

한강하구 장항습지의 선버들 (*Salix nipponica*)의 지상부 1차생산성과 말뚝게 (*Sesarma dehaani*)의 2차생산성

한동욱 · 유재원¹ · 유영한² · 이은주 · 박상규^{3,*}

(서울대학교, ¹한국연안환경생태연구소, ²공주대학교, ³아주대학교)

Aboveground Primary Productivity of *Salix nipponica* and Secondary Productivity of *Sesarma dehaani* at Janghang Wetland in Han River Estuary. Han, Donguk, Jae-Won Yoo¹, Younghan Yoo², Eunju Lee and Sangkyu Park^{3,*} (School of Biological Sciences, Seoul National University, Korea; ¹Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Korea; ²Department of Biological Science, Kongju National University, Korea; ³Department of Biological Science, Ajou University, Korea)

We estimated aboveground primary productivity of *Salix nipponica* based on biomass using allometry and basal area at Janghang wetland in Han River estuary. In addition, we estimated secondary production of sesarmine crab (*Sesarma dehaani*) living under the *Salix* community to interpret relationships between *Salix nipponica* and *Sesarma dehaani*. *Salix nipponica* showed primary productivity of 4,777 g DW m⁻² yr⁻¹, which appear to be the highest primary productivity in South Korea. The estimated amount of autochthonous organic matter from *S. nipponica* and allochthonous organic matter from the Han River into sediment was 359 g C m⁻² yr⁻¹ and 347 g C m⁻² yr⁻¹, respectively. The secondary productivity of *Sesarma dehaani* was 100.2 g FW m⁻² yr⁻¹, which was 2.1% of the primary productivity of *S. nipponica*. The biomass of *Sesarma dehaani* was average 140 g FW m⁻², which consumed their prey of approximately 2,140 g FW yr⁻¹, which is equivalent to approximately 208 g C m⁻² yr⁻¹.

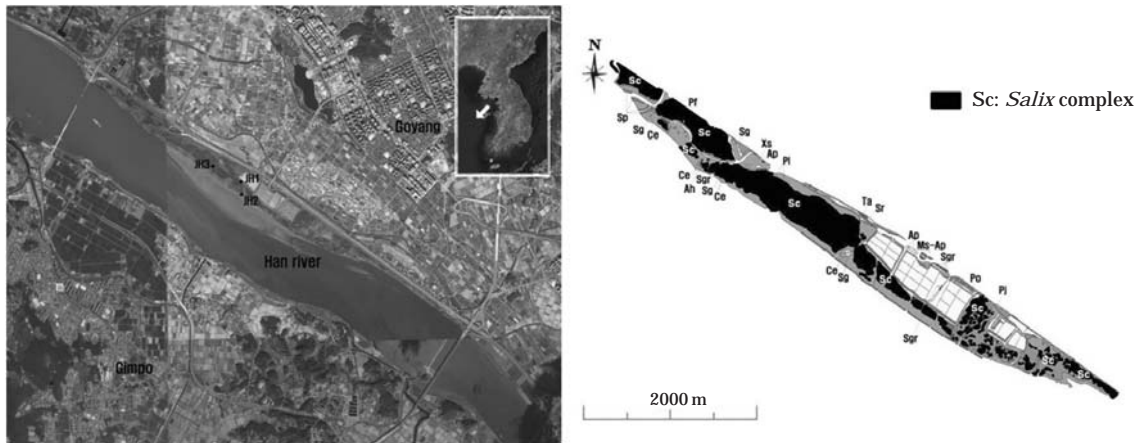
Key words : *Salix nipponica*, *Sesarma dehaani*, primary productivity, secondary productivity, Janghang Wetland, Han River Estuary

서 론

조석에 있는 기수역의 목본성 습지생태계에 우점하는 목본의 성장량 및 생산성에 대한 연구는 주로 열대나 아열대지역의 망그로브습지에 집중되어 있으며, 특히 개와 망그로브류와의 상호관계에 집중되어 있다(Lee, 1998). Lee (1998)의 종설에 따르면 인도양, 태평양 지역의 망그로브습지에서 *Sesarma*속 게는 유기물을 분해하여 배설물형태로 망그로브 잎 생산의 24%를 저토로 보내는 기능을 한다(Lee, 1997). 이 배설물은 처음에는 질소함유량

이 아주 낮으나 2주가 지나면 질소함량이 높아지고 탄닌 함량이 낮아져서 망그로브 먹이그물에 중요한 양질의 유기물원이 된다(Lee, 1997). 또한 Grapsid 종류 게들은 망그로브 진흙에 서식굴을 파서 공기가 통하게 하여 생산성을 높이는 것으로 보인다(Smith *et al.*, 1991). 이러한 여러 기능 때문에 이 게들이 망그로브 생태계의 핵심종이라 주장되었다(Smith *et al.*, 1991). 많은 증거들로부터 Grapsid종류 게를 포함한 망그로브 게(Mangrove Crab)들과 망그로브는 서로 상호 호혜적이며 서로의 활력과 생존에 깊은 영향을 주고 있다고 주장하였다(Vanninia *et al.*, 1997; Lee, 1998; Kristensen and Alongi, 2006). 하지만

* Corresponding author: Tel: 031) 219-2967, Fax: 031) 219-1615, E-mail: daphnia@ajou.ac.kr



Rp : Rice Paddy
 Pc : *Phragmites communis* Trin.
 Ms : *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth.
 Zl : *Zizania latifolia* (Griseb.) Turcz. ex Stapf
 Ce : *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth
 Sg : *Setaria glauca* (L.) P. Beauv.
 Sp : *Scirpus planiculmis* F. Schmidt
 Pj : *Phragmites japonica* Steud.
 Sgr: *Salix gracilistyla* Miq.

