW m^{-2} 로 봄에는 총 생물량이 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 계절적 경향을 보

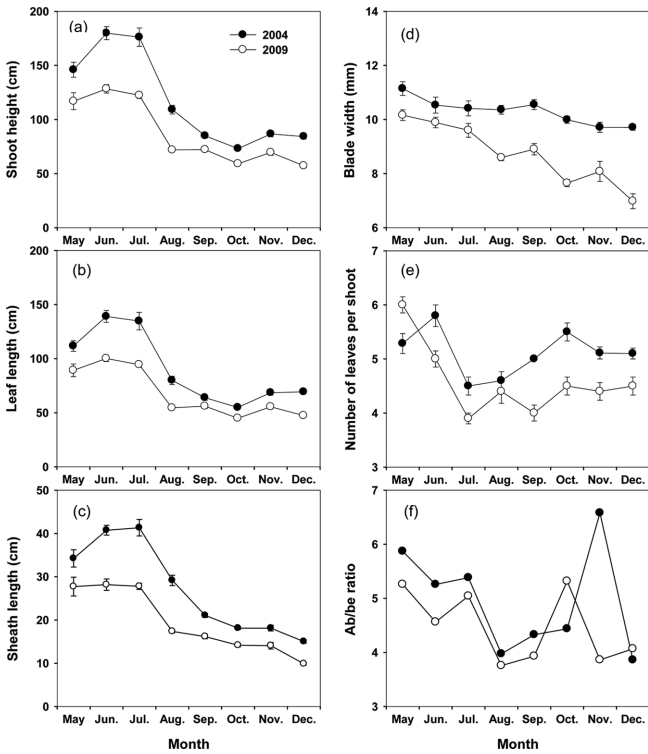


Fig. 6. Seasonal variations in shoot height (a), leaf length (b), sheath length (c), blade width (d), number of leaves per shoot (e), and ab/be ratio per shoot (f) of *Zostera marina* in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December in 2004 (black bars) and 2009 (white bars). Values represent means \pm SE (n=10-15).

였으며, 2009년이 2004년 보다 유의하게 총 생물량이 적었다 (ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 7e). 지상부 생물량과 지하부 생물량의 비는 2004년에 평균 4.0 ± 0.5 이고, 2009년에 3.3 ± 0.4 로서 유의한 차이는 없었다 (ANOVA, $p = 0.304$; Fig. 7f).

개체당 잎 생산량은 2004년 평균 28.9 ± 2.4 mg DW shoot⁻¹ day⁻¹, 2009년 평균 22.3 ± 2.1 mg DW shoot⁻¹ day⁻¹로 봄에는 월별 잎 생산량이 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 계절적 경향이 유의하게 나타났으나 (ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 8a), 연도 별 잎 생산량의 차이는 없었다 (ANOVA, $p = 0.099$; Fig. 8a). 면적당 잎 생산량은 2004년 평균 4.7 ± 0.5 g DW m⁻² day⁻¹, 2009년 평균 5.0 ± 0.6 g DW m⁻² day⁻¹이었다. 2004년은 봄부터 서서히 감소하다가 12월에 일시 증가하는 경향을 보였고, 2009년은 봄에는 증가하다가 여름을 기점으로 서서히 감소하는 경향을 보여 2004년과 2009년 사이에 유의한 차이가 나타났다 (ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 8b). 상대 성장률의 경우 2004년 평균 0.022 ± 0.001 g g⁻¹ day⁻¹, 2009년 평균 0.026 ± 0.001 g g⁻¹ day⁻¹로 8월과 12월에 감소하는 경향을 보였으며, 2004년과 2009년 사이에 유의한 차이가 나타났다 (ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 8c). 개체의 잎이 새로 만들어 지는데 걸리는 시간 (turnover time)도 2004년 평균 47.6 ± 1.2 days, 2009년 평균 38.7 ± 1.5 day⁻¹로 8월과 12월에 증가하는 경향을 보였으며, 2004년과 2009년 사이에 유의한 차이가 나타났다 (ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 8d).

