J. Kor. Fish. Soc. 39(Special Issue), 180-188 한수지, 39(특집호), 180-188, 2006

강화 동검도 염습지 식생의 분포와 저서환경조건의 시·공간적 변화

이형곤* · 박흥식 · 홍재상[1] · 제종길 · 이재학
한국해양연구원 해양환경연구본부, [1]인하대학교 자연과학대학 해양학과

Spatio-temporal Variation in the Benthic Environmental Conditions and Salt Marsh Vegetation in Donggeomdo, Incheon, Korea

Hyung-Gon LEE*, Heung-Sik PARK, Jae-Sang HONG[1], Jong-Geel JE and Jae-Hac LEE
Marine Environment Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea
[1]Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea

We examined the effect of salt marsh vegetation on the benthic environment in macro-tidal flats at Donggeomdo, Ganghwa, on the west coast of Korea. Nine stations were established along a transect across the tidal flats, including salt marsh, and field sampling was conducted monthly from July 1997 to June 1998. During the study period, environmental parameters fluctuated as follows: salinity, 15.0 to 28.2 psu, exposure time, 613 to 702 hr/m, inundation time, 28 to 117 hr/m, sediment organic carbon, 0.71 to 1.34%, nitrogen, 0.07 to 0.16%, sulfur from 0.07 to 0.22%, mean grain size from 6.3 to 6.9 ø, water content from 19.4 to 44.4%, water temperature from 4.4 to 20.4℃ and temperature of the surface sediments, 2.7 to 31.1℃, in total, seven halophyte species were sampled and found to be vertically distributed across the tidal levels. *Carex scabrifolia*, *Suaeda maritima*, *Limonium tetragonum* and *Phragmites communis* dominated the upper zone of the salt marsh, *Juncus haenkei*, *Triglochin maritimum* and *P. communis* dominated the middle zone, and *Suaeda japonica* predominated in the lower area. Principal component analysis (PCA) and non-metric multi-dimensional scaling revealed that the zonation of halophytes was related to environmental variables such as salinity and exposure time. The halophyte communities were likely related to the organic content of the surface sediment.

Key word: Salt marsh, Halophytes, Benthic environmental conditions, Donggeomdo, Ganghwa

서 론

하구역에 형성되는 광활한 갯벌의 발달은 다양한 생물이 서식할 수 있는 환경여건을 제공하고 있으며, 그 주변부에는 일정 면적을 점유하여 서식하는 염습지 식생 생태계가 출현한다. 염습지 식생 지역은 지형학적으로 하구 갯벌에 의해 보호된 해안에 위치하고 있어(Lana and Guiss, 1992), 외해의 파랑 등 외부환경에 노출되지 않고 강의 흐름과 조류에 따라 유동하는 많은 부유 입자성 퇴적물이 퇴적되는 곳이다. 이러한 지역은 비교적 퇴적환경이 안정되고, 육상으로부터 풍부한 영양염이 유입되어 염생식물 군락이 발달하기에 이상적인 환경조건을 갖는다(Vogl, 1966; Del Moral and Watson, 1978; Kim et al., 1989).

서해안에는 크고 작은 강들이 많아 하구역에 인접한 염생식물 군락지가 여러 곳에서 나타나고 있다. 그러나 장기적인 연안 간척 활동으로 인해 해안에 자연 상태를 그대로 유지하고 있는 염습지 식생은 그리 많지 않은 실정이다. 국내 염습지 식생에 대한 조사는 주로 간척과 매립이 활발히 진행되었던 서해안을 중심으로, 대부분 간척지 내 염생식물의 분포와 역할 및 천이과정을 대상으로 한 연구였으며, 자연 상태의 염습지 식생과 서식지 환경에 대한 연구는 많지 않았다.

Hong (1956)은 최초로 인천과 영종도 주변 해안 식생 분포에 대해 조사하였다. 강화도 염습지의 식생 조사는 Hong et al. (1970)이 활발한 간척사업으로 형성된 강화도 초지리의 염생식물 군락 내의 고염분 토양에서 식생을 이용한 염분 제거방법을 실험하였다. 1980-1990년대에는 간척지 내 식물 종자의 내염성과 발아(Kim, 1980), 토양환경과 염생식물 군집(Kim and Min, 1983; Min, 1985; Ihm, 1987), 염생식물의 무기염류 축적과 순환(Min and Kim, 1983), 갈대와 산조풀의 개체군 동태(Choung and Kim, 1991) 연구 등 식생에 대한 연구가 다양하게 이루어졌다.