Pl : *Phacelurus latifolius* (Steud.) Ohwi
 Ap: *Aster pilosus* Willd.
 Xs: *Xanthium strumarium* L.
 Po: *Platanus occidentalis* L.
 Ah: *Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino
 Pf : *Perilla frutescens* var. *japonica* (Hassk.) Hara
 Ta: *Typha angustifolia* L.
 Ap: *Artemisia princeps* Pamp.
 Sr: *Scirpus radicans* Schkuhr

Fig. 1. Map of study site and *Salix* complex at Janghang wetland in Han River estuary. JH1, JH2, JH3 are the sampling sites (JH1: 37° 38' 24.90"N, 126° 45' 00.66"E, JH2: 37° 38' 17.13"N, 126° 45' 01.93"E, JH3: 37° 38' 37.53"N, 126° 44' 39.31"E).

한반도의 기수역에 나타나는 목본성 습지와 그 곳에 서식하는 계의 상호관계에 대한 연구는 한강하구 조사보고서(고양시, 2005)에 기재된 이후 지금까지 학계에는 보고되지 않았다. 또한 버드나무 군락에 대한 연구도 주로 수분, 잡종형성, 종자의 산포, 유묘의 정착과 성장, 개체군 동태 등의 연구(Argus, 1974; Densmore and Zasada, 1983; Niiyama, 1987; Bishop and Chapin, 1989; Beerling, 1998; 이, 2002)와 한국 내 하천변 버드나무속의 군집구조 및 동태에 관한 연구(이, 2002) 등으로 국한되어 있다. 본 연구에서는 국가습지보호지역으로 지정되어 있는 한강하구 장항습지에서 선버들군락과 그 하부에 서식하는 말뚝게와의 상호관계 규명에 필요한 기초자료로서 선버들군락의 연간 생산성, 장항습지의 외생과 내생유기물의 공급량, 그리고 말뚝게의 현존량과 생산성을 추정하였다.

재료 및 방법

1. 연구 장소 및 시료 채취

한강하구는 한반도의 DMZ권역과 서해연안생태계권역이 교차하는 경기만에 위치하며, 고양시, 파주시, 김포시, 강화군에 걸쳐 있다. 이 중 장항습지는 고양시 신평동, 장항동, 송포동에 위치한 버드나무 우점 습지로 기수 상부

구역에 속한다(환경부, 2005). 이 지역은 DMZ 일원인 민간인통제구역으로 자연경관이 우수하고 다수의 멸종위기 동식물이 서식하고 있어 2006년 4월 환경부고시 제2006-58호에 의해서 국가습지보호지역으로 지정되었으며 지정된 면적은 총 60.668 km²이다. 이중 장항습지의 식생이 분포하는 습초지의 면적은 2.7 km², 버드나무림의 면적은 0.71 km²(식생피복 지역의 19.6%)이다(Fig. 1). 본 연구는 2005년 1월부터 2007년 12월까지 장항습지 선버들군락 내에서 이루어졌으며 군락 내 말뚝게 서식처가 양호한 3개소(JH1, JH2, JH3)를 선정하여 5 × 5 m² quadrat을 각각 2개씩 총 6개를 설치하여 선버들의 기저직경(D)과 수고(H)를 측정하고 표본목을 채집하였다. 또한 JH1지점에서 선버들 litter와 말뚝게 시료를 채집하였다.

2. 선버들 (*Salix nipponica*)의 개체군구조 및 생산성 추정

2005년 2~5월에 각 지점에 설치된 방형구 6개 내에 출현하는 버드나무의 꽃과 잎을 채집하여 동정하고 개체판별이 용이하게 라벨을 부착하였으며, 7~8월에는 각각의 방형구내 출현하는 선버들의 개체수와 기저직경(D)을 측정하여 개체군의 구조를 파악하였다. 그리고 방형구내에서 표본목 10개체를 선정하여 수확한 후 나이트의 폭

을 측정하여 성장속도를 파악하였다.

동년 10월에는 선버들 지상부의 부위별 건물량 증가를 추정하기 위하여 크기 별로 대표가 되는 표본목 6개를 방형구 주변에서 수확하여 기저직경(D)과 수고(H)를 측정 후 다음의 비례식(김, 2006)을 이용하여 생물량을 추정하였다.

$$Ws=1.0355 \log(D^2H)-1.0164 \quad (r=0.939) \quad (1)$$

$$Wb=0.4531 \log(D^2H)-1.5355 \quad (r=0.881) \quad (2)$$

$$Wl=0.6709 \log(D^2H)-1.1983 \quad (r=0.969) \quad (3)$$

(Ws: 줄기의 생물량, Wb: 가지의 생물량, Wl: 잎의 생물량, W: 건물량, D: 기저직경, H: 수고)

또한 선버들 지상부의 1차생산성은 현 연도와 전 연도 간의 현존량의 차이로 간주하였다(김, 1970). 이를 추정하기 위하여 수확된 표본목의 줄기 기저부 단편을 잘라 나이트를 판별하였고, 표본목의 생물량과 함께 동 실험지역에서 수집된 단위면적당 선버들의 수령대별 빈도수, 연도별 선버들 평균 연륜 증가 폭(미발간 자료)을 이용하였다.