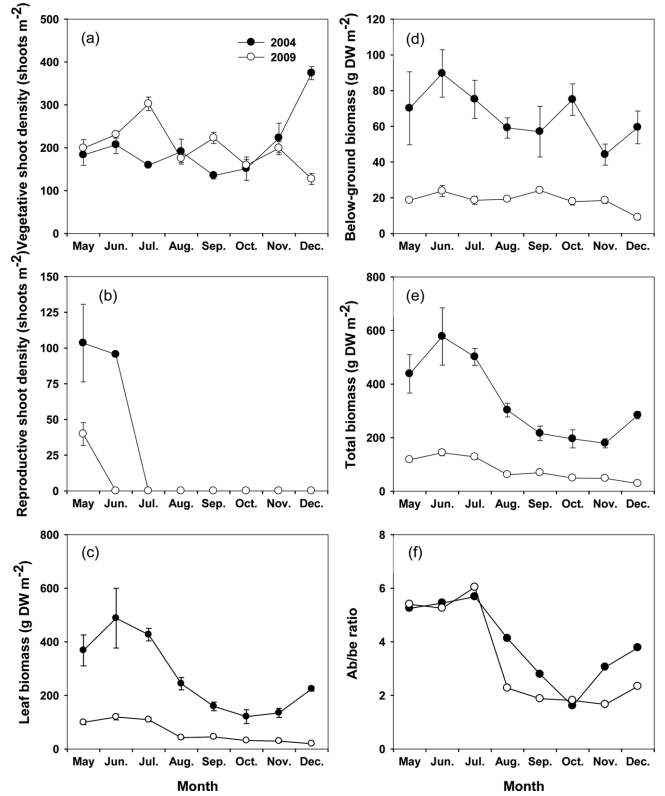


Fig. 7. Seasonal variations in vegetative density (a), flowering density (b), leaf biomass (c), below-ground biomass (d), total biomass (e), and ab/be ratio per biomass (f) of *Zostera marina* in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December in 2004 (black bars) and 2009 (white bars). Values represent means \pm SE (n=4-6).

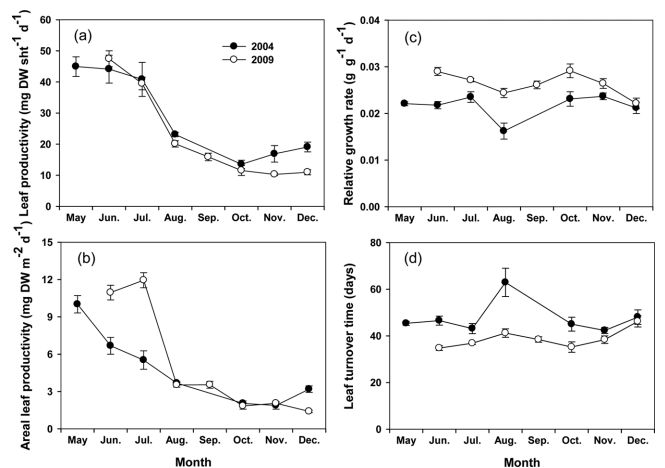


Fig. 8. Seasonal variations in leaf productivity per shoot (a), areal leaf productivity (b), relative growth rate (c) and leaf turnover time (d) of *Zostera marina* in the lower intertidal zone of Seomjin Estuary on the south coast of the Korean peninsula from May to December in 2004 (black bars) and 2009 (white bars). Values represent means \pm SE (n=10-15).

고찰

수온의 계절적 변화에 따라 잘피의 성장도 계절성을 나타낸다 (Wetzel and Penhale, 1983; Kentula and McIntire, 1986; Lee et