본 연구는 갯벌 생태계의 일부분을 점유하고 있으나, 또 다른 하나의 생태계를 구성하여 갯벌 생태계 일부 기능과 역할을 담당하는 염습지 내 식생의 분포와 저서환경조건의 시·공간적 변화 특성에 대해 밝혔다.

연구지역 배경

한강 하구역에 위치한 강화도 남단 갯벌은 총 면적이 약

*Corresponding author: hglee@kordi.re.kr

90 km^{2}로 간조시 노출되는 갯벌의 폭이 약 3 km이며, 서쪽으로 갈수록 증가하여 최대 노출시 약 4.5 km에 이른다. 연구지역인 동검도는 강화도 남단 갯벌의 동남부에 위치하는 작은 섬으로 위도 37°34'60"-35'70", 경도 126°30'50"-31'80"에 놓여 있다. 면적은 1.81 km^{2}로 총 해안선의 길이가 6.5 km이며, 인구는 60가구 150여명이 상주 한다(Choi et al., 1997). 연 평균 강수량은 95.7 mm이며, 7월에 평균 363 mm로 집중호우 현상을 보이며, 겨울철에 상대적으로 건조하여 1월에 평균 7.0 mm로 매우 적은 강수량을 보인다(KMA, 1991-1996). 동검도 북측 해안은 강화도 길상면의 남측 해안과 수로를 사이에 두고 연육교로 연결되어 조류의 소통이 막혀 있는 상태이며, 남동쪽 해안에는 한강의 한 지류로서 강화도와 김포반도 사이에 두고 폭이 300-1,000 m인 염하수로가 흐르고 있다. 조사지역의 조간대 하부는 염하수로와 동검수로가 교차하는 지역에 위치하고 있어 상류로부터 유입되는 부유성 퇴적물 입자가 쌓여 넓은 펄 갯벌이 펼쳐져 있다. 해안선의 많은 부분이 석축방파제(sea wall)를 쌓아 농지로 이용되고 있으며, 부분적으로 적은 규모의 자연 상태 해안선이 형성되어 있다. 본 조사 지역도 주변에 석축방파제가 존재하나 비교적 자연 상태의 염생식물 군락이 해안선을 따라 20-30 m의 폭으로 약 1 km 정도 형성되어 있다.

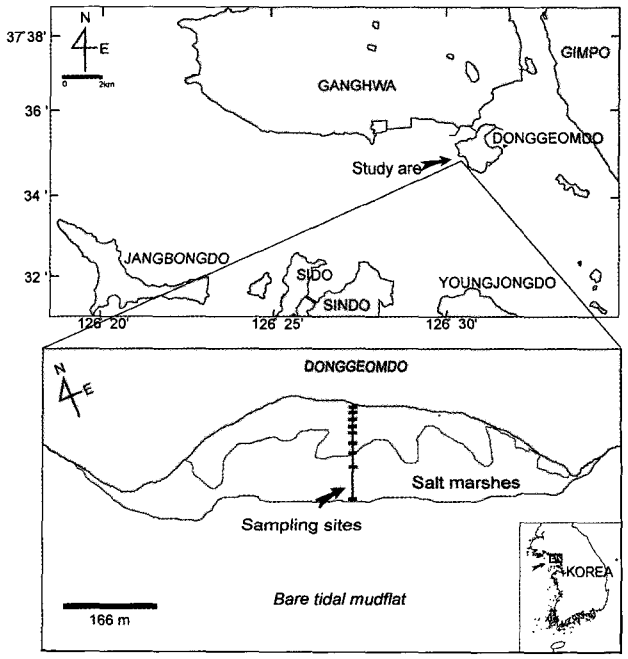

Fig. 1. Location of the study area and a transect of sampling sites in a salt marsh, Donggeomdo, Ganghwa, Korea.