3. 외생 (allocthonous) 및 내생 (autocthonous) 유기물

장항습지에 유입되는 유기물의 기원과 총량을 추적하기 위해서 외생유기물과 내생유기물로 나누어 관측하였다. 외생유기물량은 2005년 1월부터 2007년 12월까지 습지 내 축적된 퇴적량으로 간주하였으며 이를 측정하기 위하여 JH1 지점의 방형구 사이 공간에 얇은 주석판(0.5 m × 0.5 m 크기)을 설치한 후 연간 외부로부터 유입되는 퇴적량을 조사하고 총탄소와 질소를 측정하기 위해 퇴적된 저토를 채집하였다. 또한 내생유기물량은 연간 낙엽생산량으로 간주하였으며 이를 측정하기 위하여 2007년 5월부터 11월까지 JH1 지점에 litter trap을 설치하였다. 원형 litter trap(샤넬천, mesh size 0.3 cm, 직경 0.5 m) 5개를 지상 30 cm에 설치하고 매월 이입되는 낙엽을 수거하여 잎, 꽃, 가지, 기타 등으로 구분한 다음 80°C에서 건조시켜 평량한 후 무게를 측정하였다. 또한 저토 채집과 같은 시기에 JH1 방형구내의 선버들 잎의 생시료를 매월 채집하였다. 채집된 저토와 선버들 생시료는 60°C에서 적어도 하루 이상 건조시킨 다음 막자와 사발을 이용하여 고운 가루로 갈고 이를 8 × 5 mm 주석 캡슐에 싸서 plate에 넣은 다음 미국 UC Berkeley의 Dr. Todd Dawson (<http://ib.berkeley.edu/labs/dawson/index.php>)에게 보내어 Automatic carbon and nitrogen analyzer (PDZ

Europa ANCA-SL)을 이용하여 탄소와 질소 함량을 측정하였다.

4. 말뚝게 (*Sesarma dehaani*)의 개체군 구조 및 생산성 추정

조사 현장에서 말뚝게는 크기에 따라 분포를 달리하며 강한 이동성과 함께 조석에 따라 간만조선 사이를 이동하는 패턴을 보였다. 이는 많은 수의 조간대 습지 정주자(resident species)들이 일주기, 조석주기, 생활사에 따른 회유 활동을 나타낸다는 점(McLachlan and Jaramillo, 1995)에서 자연스러운 현상으로 볼 수 있으나, 기존의 생산성 추정 연구에서와 같이 소수의 고정된 정점을 설정하여 생산성을 추정하는 것은 편의(bias)의 가능성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 정성적인 채집(JH1)을 통해 말뚝게 각각의 너비와 무게를 측정하였으며, 이를 바탕으로 $\log_{10} \omega = 13.31 + 3.061 \log_{10} l$ (ω : 습중량, l : 갑각 너비; $r^2=0.96$)의 선형 관계를 추정하였다. 생산성의 추정은 2006년 10월 ~ 2007년 3월까지의 가동면 기간을 제외한, 2006년 9월부터 2007년 9월까지 매 월별 정성적으로 채집된 말뚝게의 갑각 너비 자료를 너비 10~20, 20~30, 30~40, 40 mm 이상의 4개 크기 그룹으로 구분하고, 위의 식을 적용하여 각 개체별 습중량과 각 크기 그룹 별 평균 너비와 습중량을 추정하였다.

연령별 구분이 어려운 개체군의 경우, 일반적으로 Crisp (1984)이 제시한, 아래와 같은 개체군의 연간 생산성 추정식을 활용한다.

$$\text{연간 생산성} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} f_i G_i \omega_i \Delta t \quad (4)$$

위 식에서 G_i 는 i 번째 크기 그룹에 특이적인 성장률이며, f_i 는 i 번째 크기 그룹의 Δt 기간 동안의 평균 개체수, 그리고 $f_i \cdot \omega_i$ 는 i 번째 크기 그룹의 평균 현존량이다. G 의 계산식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{연간 성장률 } G &= 365 \times \Delta \log_e \omega \div \Delta d \\ &= 365 \times 2.303 \times \Delta \log_{10} \omega \div \Delta d \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 $\Delta \log_{10} \omega$ 는 각 채집 시기 간 습중량 증감분이며 Δd 는 시기 간 일수(days)의 차이이다.

본 연구에서는 정성적인 자료에 적용하기 위하여 연간 생산성의 식에서 f_i 를 제외하고, 각 크기 그룹별 개체당 성장률과 생산성을 추정하였다.

또한 장항 습지를 대표할 수 있는 정량적인 서식밀도와 생체량을 구하기 위해, JH1 주변의 다양한 서식처(버드나무림 하부, 수로, 갈대밭)에서 간조시 굴 밖으로 나와

먹이활동을 하는 말뚝계에 1×1 m² quadrat을 무작위적으로 활용, 2007년 3회(6월, 7월, 8월) 채집을 수행하였으며 매 채집당 채집횟수는 3반복 내외였다. 이를 통해 구해진 단위 면적당 말뚝계의 크기 그룹 별 밀도에 위의 크기 그룹별 성장률과 생산성을 적용하여 장항 습지의 말뚝계에 의해 발생하는 2차생산성을 추정하였다.

결 과

1. 선버들 (*Sesarma dehaani*)의 개체군구조와 성장곡선

선버들의 기저직경이 3 cm 미만인 개체가 90%, 4 cm 이상의 개체는 10%로 나타났으며 기저직경의 최고값은 17 cm을 보였다(Fig. 2). 또한 최고 수령은 약 20년이었으며 성장속도는 0.25~4 cm yr⁻¹로 매우 높게 나타났다(Fig. 3). 그리고 정착 직후 초기인 1~2년에는 생장이 느리고, 3~5년 사이에는 왕성한 성장을 보였으며 6년 이후에는 점차 성장속도가 감소하였다.