al., 2004). 잘피의 성장은 광합성률과 호흡의 균형으로 결정되므로, 적정수온에서는 생산성이 높아지고, 높은 수온과 낮은 수온이 유지되는 시기에는 생산성은 저하된다(Lee et al., 2004, 2005; Kim et al., 2012). 특히, 높은 수온은 순생산을 감소시키고 호흡량을 증가시키므로 온대지역에 서식하는 거머리말의 생산성은 수온에 의해 제한 받을 수 있다(Wetzel and Penhale, 1983; Marsh et al., 1986; Lee et al., 2007). 본 조사에서 2004년과 2009년 모두에서 거머리말의 생물량, 형태적 특성과 생산성은 봄과 여름에 증가하고 가을과 겨울에 감소하는 계절변화가 나타났고, 밀도는 2004년에는 계절적 변화를 보이면서 12월에 최대치를 보인 반면 2009년에는 계절변화 없이 12월에 최저 값을 보였다(Kim et al., 2013). 본 결과에서 2004년과 2009년의 수온은 시기적으로 유의한 차이가 없었으나, 조사시기 모두 뚜렷한 계절 변화를 보였다. 섬진강 하구에 서식하는 거머리말 군락지의 생산성은 우리나라 연안에 흔히 출현하는 거머리말과 유사하게 15-20 °C가 되는 봄부터 급격히 증가하였고, 높은 수온의 영향으로 여름 이후 감소하기 시작하였다(MLTM, 2010; Kim et al., 2013). 따라서 섬진강 하구 조간대 하부에 서식하는 거머리말의 2004년과 2009년에 생물량 및 형태적인 차이가 나타나는 것은 수온의 영향이라고 보이지는 않는다.

광량은 잘피의 서식분포를 조절하는 가장 중요한 요소로서, 광합성에 의하여 성장하는데 충분한 광량을 필요로 한다(Dennison et al., 1993; Greve and Binzer, 2004). 잘피의 생존과 성장을 위해 필요한 수중광량은 표층광의 2.37%이며, 잘피 중, 서식환경과 위도에 따라 차이가 크게 나타난다(Dennison et al., 1993; Greve and Binzer, 2004; Lee et al., 2007). 넓은 잘피 군락지가 발달된 우리나라 남해안의 거머리말 군락지에서도 수중광량은 폭 넓은 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다. 즉, 거머리말 잎 높이에서 평균 수중광량은 섬진강 하구에서 13.6 mol photons m⁻² day⁻¹, 가막만 6.4 mol photons m⁻² day⁻¹, 진동만 15.6 mol photons m⁻² day⁻¹, 거제만 28.0 mol photons m⁻² day⁻¹로 다양한 값을 보였다(Lee et al., 2004, 2005; Kim et al., 2008; Park et al., 2012; Kim et al., 2013). 거머리말은 5 mol photons m⁻² day⁻¹ 이상의 수중광량에서는 일정한 성장이 가능하나 그 이하에서는 성장률과 생물량이 감소한다고 보고되고 있다(Dennison, 1987; Dennison and Alberte, 1987). 섬진강 하구 조간대 하부의 2004년과 2009년의 평균 수중광량은 각각 9.7 mol photons m⁻² day⁻¹과 14.3 mol photons m⁻² day⁻¹이었고, 최저 수중광량은 각각 7.0 mol photons m⁻² day⁻¹과 8.4 mol photons m⁻² day⁻¹로서 조사 기간 동안 2004년에 비하여 2009년이 항상 높았으나, 거머리말의 형태 및 생물량은 2009년 보다 2004년이 높았다. 따라서 일반적으로 조하대에 나타나는 거머리말 서식지에서는 수중광량이 잘피의 성장과 생존에 중요한 영향을 미치나(Dennison, 1987; Dennison and Alberte, 1987; Greve and Binzer, 2004), 두 해 사이에 섬진강 하구의 조간대 하부에 위치한 거머리말의 성장 차이는 수중광량이 결정적인 영향을 미친 것으로 보이지는 않는다.

높은 생산성을 발휘하는 일차생산자인 잘피는 성장을 위해 많은 양의 용존 무기 영양염류를 필요로 하며 잎과 뿌리로 영양염을 흡수하여 해수나 퇴적물 공극수의 무기 영양염의 양에 의해 잘피의 생장이 달라지게 되기도 한다(Short, 1987; Short et al., 1990; Lee and Dunton, 2000; Lee et al., 2007; Kim et al., 2013). 그러나 수층의 영양염이 과도하게 높아지면 플랑크톤이나 잘피 잎에서