재료 및 방법

강화도 남동부에 위치한 동검도 갯벌조간대 상부에 형성된 염습지의 식생과 저서동물의 분포양상을 파악하고 환경과의 상호관계를 규명하기 위한 조사의 일환으로 염습지 식생 분포와 생태학적 저서환경요인을 조사하였다(Fig. 1). 조사기간은 1997년 7월부터 1998년 6월까지 12개월 동안 월별 또는 계절별 조사를 수행하였다. 조사지역은 비교적 자연 상태의 염생식물 서식처가 잘 보전된 지역으로 저조선을 향해 한 개의 정선(transect line)을 선정하고, 최상부 석축방파제에서 약 1 m 거리의 기준점 이후 1, 3, 5, 7, 9, 15, 20, 34, 166 m 지점에 9개 정점을 선정하였다.

염습지 식생 환경의 측정

수온은 수로기술연보 자료(NORI, 1991-1996)와 현장측정 자료(1997. 7-1998. 6)를 이용하였으며, 퇴적물 온도는 디지털 전자온도계(HANNA, Model 9063)를 사용하여 퇴적물의 0.5 cm (표층), 5 cm, 15 cm 깊이로 3회씩 반복 측정 후 평균값을 사용하였다. 염분농도는 염습지 식생 내에서 1997. 7월-1998. 6월까지 월별로 각 조사 정점의 공극수를 채수한 후 굴절계(Model: S/Mill-E)를 이용 정점별 3회씩 반복 측정 후 평균값을 이용하였다. 함수량은 매월 일정량의 퇴적물을 표층과 수직으로 깊이 7 cm까지 정점별로 채취하였으며, 채취한 저질시료를 건조기(dry oven)를 사용하여 105℃에서 24시간 동안 건조시킨 후, 건조 전후의 무게 차로 수분함량을 구하고, 이를 건조 전 무게에 대한 백분율로 나타내었다. 입도 분석은 1997년 7월과 10월, 1998년 1월과 4월 등 계절별 각 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 시료 중 5 g를 비이커에 담아 10%의 H_2O_2로 유기물과 0.1 N HCl로 탄산염을 제거하였다. 시료를 4 ø체로 조립질과 세립질로 구분하고 4 ø 이하의 사질시료는 Ro-tap sieve shaker로 15분간 체질 후 입도 등급별로 무게 백분율을 구하였으며, 4 ø 이상의 니질시료 2 g에 0.1% calgon 용액을 넣고 교반시킨 후 X-선 자동입도 분석기인 Sedigraph 5000D를 이용하여 입도무게 백분율을 Folk and Ward (1957)의 Inclusive graphic method에 의하여 변수를 구하였다. 유기물 분석은 1997년 7월과 10월, 1998년 1월과 4월 등 계절별로 각 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 퇴적물 내의 유기탄소(Organic carbon), 질소(Nitrogen), 황(Sulfur)을 분석하였다. 시료를 105℃로 건조시킨 후 약 5 g을 취하여 200 μm 정도의 입자 크기로 갈아서 분말 형태로 만든다. 분말 시료를 건조기에서 105℃로 24시간 건조시켜 수분을 제거 한 후 대기온도와 같도록 식히고 동일 시료 10 mg을 Tin sample container(주석캡슐)에 담는다. 전처리가 완료된 시료를 Carlo Erba NA1500 CNS Analyzer를 이용하여 분석하였다. 분석된 자료는 BCSS-1 (Marine sediment : N (0.205%), C (2.102%), S (0.36%)인 표준물질로 보정하여 최종 값을 얻었다. 노출시간 산정을 위해 국립지리원의 수준점을 기준으로 표척(staff)과 수준의(Pentax Pal 2S Level)를 이용하여 표고(elevation)를 측량하였으며, 각 정점 표고의 조위(tidal level)를 나타내었다. 노출시간은 조사기간 동안 시간 단위로 인천항의 조위를 측정한 한국국립해양조사원(NORI)의 실측자료를 이용하여 조사정점의 조위에 따른 총 노출시간을 Excel program을 이용하여 계산하였다.