2. 선버들 (*Sesarma dehaani*)의 지상부 1차생산성

장항습지의 선버들의 표본목의 부위별 생물량은 줄기 >잎>가지의 순서로 낮게 나타났다(Table 1).

이러한 표본목의 생물량과 함께 단위면적당 선버들의 수령대별 빈도수, 연도별 선버들 평균 연륜 증가 폭(미발간 자료)을 이용하여 산출된 부위별 식물량 증가는 줄기 4,356 g DW m⁻² yr⁻¹ (54%), 가지 336 g DW m⁻² yr⁻¹ (30%), 잎 85 g DW m⁻² yr⁻¹ (17%)로 나타났다. 그러므로 장항습지 선버들의 지상부 1차생산성은 4,777 g DW m⁻² yr⁻¹로 추정되었다.

3. 내생 (autochthonous) 및 외생 (allochthonous) 유기물

장항습지의 선버들군락 내부에서 연간 생산되는 내생

유기물량은 선버들의 낙엽생산량으로 간주하였으며 외생 유기물량은 연간 퇴적되는 토사량으로 간주하였다. 2007년도에 추정된 단위면적당 선버들의 연간 낙엽생산량은 877.8 g DW m⁻² yr⁻¹이었다(Fig. 4). 이 수치는 선버들 비례생장식을 이용하여 도출된 2005년도 연간 생산된 엽량(85 g DW m⁻² yr⁻¹) 추정치와 비교해서 매우 높게 나타

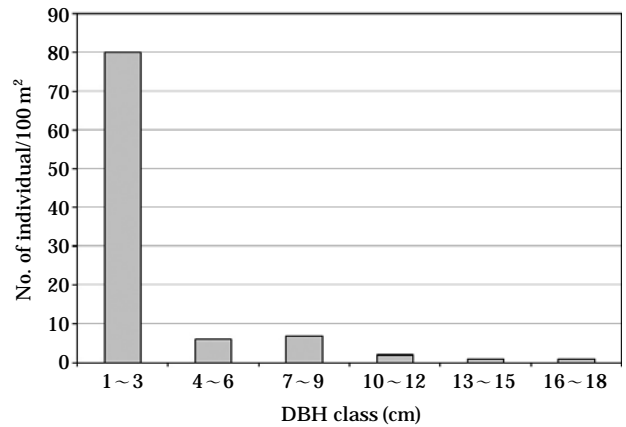


Fig. 2. Size distribution of *Salix nipponica* in our study site (JH1, 2, and 3) in Janghang wetland.

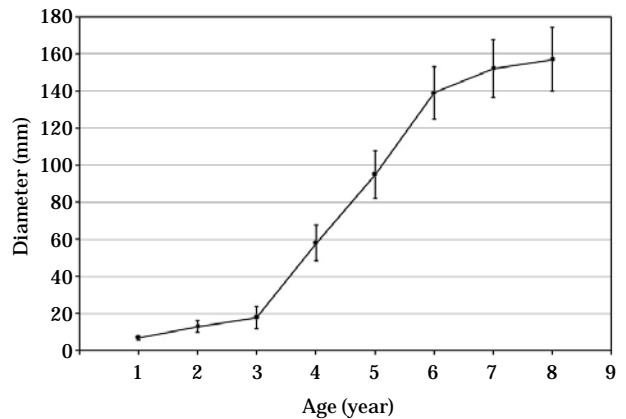


Fig. 3. Growth curve of *Salix nipponica* in our study site (JH1, 2, and 3) in Janghang wetland.

Table 1. Dry mass estimations for *Salix nipponica* from allometric equations for six individuals. *Ws* stands for dry mass for stems, *Wb* for branches and *Wl* for leaves.

Number	DBH (cm)	Tree height (m)	D ² H	Ws (kg)	Wb (kg)	Wl (kg)	Total biomass (kg)
1	16.0	9.2	2355.2	32.14	1.15	2.88	36.18
2	12.0	7.5	1080.0	14.34	0.81	1.70	16.86
3	10.0	6.6	660.0	8.61	0.65	1.22	10.48
4	7.0	6.8	333.2	4.24	0.47	0.77	5.49
5	5.0	5.0	125.0	1.53	0.30	0.40	2.24
6	3.0	3.0	27.0	0.31	0.15	0.14	0.61

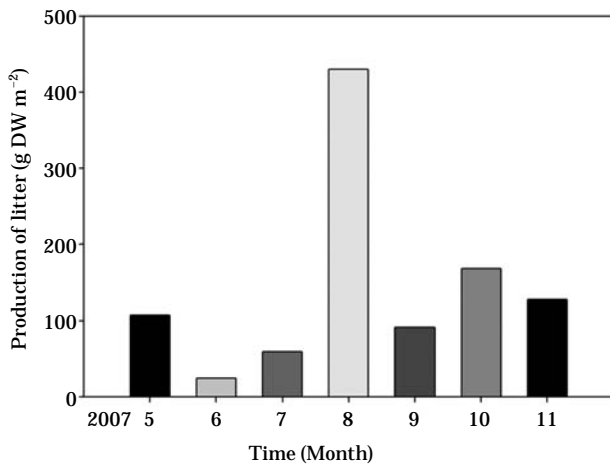


Fig. 4. Monthly production of litter estimated at JH1 in *Salix nipponica* in Janghang wetland.