식하는 부착 생물량을 증가시켜 잘피 군락지에 악영향을 미치기도 한다(Short, 1987; Lee et al., 2007). 반면, 퇴적물의 영양염이 부족한 해역에서는 퇴적물 내 비료를 주입하여 잘피의 성장을 촉진시키기도 하였다(Lee and Dunton, 2000). 본 조사에서 2004년과 2009년의 무기 영양염의 농도는 조사시기마다 변동은 컸지만 뚜렷한 계절 경향을 나타내지 않았다. 해수의 NH₄⁺ 농도는 2004년이 2009년 보다 높았고, 퇴적물 공극수의 NO₃⁻+NO₂⁻ 농도는 2009년이 2004년 보다 높았으나, 그 외 다른 영양염의 농도는 두 해 사이에 유의한 차이가 없었다. 거머리말은 퇴적물의 NH₄⁺ 농도가 100 μM 이하에서 성장의 제한을 받는다고 한다(Short, 1983; Lee et al., 2007). 조사 해역의 퇴적물 공극수의 NH₄⁺ 농도는 2004년과 2009년 모두 거머리말의 성장을 제한하지 않을 정도로 풍부하였으나, 거머리말의 생물량과 형태적 특성은 2004년이 2009년 보다 유의하게 높게 나타났다(Kim et al., 2013). 따라서, 2004년과 2009년 섬진강 하구 조간대 하부에서 자생하는 거머리말의 성장의 차이는 영양염의 농도의 차이에 기인하는 것으로 판단되지 않는다(Kim et al., 2013).

침수식물인 잘피는 대부분 조하대에 서식하고, 일부 잘피가 조간대에 출현하기도 한다. 거머리말도 대부분 조하대에 자생하고, 남해안에서 조간대 하부와 상부에 출현하기도 한다(Lee and Lee, 2003; Lee et al., 2005; Kim et al., 2010). 물 밖으로의 노출은 침수식물인 거머리말의 생리작용에 스트레스를 주게 된다. 섬진강 하구 조간대 상부와 하부 거머리말의 성장 특성에서 조간대 상부의 거머리말은 노출에 대한 스트레스로 인하여 밀도와 생산성이 낮았고, 잘피 개체의 지상부 길이와 잎 폭과 같은 형태적인 감소를 보인다고 하였다(Kim et al., 2013). 본 조사에서는 조간대 하부에 서식하는 거머리말의 2004년 및 2009년의 월 평균 노출시간은 각각 12.6 hours month⁻¹, 5.0 hours month⁻¹이었으나, 검정통계량의 유의수준에서 보면 거머리말의 노출 시간은 2004년과 2009년 사이에 차이가 없었다. 밀도와 개체당 잎 생산성에서도 두 해 사이에 차이를 보이지 않았으나, 2009년에 상대적으로 생물량 및 잘피 개체의 지상부 길이와 잎 폭과 같은 형태적인 감소를 보이고, 면적당 잎 생산력은 오히려 2009년에 유의하게 높은 값을 보여 2004년과 2009년의 노출 시간이 거머리말 군락의 성장 제한 요인으로 볼 수 없을 것이다.

안정적인 잘피 서식지에서 잘피의 잎은 유속을 감소시키고, 퇴적물의 재부유를 막아주어 수층을 맑게 하고, 잘피의 지하경과 뿌리는 퇴적층을 안정화시켜 연안 침식을 감소시킨다(Gacia and Duarte, 2001; Bos et al., 2007). 또한, 적절한 퇴적과 침식은 수직 지하경(vertical rhizome)을 보유한 *Cymodocea nodosa*의 지하경 성장을 촉진시키기도 하나(Marbà and Duarte, 1994), 과도한 퇴적과 침식은 잘피의 원활한 성장을 방해하여 사망에 이르게 하기도 한다(Manzanera et al., 1998; Mills and Fonseca, 2003). 퇴적과 침식의 정도가 잘피에 미치는 영향은 종에 따라 다르게 나타나는데, 거머리말은 대서양에 서식하는 *Posidonia oceanica*와 호주에 서식하는 *Amphibolis griffithii* 보다 퇴적과 침식에 민감하게 반응하는 것으로 보고되고 있다(Mills and Fonseca, 2003). MLTM(2010) 보고서에 의하면 섬진강 하구 조간대의 9개 지역에서 퇴적물을 모니터링 한 결과 육지 쪽으로 만입되거나, 빠른 유속 등으로부터 보호되는 3개 지역에서는 퇴적되었고, 나머지 6개 지역에서는 침식된 현상을 보이고 있다고 하였다. 또한, 갈사리 조간대 하부의 190 cm 시추코어 자료에서 0-30 cm에서는 사질, 30-60 cm에서는