염생식물의 채집 및 자료 분석

염생식물은 채집 면적이 0.25 m^3 (50×50 cm)의 방형구를 이용하여 종별 피도(coverage)를 조사하였으며, 방형구 안의 종은 구분 없이 줄기의 밑단을 절단하여 채집하고 지하부는 15-30 cm 깊이까지 퇴적물과 함께 전량 채집하였다. 채집된 염생식물은 실험실에서 퇴적물과 같은 이물질을 제거한 후, 줄기와 뿌리의 습중량(wet weight) 측정 후 건조기에서 80℃로 72시간 동안 건조시켜 건중량(dry weight)을 측정하였다. 중량 측정에는 0.001 g 단위까지 측정이 가능한 전자저울(OHAUS, TP200)을 사용하였다. 염생식물의 월별 건중량 자료를 이용하여 이를 대수변환 후 Bray-Curtis similarity를 이용 WPGMA (weighted pair group method)로 정점간의 관계를 수지도로 작성하였다. 염습지 식생 분포에 영향을 미치는 환경요인 분석을 위해 환경 변수간 Pearson correlation coefficients를 이용한 Draftsman Plot analysis로 변수간 상관성 95% 이상 자료를 제거한 후 채택된 자료와 식생분포와의 상관성 파악을 위해 상관분석(Spearman rank correlation coefficient, SigmaStat 3.1)과 주성분 분석(PCA, principal component analysis, Xlstat 5)을 하였다. 또한 개체들의 특성을 측정한 후 그 특성을 이용하여 개체들 사이의 비유사성(dissimilarity)을 측정하고 개체들을 2차원 또는 3차원의 공간상에 점으로 표현하여 개체들 사이의 관계를 추정하는 MDS (non-metric multidimensional scaling) ordination을 하였다(PRIMER-E v5.2.8).

결 과

염습지 내 저서환경

인천 연안의 연평균 수온은 13.4℃, 월 평균 수온은 여름철인 8월에 평균 24.5℃로 가장 높고, 겨울철인 1월에 2.6℃로 가장 낮았다. 조사기간 동안 년 평균 12.5℃로 과거보다 약 1℃ 정도 낮았다. 여름철인 8월에 평균 20.4℃로 가장 높고, 겨울철인 2월에 4.4℃로 가장 낮았다(Fig. 2). 1월의 경우 예년에 비해 3.6℃ 높았으나, 여름철에는 낮은 온도 변화를 나타냈다. 식생 내 퇴적물온도는 수온 변화와 유사한 양상이었으며, 특히 봄철인 3월부터 퇴적물온도가 급격히 증가하였다. 표층 온도의 경우 연평균 20.5℃, 5 cm는 18.9℃, 15 cm는 16.3℃였으며, 층별 온도 변화는 태양복사열이 증가하는 봄철에 가장 많은 온도 차이를 보였고, 9월에는 수온의 하강에도 불구하고 퇴적물온도는 표층의 경우 31.3℃, 5 cm는 30.2℃, 15 cm는 27.9℃를 유지하였다.

조사기간 동안 염습지 식생 내에서 측정한 퇴적물 내 공극수의 염분농도는 년 평균 14.9-27.5 psu 범위를 나타냈다. 특히 강수량이 많은 7, 8월에 평균 15.6 psu로 가장 낮았으며, 강수량이 적은 1월, 2월에는 각각 평균 27.5 psu와 27.1 psu로 가장 높았다(Fig. 2). 조사 정점별 염분농도는 염습지 식생 상부에 위치한 정점 1에서 가장 낮았으며, 하부로 갈수록 증가하였다(Fig. 3).

염습지 식생 내 퇴적물의 함수량은 월 평균 36.3%를 유지하

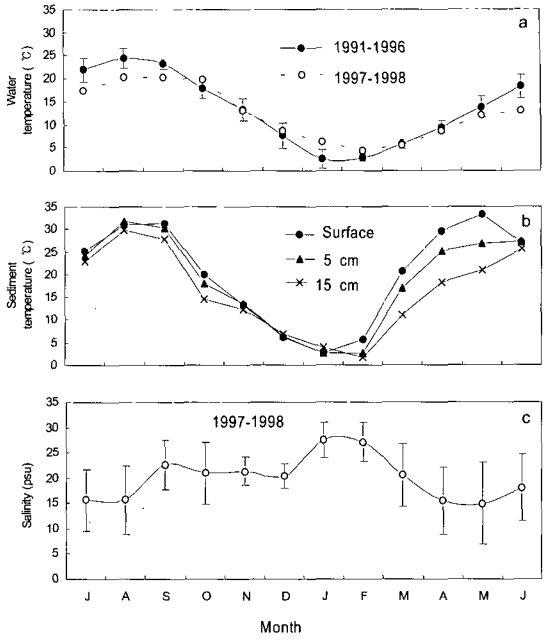

Fig. 2. Monthly variation of water temperature (a), sediment temperature (b) and salinity on Salt marsh (c) in Donggeomdo, Ganghwa, west coast Korea.