났으며 이는 조사연도 차이에 따라 연간생장률이 반영되었고, 2005년의 1회의 장기침수로 인한 성장저하와 2007년 여름의 빈번한 강우와 강풍 등으로 인한 낙엽량의 일시적 증가에 기인한 것으로 해석된다. 장항습지의 선버들군락의 잎에서 분석된 평균 탄소량은 40.85%이었으며 이를 낙엽생산량으로 환산하면 연간 선버들 잎에서 공급되는 내생유기물량은 359 g C m⁻² yr⁻¹이라고 할 수 있다. 선버들군락 내의 외생유기물은 관측결과 홍수기에만 퇴적이 일어났으며, 그 외에는 조석에 의해 주기적으로 조수가 유입되지만 유입수의 유속이 느리고 유출수의 유속이 빨라서 침식우세를 보였다. 그러므로 홍수 직후의 퇴적량을 연간 퇴적량으로 간주하였고 선버들군락의 침수는 3년 동안 단 1차례 관찰되었으며 이로 인한 토사 퇴적 깊이는 0.3m이었다. 그러므로 이를 3년간의 퇴적량으로 간주하면 연간 평균 퇴적량은 0.1 m³ m⁻² yr⁻¹이다. 측정된 저토의 가비중(bulk density) 0.36 g DW cm⁻³를 이용하면 연간 유입되는 외생유기물량은 36 kg DW m⁻² yr⁻¹이라고 할 수 있다. 장항습지의 저토의 탄소 조성을 이용하여 측정한 평균 탄소량은 0.966%이었기에 외생 유기탄소량은 347 g C m⁻² yr⁻¹이라고 할 수 있다.

4. 말뚝게 (*Sesarma dehaani*)의 2차생산성

말뚝게의 채집 시기별, 크기 그룹별 성장률 추정 결과를 Table 2에 제시하였다. 대체로 8~10월의 기간에 성장을 하고 10월부터 이듬해 5월까지 감소하는 것으로 나타났다.

말뚝게의 크기 그룹별 개체당 생산성을 추정한 결과, 말뚝게 1개체의 연간 생산성(g FW ind.⁻¹ yr⁻¹)은 크기

그룹별로 연간 0.07~19.70 g FW의 범위이며, 10~20 mm 크기 그룹(G₁)에서 가장 낮고, 30~40 mm 크기 그룹(G₃)에서 가장 높은 것으로 나타났다. 각 크기 그룹별 개체수의 분포가 균등할 경우에 단위면적당 서식밀도에 개체당 생산성 평균인 5.6 g FW ind.⁻¹ yr⁻¹을 활용할 수 있으나, 장항 습지의 말뚝게의 분포는 버드나무군락, 갈대군락, 수로에 따라 밀도가 균등하지 않은 것으로 나타났다(Fig. 5).

말뚝게의 크기별 개체수 분포는 그룹 1에서 가장 높고(평균, 12.3 ind. m⁻², 38.6%) 크기가 클수록 낮아지는 것으로 나타났다. 그룹 2부터 4까지의 평균 개체수는 각각 7.3 ind. m⁻² (22.9%), 4.0 ind. m⁻² (12.5%) 그리고 8.3 ind. m⁻² (26.0%)이었다(Fig. 5). 장항 습지에 서식하는 말뚝게의 서식 밀도 및 생체량은 각각 32 ind. m⁻², 136 FW g m⁻²으로 추정되었다.

개체수 분포를 고려하여 Table 3과 같이 장항 습지에서 발생하는 말뚝게의 2차생산성을 추정하였다. 이곳에서 발생하는 말뚝게의 단위면적당 연간 생산성은 100.2 g FW m⁻² yr⁻¹이며, 버드나무림의 면적 0.71 km²에서 총 71.11 ton FW yr⁻¹의 생산이 발생하는 것으로 나타났다.

고 찰

지금까지 담수습지에 생육하는 선버들군락의 1차생산성은 2,530 g DW m⁻² yr⁻¹(김 등, 1999)로 보고되었는데 이는 국내 육상 자연림의 최고치(굴참나무군락, 2,330 g DW m⁻² yr⁻¹)나 인공림의 최고치(편백나무조림지, 2,350 g DW m⁻² yr⁻¹)보다 높은 값을 나타낸다(박 등, 1996; 박 등, 2000). 그 이유는 선버들이 다른 육상 수목에 비해 개엽 시기가 빠르고 낙엽시기가 늦어 성장기간이 긴 식물계절학적 특징과 함께, 동화조직의 비율은 높은 반면 생식에는 적은 투자를 하는 특성 등을 가지고 있기 때문이라고 해석되었다(김 등, 1999). 그러나 장항습지 선버들군락의 1차생산성은 4,477 g DW m⁻² yr⁻¹으로서 기존에 보고된 선버들군락의 생산성과도 큰 차이를 보이고 있으며 그 이유로 상대적으로 높은 밀도(평균 0.97 ind. m⁻²)와 동화조직의 비율이 높은 유식물의 구성비(90%)에서 기인했을 것(김 등, 1994)이라 판단할 수 있다. 또한 국내의 낙동강하구 세모고랭이군락에서 보고된 1차생산성은 538 g DW m⁻² yr⁻¹(안 등, 2006)로서 역시 매우 큰 차이를 보이고 있으며 이는 초본과 목본의 생산성의 차이로 해석할 수 있다.

이러한 장항습지 선버들군락의 높은 1차생산성은 한강하구 영양소 순환에 매우 중요하다. 본 실험결과 선버들

Table 2. Annual individual productivity of grapsid crab, *Sesarma dehaani* in Janghang wetland with units of g FW ind.⁻¹ yr⁻¹.