니사질, 60-90 cm에서는 사질, 90 cm 이하에서는 니사질이 형성되었으며, 세립과 조립이 교호되는 양상을 보였다. 본 연구에서 섬진강 하구의 거머리말이 자생하는 조건대 하부는 퇴적과 침식으로 인하여 퇴적물 입도 조성은 2004년에 모래가 평균 87.1%의 사질에 가까운 니사질에서, 2009년에는 모래가 평균 95.5%의 사질로 변형되어 퇴적물 성상이 상대적으로 조립하였고 퇴적물의 유기물 농도도 낮은 값을 보였다(Kim *et al.*, 2010, 2013). 유기물 농도의 감소는 영양염의 재순환을 감소시켜 잔피의 형태나 성장을 저하시키기도 한다(Lee *et al.*, 2005). 본 연구에서도 섬진강 하구 동일 장소에서 출현한 2009년의 거머리말은 2004년의 거머리말에 비해 형태, 성장과 생물량이 현저히 낮게 나타났다. 거머리말의 밀도도 2004년의 경우 안정적인 패턴을 보였으나, 2009년은 영양주의 밀도도 불안정한 패턴을 보였고, 개화주의 밀도도 5월에만 출현하여 서식환경이 악화되었음을 시사하고 있다. 또한, 단위면적당 서식밀도는 연도 별 유의한 차이가 없었으나, 생물량은 2004년 보다 2009년에 유의하게 적었다. 평균 개체당 잎 생산량은 년도 별 유의한 차이는 없었으나, leaf turnover time은 2004년과 2009년에서 각각 47.6일과 38.7일로 2009년이 짧게 나타나 2009년이 높은 turnover rate를 나타내었다. 이것은 스트레스에 노출된 잔피는 기존의 조직을 유지하기보다 새 조직을 만드는 것을 선호하기 때문으로 추측된다(Boese *et al.*, 2003). 따라서, 대부분의 잔피 서식지는 수온, 수중광량, 영양염 농도 및 노출시간 등이 주된 성장 제한요인으로 영향을 미치나, 2004년과 2009년 섬진강 하구 하부 조건대의 동일 잔피 서식지를 비교한 결과는 퇴적물 성상 변화에 의하여 형태, 성장 및 생물량의 변화를 보이고 있는 것으로 나타났다.

20세기로 진입하면서 지구 곳곳에서 해수면이 평균 10-25 cm 상승하여 해안선을 20-25 m 물러나게 하였으며, 연안 해류에도 영향을 주어 일부 지역의 집중적인 침식과 퇴적을 촉진시킨다고 보고되고 있다(Bruun, 1962; Duarte, 2002). 이러한 현상은 지구 온난화와 기후 변동으로 더욱 가속화되고 있으며 연간 59 cm씩 해수면을 상승시킬 것으로 예상된다(Mackenzie, 1998). 잔피 서식지는 전 세계 연안의 10%에 달하였으나, 1940년대 이후 잔피 서식지가 매년 7%씩 감소하고 있으며, 잔피 서식지의 과도한 침식과 퇴적이 그 주요 요인 중 하나로 제기되었다(Waycott *et al.*, 2009). 우리나라의 잔피 서식지도 경제성장이 시작되는 1970년대 이후 매립, 부영양화, 해안공사 등으로 급격히 감소(Lee and Lee, 2003) 하고 있으므로 잔피 군락과 해양 환경을 포함한 잔피 서식지의 지속적인 관찰은 우리 연안의 잔피 서식지 보존에 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원(RP-2014-ME-034)의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 논문의 완성도를 높이기 위하여 세심하게 살펴 주신 두 분의 심사위원께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌(References)

Addy, C.E., 1947. Eelgrass planting guide. Maryland Conserv., **24**: 16-17.