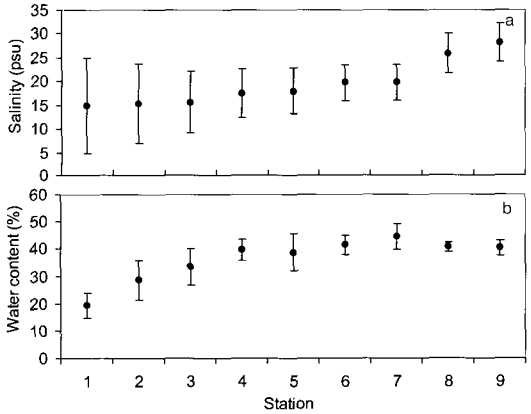

Fig. 3. Variation of salinity of pore water (a) and sediment water contents (b) at each station in the Donggeom salt marsh.

였으며, 여름철에 비교적 높았다. 정점별 함수량은 염습지 하부로 갈수록 증가하는 뚜렷한 구배를 보였다(Fig. 3). 즉 만조선 부근 정점 1에서 가장 낮았으며, 염생식물 혼군락이 끝나고 칠면초 군락이 시작되는 정점 7에서 가장 높았다. 또한 염습지 하부의 칠면초 군락에 위치한 정점 8, 9는 정점 7보다 다소 낮은 40.7%와 40.4%를 나타냈다.

계절별 표층퇴적물의 입도조성과 평균입도(Mz), 분급도(sorting value)를 분석한 결과, 전반적으로 실트(silt)와 점토(clay)가 평균 73%, 모래(sand) 25%, 자갈(gravel) 2%의 조성으로 니질이 우세한 퇴적상을 보였으며, 계절별 큰 차이는 보이지 않았다. 평균입도는 6.3-6.9 ø의 범위였으며, 분급도는 평균 3.2로 분급이 매우 불량한(Very poorly sorted) 상태를 나타냈

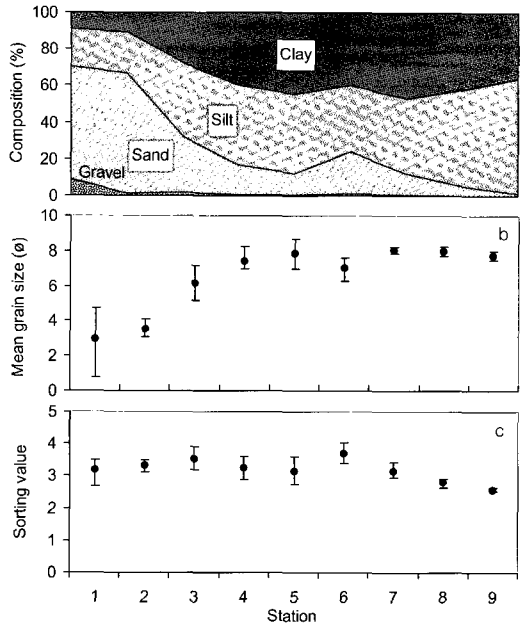

Fig. 4. Sedimentary properties at each station on transect line. (a) Sediments composition, (b) Mean grain size, (c) Sorting value.

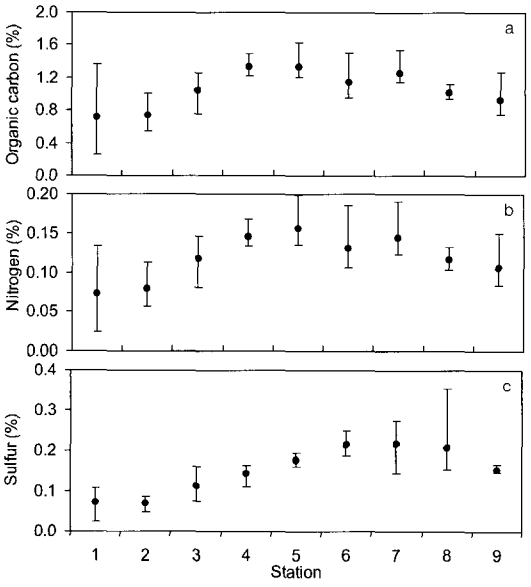

Fig. 5. Spatial variation of organic carbon (a), nitrogen (b) and sulfur (c) of surface sediment at each station.