Size group	Delta t (day yr ⁻¹)	Mean individual weight (g FW)	Specific growth rate (yr ⁻¹)	Productivity (g FW ind. ⁻¹)
Size group I				
2006. 9~10	0.08	2.95	3.67	0.89
2006. 10~2007. 3	0.41	3.14	-0.40	-0.52
2007. 3~4	0.08	2.83	-0.40	-0.10
2007. 4~5	0.08	2.72	-0.53	-0.12
2007. 5~6	0.08	2.70	0.37	0.08
2007. 6~7	0.08	2.80	0.46	0.11
2007. 7~8	0.08	2.78	-0.62	-0.15
2007. 8~9	0.08	2.64	-0.59	-0.13
Total productivity				0.07
Size group II				
2006. 9~10	0.08	10.37	3.99	3.40
2006. 10~2007. 3	0.41	11.39	-0.28	-1.33
2007. 3~4	0.08	10.09	-1.50	-1.29
2007. 4~5	0.08	9.32	-0.33	-0.25
2007. 5~6	0.08	8.82	-0.98	-0.74
2007. 6~7	0.08	8.64	0.50	0.36
2007. 7~8	0.08	9.15	0.85	0.66
2007. 8~9	0.08	9.62	0.36	0.29
Total productivity				1.11
Size group III				
2006. 9~10	0.08	26.27	1.91	4.12
2006. 10~2007. 3	0.41	27.16	-0.21	-2.34
2007. 3~4	0.08	28.22	1.87	4.47
2007. 4~5	0.08	28.22	-1.93	-4.47
2007. 5~6	0.08	29.32	2.69	6.69
2007. 6~7	0.08	30.25	-1.94	-4.81
2007. 7~8	0.08	30.82	2.27	5.95
2007. 8~9	0.08	31.54	3.77	10.09
Total productivity				19.70
Size group IV				
2006. 9~10	0.08	45.21	0.11	0.40
2006. 10~2007. 4	0.50	44.59	-0.07	-1.63
2007. 4~5	0.08	43.78	0.00	0.00
2007. 5~7	0.17	43.78	0.00	0.00
2007. 7~9	0.17	45.14	0.36	2.74
Total productivity				1.50

군락으로부터 저토로 공급되는 내생유기물량은 359 g C m⁻² yr⁻¹이었으며 외부로부터 유입되는 외생유기물량은 347 g C m⁻² yr⁻¹으로 나타나 내외생유기물의 비는 약 1:1의 비율을 보였다. 그러나 이 측정치는 3년간 1회의 선버들군락의 침수결과를 반영하고 있으며, 실제로는 홍수주기와 측정시기에 따라 연중 편차는 매우 클 것으로 예상된다. 특히 비침수기에는 선버들군락으로부터 공급되는 내생유기물이 영양소 공급의 대부분을 차지할 것으로 판단된다.

국내에서는 대형저서무척추동물의 2차생산성에 대한

연구가 빈약한 편이나 홍과 박(1994)이 추정된 송도 갯벌의 연체동물 이매패류, 맛조개 (*Solen strictus*) 생산성 추정치인 33.22 g FW m⁻² yr⁻¹에 비하면 말뚝게의 생산성은 3배 이상 높은 것이다. 신과 고(1995) 역시 송도 갯벌에서 높은 생산성과 어획량을 기록하는 이매패류, 동죽 (*Macrta veneriformis*)의 생산성을 67.9 g FW m⁻² yr⁻¹로 추정하였다. 위의 연구들이 행해진 송도 갯벌은 우리나라 갯벌 가운데에서도 생산성이 매우 높고, 이매패류 두 종의 기여도 역시 매우 높은 것으로 알려져 있다(Yoo, 1998). 장항습지에 서식하는 말뚝게의 생산성은 100.2 FW

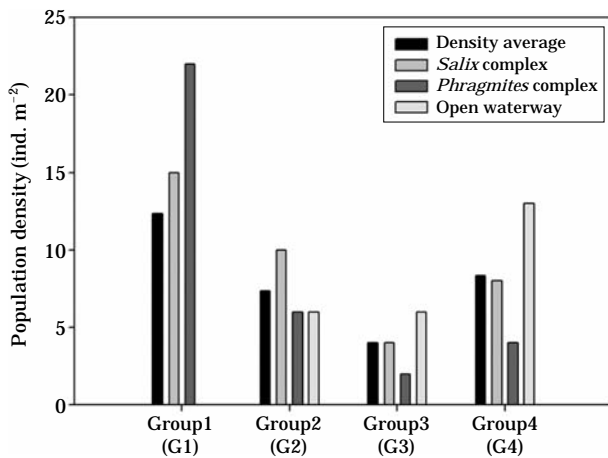


Fig. 5. Size group specific densities of *Sesarma dehaani* in different habitats in Janghang wetland.

Table 3. Annual productivity (g FW m⁻² yr⁻¹) of grapsid crab, *Sesarma dehaani* in Janghang wetland.