- Boer, 2007. Seagrass-sediment interactions, positive feedbacks and critical thresholds for occurrence: a review. *Mar. Biol.*, **591**: 5-24.
- Boese, B.L., K.E. Alayan, E.F. Gooch, and B.D. Robbins, 2003. Desiccation index: a measure of damage caused by adverse aerial exposure on intertidal eelgrass (*Zostera marina*) in an Oregon (USA) estuary. *Aquat. Bot.*, **76**: 329-337.
- Bos, A.R., T.J. Bouma, G.L.J. de Kort, and M.M. van Katwijk, 2007. Ecosystem engineering by annual intertidal seagrass beds: Sediment accretion and modification. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **74**: 344-348.
- Bruun, P., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal Waterways and Harbors Division, American Society Civil Engineers*, **88**: 117-130.
- Davis, R.C. and F.T. Short, 1997. Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique: The horizontal rhizome method. *Aquat. Bot.*, **59**: 1-15.
- Day, J.W., C.A.S. Hall, W.M. Kemp, and Y. Alejandro, 1989. Estuarine ecology. John Wiley and Sons Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 558 pp.
- den Hartog, C. 1970. The seagrass of the world. North-holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, 275 pp.
- Dennison, W.C., 1987. Effects of light on seagrass photosynthesis, growth and depth distribution. *Aquat. Bot.*, **27**: 15-26.
- Dennison, W.C. and R.S. Alberte, 1987. Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **25**: 51-61.
- Dennison, W.C., R.J. Orth, K.A. Moore, J.C. Stevenson, V. Carter, S. Kollar, P.W. Bergstrom, and R.A. Batiuk, 1993. Assessing water quality with submersed aquatic vegetation. *BioScience*, **43**: 86-94.
- Duarte, C.M., 2002. The future of seagrass meadows. *Environ. Conserv.*, **29**: 192-206.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, **27**: 3-26.
- Fonseca, M.S., 2007. What has changed with seagrass restoration in 58 years? In: 19th Estuarine Research Federation Abstracts. Providence, Rhode Island, 64 pp.
- Fonseca, M.S., W.J. Kenworthy, and F.X. Courtney, 1996. Development of planted seagrass beds in Tampa Bay, FL, USA: I. Plant components. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **132**: 127-139.
- Fonseca, M.S. and J.S. Fisher, 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.
- Gacia, E. and C.M. Duarte, 2001. Sediment retention by a Mediterranean *Posidonia oceanica* meadow: The balance between deposition and resuspension. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **52**: 505-514.
- Greve, T.M. and T. Binzer, 2004. Which factors regulate seagrass growth and distribution? In: Borum, J., C.M. Duarte, D. Krause-Jensen and T.M. Greve (eds), European seagrasses: an introduction to monitoring and management. pp. 19-23. The Monitoring and Managing of European Seagrasses (M&MS) project.
- Kentula, M.E. and C.D. McIntire, 1986. The autecology and production dynamics of eelgrass in Netarts Bay, Oregon. *Estuaries*, **9**: 188-199.
- Kim, J.B., J.-I. Park, W.-J. Choi, C.-S. Jung, P.-Y. Lee, and K.-S. Lee, 2009. Distributional range extension of the seagrass *Halophila*