다. 정점별 입도조성은 모래의 함량이 정점 1, 2에서 가장 높게 나타났으며, 하부로 갈수록 니질이 증가하였다(Fig. 4). 평균입도는 정점 1, 2에서 조립질 퇴적상을 보였으며, 하부로 갈수록 세립질화 되었다. 분급도는 니질 함량이 증가하는 하부 정점 8, 9에서 불량해졌다.

표층퇴적물 내의 유기탄소(C), 질소(N)는 4월에 미미한 증가를 보인 반면, 황(S)은 감소하였다(Fig. 5). 정점별 분포에 있어서 유기탄소는 정점 4, 5에서 평균 1.34% 전후로 가장 높았으며, 상부 정점 1에서 가장 낮은 함량을 보였다. 질소량은 정점 4, 5에서 가장 높고, 정점 1, 2에서 가장 낮았다. 황은 정점 7에서 가장 높고, 정점 1, 2에서 평균 0.07% 전후로 가장 낮았다.

조사기간 동안 고조(high water)와 저조(low water)의 최대조차(tidal range)는 1997년 8월에 1,015 cm를 보였으며, 평균조차(mean range)는 700 cm를 나타냈다. 조사지역이 고조선(high water line)에 위치하여 조위 변화를 고조만을 기준으로 나타냈다(Fig. 6). 연중 25회의 고고조(higher high water)와 저고조(lower high water)의 반복이 이루어졌으며, 각각의 고조가 이루어지는 시기에 조위 변화는 1회는 크고 1회는 작게 나타났다. 정점 1의 조위는 834 cm로 정점 9의 721 cm와는 113 cm의 조차를 나타냈다. 최상부 지점의 노출시간은 일 년 중 8월에 2시간 정도 잠길 뿐 연중 노출된 상태에 있었으며, 정점 1의 노출시간은 월 평균 702시간, 침수시간은 월 평균 28시간이었으며, 정점 9의 노출시간은 월 평균 613시간, 침수시간은 월 평균 117시간이었다. 정점 9를 기준으로 했을 경우 12월에 노출시간이 월 평균 655시간으로 가장 많았으며, 2월에 평균 583시간으로 가장 적었다. 대체로 염습지 식생의 노출시간은 겨울철에 증가하고 여름철에 감소하였다.

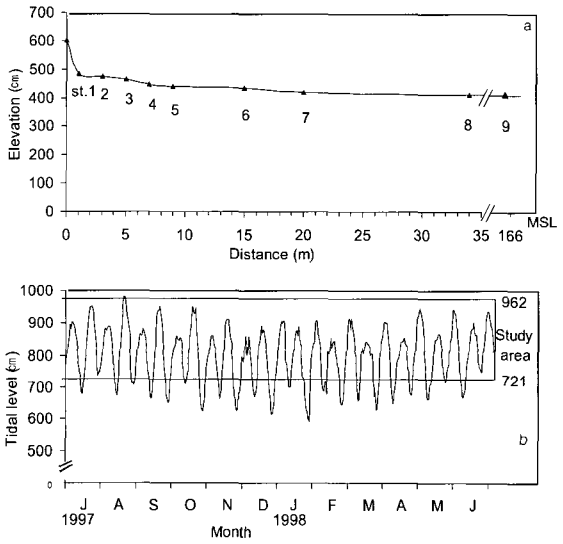

Fig. 6. Elevation profile of the transect line with sampling sites (a) and monthly changes of maximum tidal level (b) in Inchon during the study period.

염습지 식생 분포

강화 동검도 서남쪽 해안에 형성된 염생식물 군락을 조사한 결과, 염생식물은 조위(tidal level)에 따라 일정한 대상분포를 보였다(Fig. 7). 최상부의 조위가 962 cm인 지점과 기준점인 845 cm 사이에는 다년생 식물인 천일사초(*Carex scabrifolia*) 한 종만이 출현하였으며, 그 이후에는 식생이 출현하지 않는 모래언덕(very coarse sand dune)이 형성되었다. 조위 834 cm인