	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
Individual production	0.07	1.11	19.70	1.50
Individual distribution among size groups (Avg. no. indiv. m ⁻² =32)	12.30	7.30	4.00	8.30
Productivity by size group	0.83	8.10	78.80	12.43
Total annual productivity	100.16			

C m⁻² yr⁻¹으로 추정되어 위의 두 종에 의해 발생하는 생산성의 합산 값에 필적하는 것은 말뚝계의 생산성 수준이 매우 높음을 짐작하게 하는 것이다. 이들의 생산성은 이곳의 유기물 생산 역시 왕성하기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

본 연구를 통해 장항습지의 선버들군락이 국내 목본 우점 습지생태계 중 최고의 1차생산성을 가짐을 보였고, 선버들군락 내에 서식하는 말뚝계의 2차생산성은 국내 대형저서무척추동물의 생산성에 비해 매우 높음을 확인하였다. 또한 선버들군락 내 말뚝계의 2차생산성은 1차생산성의 약 2.1% 수준이었으며 이들의 생산성은 서로 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되었다. 버드나무림 하부에 서식하는 말뚝계의 서식굴은 지표면 1m² 당 0.22m³의 통기공간을 만들고 있는 것으로 파악(미발간자료) 되었으며 이로 인해 선버들의 근계의 통기성을 높여 1차생산성을 높이는 데 도움을 주었을 것으로 추측할 수 있다. 또한 선버들에서 유래하는 내생유기물의 일정량은 말뚝계의 배변을 통해 저토로 공급되고 이는 선버들의 생장에 도움을 주었을 것으로 추측된다.

선버들군락 하부에 서식하는 말뚝계의 2차생산성과 단위 면적당 현존량을 근거로 구해진 생산량-생체량 전환율(P/B ratio)은 0.74 정도이다. 이는 Gray (1981)가 제시한 대형저서동물 개체군 별 전환율 범위(0.1~5.5)와 비교하면 다소 낮은 수준에 해당하는 것이다. 그러나 본 연구에서 0~10 mm 범위의 개체들이 제외되었음을 감안하면 이 추정치는 과소평가된 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 알려진 대형저서동물의 섭식-생체량 비율(Q/B ratio)은 9~20 정도의 범위를 갖는데, Wilson and Parkes (1998)가 Dublin Bay 생태계 모형에서 추정된 비율인 16을 적용하면, 단위 면적당 약 140 g FW의 말뚝계 개체군은 연간 약 2,140 g FW, 장항습지 전체면적(0.71 km²)에서는 약 1,519 ton FW의 먹이를 소비하는 것으로 예측할 수 있다.

말뚝계의 2차생산성을 Dr. Thomas Brey's virtual handbook (<http://www.thomas-brey.de/science/virtualhandbook/>)에 제시된 십각류 습중량-회분체거중량 전환율(0.180)과 저서동물의 회분체거중량-유기탄소 전환율(0.518)을 고려하면, 유기탄소 현존량은 약 13 g C m⁻²이 된다. 이 양에 Q/B ratio, 16을 적용하면 말뚝계의 연간 섭식량은 약 208 g C m⁻² yr⁻¹가 된다. 이 값은 선버들군락의 유기물 공급량, 약 700 g C m⁻² yr⁻¹의 30%, 내생 유기물 공급량의 60%에 해당한다. 현장 조사에서 관찰된 말뚝계의 섭식(선버들 잎에 대한 집중적인 섭식), 그리고 말뚝계의 갯도 서식활동에 의해 발생하는 '+'의 피드백(퇴적물 내 통기 작용)은 이 두 가지 생물학적 구성원 간의 강력한 상호 작용의 존재를 시사하는 것이다.

일반적으로 자연 서식처의 생물 구성원을 강한 상호 작용자와 약한 상호 작용자로 구분할 수 있으며, 약한 상호 작용자가 다수로 존재하는 시스템이 강한 상호작용자가 우세한 곳보다 높은 안정성을 갖는 것으로 알려져 있다 (May, 1973; Berlow, 1999). 선버들군락에 서식하는 대형저서동물 군집의 낮은 생물다양성(김포시, 2008)은 에너지 흐름의 경로가 단순하며, 약한 상호작용자가 소수로 존재함을 의미하는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 앞서 언급된 말뚝계와 선버들군락 간의 상호 간 높은 의존성과 약한 상호작용자의 군집 안정성 역할에 대한 가설을 고려하면, 장항습지의 선버들군락은 구조적 안정성이 취약하며 관리의 필요성이 매우 높은 시스템이라고 할 수 있다.

본 연구를 통해 한강하구 장항습지 선버들군락과 말뚝계의 높은 생산성 그리고 이들 간에 존재하는 강한 상호 작용을 추정할 수 있었다. 이후 버드나무와 말뚝계와의 직접적인 관련성을 밝히기 위해서는 말뚝계와 버드나무를 중심으로 한 한강하구의 먹이그물 및 에너지 흐름

(Heymans and Baird, 1995)에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

적 요

한강하구 장항습지의 선버들군락의 현존량과 1차생산성을 상대성장법(allometry)과 기저 단면의 나이테를 이용하여 추정하였으며, 버드나무류 하부에 서식하는 말뚝계 개체군의 2차생산성을 추정하였고 두 개체군 간의 관계성을 해석하였다. 선버들군락의 지상부 1차생산성은 $4,777 \text{ g DW m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로서 국내에서 최고의 생산성을 나타내었다. 장항습지에서 선버들에 의해 저토로 공급되는 내생유기물량은 $359 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이며 외생유기물량은 $347 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 말뚝계의 2차생산성은 $100.2 \text{ g FW m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 선버들 군락의 지상부 1차생산성의 2.1%로 나타났다. 선버들군락 내 말뚝계의 생물량은 140 g FW m^{-2} 이며 이들의 연간 먹이소비량은 약 $2,140 \text{ g FW yr}^{-1}$ 이고, 말뚝계의 연간 섭식량은 약 $208 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 추정하였다. 본 연구로부터 장항습지의 주요 생물구성원인 선버들군락과 말뚝계의 높은 생산성을 확인하였다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-0050313).