- nipponica* into coastal waters off the Korean peninsula. *Aquat. Bot.*, **90**: 269–272.
- Kim, J.B., J.-I. Park, W.-J. Choi, J.S. Lee, and K.-S. Lee, 2010. Spatial distribution and ecological characteristics of *Zostera marina* and *Zostera japonica* in the Seomjin Estuary. *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, **43**: 351–361.
- Kim, J.B., W.-C. Lee, K.-S. Lee, and J.-I. Park, 2013. Growth dynamics of eelgrass, *Zostera marina*, in the intertidal zone of Seomjin Estuary, Korea. *Ocean Sci. J.*, **48**: 239–250.
- Kim, T.H., S.R. Park, Y.K. Kim, J.H. Kim, S.H. Kim, J.H. Kim, I.K. Chung, and K.S. Lee, 2008. Growth dynamics and carbon incorporation of the seagrass, *Zostera marina* L. in Jindong Bay and Gamak Bay on the southern coast of Korea. *Algae*, **23**: 241–250.
- Kim, Y.K., J.H. Kim, S.H. Kim, J.W. Kim, S.R. Park, and K.-S. Lee, 2012. Growth dynamics of the seagrass, *Zostera marina* in Jindong Bay on the southern coast of Korea. *Algae* **27**: 215–224.
- Koch, E.W., 2001. Beyond light: Physical, geological and geochemical parameters as possible submersed aquatic vegetation habitat requirements. *Estuaries*, **24**: 1–17.
- Lee, K.-S. and K.H. Dunton, 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 S.Y. Lee, 2003. The seagrasses of the republic of Korea. In: *World Atlas of Seagrasses: present status and future conservation*, edited by Green EP, Short FT and Spalding MD. University of California Press, Berkeley, USA., 193–198.
- Lee, K.-S., J.-I. Park, I.K. Chung, D.W. Kang, and S.H. Huh, 2004. Production ecology of the seagrass *Zostera marina* in Jindong Bay, Korea. *Algae*, **19**: 39–47.
- Lee, K.-S., S.R. Park, and J.B. Kim, 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., S.R. Park, and Y.K. Kim, 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **350**: 144–175.
- Lee Long, W. and R.M. Thom, 2001. Improving seagrass habitat quality. In: *Global Seagrass Research Methods*, edited by Short, F.T., R.G. Coles and C.A. Short, Elsevier, Amsterdam, pp. 407–424.
- Mackenzie, F.T., 1998. *Our changing planet: An introduction to earth system science and global environmental change*. 2nd edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.
- Manzanera, M., M. Pérez, and J. Romero, 1998. Seagrass mortality due to oversedimentation: an experimental approach. *J. Coast. Conserv.*, **4**: 67–70.
- Marbà, N.M. and C.M. Duarte, 1994. Growth responses of the seagrass *Cymodocea nodosa* to experimental burial and erosion. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **107**: 307–311.
- Marsh, J.A. Jr., W.C. Dennison and R.S. Alberte, 1986. Effects of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina*). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **101**: 257–267.
- Mills, K.E. and M.S. Fonseca, 2003. Mortality and productivity of eelgrass *Zostera marina* under conditions of experimental burial with two sediment types. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **255**: 127–134.
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2010. Establishment of action plans for management of estuary system (III), Seomjin Estuary, Korea, 419 pp.
- MOMAF(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries), 2007. Study on environmental management of environment protect area in Deukryang Bay. 171 pp.
- National Academy of Sciences, 1975. Underexploited tropical plants with promising economic value. National Academy of Sciences. Washington, DC. USA, 188 pp.
- Noh, J.W., J.-Y. Lee, and J.-K. Shin, 2011. Analysis of saltwater intrusion by flushing discharge in the Seomjin River Estuary. *J. Env. Imp. Ass.*, **20**: 325–335.
- Park, J.-I. and K.-S. Lee, 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.
- Park, J.-I., K.-S. Lee, and M.H. Son, 2011. Growth dynamics of *Zostera marina* transplants in the Nakdong estuary related environmental changes. *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, **44**: 533–542.
- Park, J.-I., J.Y. Park, K.-S. Lee, and M.H. Son, 2012. Adaptation success of *Zostera caespitosa* transplants. *Korean J. Environ. Biol.*, **30**: 47–53.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli, 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- 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., W.C. Dennison, and D.G. Capone, 1990. Phosphate limited growth of the tropical seagrass *Syringodium filiforme* in carbonate sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **62**: 149–174.
- Short, F.T. and C.P. McRoy, 1984. Nitrogen uptake by leaves and roots of the seagrass *Zostera marina* L. *Bot. Mar.*, **27**: 547–555.
- Ward, L.G., W.M. Kemp, and W.R. Boynton, 1984. The influence of waves and seagrass communities on suspended particulates in an estuarine embayment. *Mar. Geol.*, **59**: 85–103.
- Waycotta, M., C.M. Duarte, T.J.B. Carruthers, R.J. Orth, W.C. Dennison, S. Olyarnik, A. Calladine, J.W. Fourqurean, K.L. Heck, Jr., A.R. Hughes, G.A. Kendrick, W.J. Kenworthy, F.T. Short, and S.L. Williams, 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, **106**: 12377–12381.
- Wetzel, R.L. and P.A. Penhale, 1983. Production ecology of seagrass communities in the lower Chesapeake Bay. *Mar. Technol. Soc. J.*, **17**: 22–31.
- Zieman, J.C., 1974. Methods for the study of the growth and production of turtle grass, *Thalassia testudinum* Konig. *Aquaculture*, **4**: 139–143.

2014년 9월 11일 원고접수

2014년 11월 16일 수정본 접수

2015년 2월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 신현출