인 용 문 헌

고양시. 2005. 한강하구 하천생태계 연구. 고양시.
 김준호. 1970. 육상식물의 생산력 추정을 위한 상대성장법의 이용에 대하여. 한국식물학회지 **13**: 47-55.
 김준호, 문형태, 서계홍, 민병미. 1994. 농업의 공익적 기능에 관한 연구. 과학기술원, 서울.
 김철수, 이팔홍, 오경환. 1999. 선버들의 생산성과 생산구조. 한국습지학회지 **1**: 61-69.
 김태권. 2006. 우포늪 지역에서 버드나무류의 군집구조와 1차 생산성. 경상대학교 교육대학원 석사학위논문. 33pp.
 김포시. 2008. 한강준설사업 사후환경영향조사 결과 보고서. 김포시. 252pp.
 박인협, 이돈구, 이경준, 문광신. 1996. 참나무류의 성장 및 물질생산에 관한 연구(I). 경기도 광주지방의 굴참나무, 상수

리나무, 떡갈나무, 신갈나무 천연림을 대상으로. 한국임학회지 **85**: 76-83.
 박인협, 임도형, 유철봉. 2000. 편백 유령 인공림의 임령에 따른 물질생산 및 무기양료 분배. 한국임학회지 **89**: 85-92.
 신현출, 고철환. 1995. 서해 송도 갯벌에서의 동죽(*Macra veneriformis*: Bivalvia)의 성장과 생산. 한국해양학회지 **30**: 403-412.
 안순모, 이지영, 정신재. 2006. 낙동강 하구 갯벌에 생육하는 세모고랭이(*Schoenoplectus triqueter*)의 생체량 및 탄소, 질소 함량의 계절 변화. 한국습지학회지 **8**: 39-49.
 이팔홍. 2002. 하천변에 분포하는 버드나무속의 성장 특성과 군집 동태. 경상대학교 대학원 생물학과 박사학위논문.
 홍재상, 박홍식. 1994. 인천연안 간석지산 주요 저서생물의 성장과 생물생산 II. 척전지역 간석지에 서식하는 맛조개(*Solen strictus*)의 생물 생산. 한국수산학회지 **27**: 560-571.
 환경부 국립환경연구원. 2005. 2004 하구역생태계 정밀조사. 환경부.
 Argus, G.W. 1974. An experimental study of hybridization and pollination in *Salix* (willow). *Canadian Journal of Botany* **52**: 1613-1619.
 Beerling, D.J. 1998. *Salix herbacea* L. *Journal of Ecology* **86**: 872-895.
 Berlow, E.L. 1999. Strong effects of weak interactions in ecological communities. *Nature* **398**: 330-334.
 Bishop, S.C. and F.S. Chapin, III. 1989. Establishment of *Salix alaxensis* on a gravel pad in arctic Alaska. *Journal of Applied Ecology* **26**: 575-583.
 Crisp, D.J. 1984. Energy flow measurements, p. 284-372. *In*: Methods for the Study of Marine Benthos (Holme, N.A. and A.D. McIntyre, eds.) Blackwell Scientific Publications, Oxford.
 Densmore, R. and J.C. Zasada. 1983. Seed disposal and dormancy in northern willows: ecological and evolutionary significance. *Canadian Journal of Botany* **61**: 3207-3216.
 Gray, J.S. 1981. The ecology of marine sediments. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 185pp.
 Heymans, J.J. and D. Baird. 1995. Energy flow in the Kromme estuarine ecosystem, St Francis Bay, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **41**: 39-59.
 Kristensen, E. and D.M. Alongi. 2006. Control by fiddler crabs (*Uca vocans*) and plant roots (*Avicennia marina*) on carbon, iron, and sulfur biogeochemistry in mangrove sediment. *Limnology and Oceanography* **51**(4): 1557-1571.
 Lee, S.Y. 1997. Potential trophic importance of the faecal material of the mangrove sesarmine crab *Sesarma mesasa*. *Marine Ecology Progress Series* **159**: 275-284.
 Lee, S.Y. 1998. Ecological role of grapsid crabs in mangrove

- ecosystems: a review. *Marine Freshwater Research* **49**: 335-343.
- May, R.T. 1973. Stability and complexity in model ecosystems. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ.
- McLachlan, A. and E. Jaramillo. 1995. Zonation on sandy beaches. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* **33**: 305-335.
- Niiyama, K. 1987. Distribution of Salicaceous species and soil texture of habitats along the Ishikari River. *Japan Journal of Ecology* **37**: 163-174.
- Smith, T.J. III, K.G. Boto, S.D. Frusher and R.I. Giddens. 1991. Keystone species and mangrove forest dynamics: the influence of burrowing by crabs on soil nutrient status and forest productivity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **33**: 419-432.
- Vanninia, M., S. Cannicci and K. Ruwa. 1995. Effect of light intensity on vertical migrations of the tree crab, *Sesarma leptosoma* Hilgendorf (Decapoda, Grapsidae). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **185**: 181-189.
- Wilson, J.G. and A. Parkes. 1998. Network analysis of the energy flow through the Dublin Bay ecosystem. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* **98B**: 179-190.
- Yoo, J.W. 1998. The spatial distribution and long-term variation of macrofaunal communities on macrotidal flats in the west central coast of Korea. Ph. D. thesis, Inha Univ. 352pp.

(Manuscript received 29 April 2010,

Revision accepted 1 June 2010)