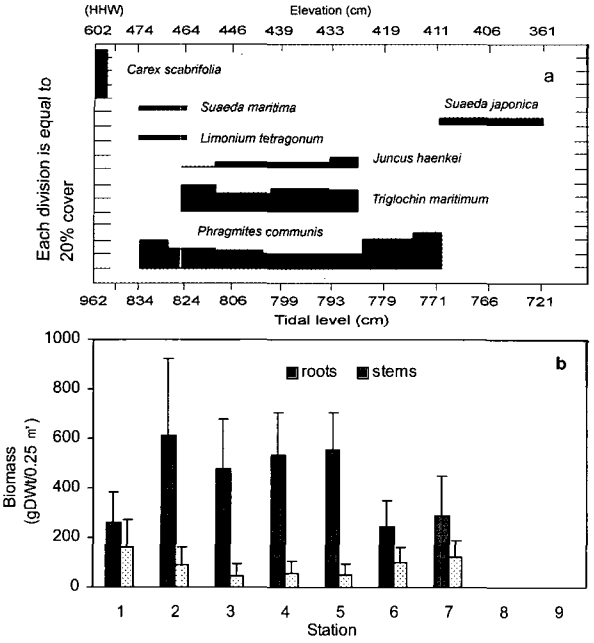

Fig. 7. Coverage of halophytes by elevation (a) and biomass of halophytes at each station (b) in study area.

정점 1과 조위 771 cm인 정점 7 사이에는 다년생인 갈대(*Phragmites communis*)와 다른 종이 혼군락을 형성한 반면, 조위 766 cm와 721 cm인 정점 8, 9는 일년생 칠면초(*Suaeda japonica*)만이 순군락을 형성하였다. 갈대는 정점 1부터 7까지 전 지역에 분포하였으며, 피도는 정점 1에서 40%, 정점 6, 7에서 각각 55%와 58%를 나타내 세 정점에서 높은 점유율을 보였다. 정점 1, 2의 경우 갈대 외에 1년생 해홍나물(*Suaeda maritima*)과 2년생 갯질경(*Limonium tetragonum*)이 5%의 낮은 피도를 나타냈다. 또한 정점 2에서 5까지는 다년생인 갯골풀(*Juncus haenkei*)과 지채(*Triglochin maritimum*)가 갈대보다 높은 점유율을 나타냈다. 갯골풀은 정점 2에서 피도가 3%로 낮았으나, 지채는 30-40%의 범위로 높은 점유율을 나타냈다. 정점 6, 7은 갈대만이 출현하였으며 정점 7을 기준으로 칠면초(*S. japonica*) 군락이 시작되어 정점 8, 9에서 15%로 낮은 피도를 보였다. 식생의 뿌리 건중량은 갯골풀과 지채가 높은 피도를 보이는 정점 2, 3, 4, 5에서 높았으며, 갈대가 우점한 정점 1과 6, 7에서는 낮은 뿌리 건중량을 보였다. 줄기 건중량(dry weight)은 갈대 점유율이 높았던 정점에서 높고, 지채와 갯골풀 점유율이 높았던 정점에서 낮았다. 정점 1에서 161.6 gDWt/0.25 m^2과 정점 6, 7에서 각각 99.5 gDWt/0.25 m^2과 120.9 gDWt/0.25 m^2로 높았으며, 정점 3은 43.4 gDWt/0.25 m^2로 가장 낮았다. 갯골풀과 지채가 갈대보다 피도가 16-41%정도 높고, 높은 뿌리 건중량을 보였던 정점 2, 3, 4, 5에서 줄기 건중량이 낮게 나타났다.

염습지 식생과 저서환경요인

염습지 식생 분포에 따른 생태학적 저서환경 변화 파악을 위해 염습지에 서식하는 식생과 저서동물의 분포에 영향을 미칠 것으로 예상되는 여러 저서환경요인을 분석하였다. 채택된 환경요인 변수들의 분산과 공분산(상관계수)을 이용하여 총 변이를 요약하고 주성분과 같은 서로 독립적인 변수들을 유도하는 주성분분석 결과, 두 주성분은 각각 58%와 25%로 전체 83%의 누적비율을 나타냈다(Fig. 8). 제 1주성분에 적재된 변수들의 고유벡터 값은 노출시간과 사질함량이 각각 0.47과 0.43값을 보여 양의 방향으로 적재되어 나타났으며, 음의 방향으로 적재된 변수의 고유 벡터 값은 -0.46으로 염분이 작용하였다. 제 2주성분에 적재된 고유벡터 값은 퇴적물 표층 온도와 유기탄소량이 각각 0.65와 0.63으로 적재되어 작용하였다. 염습지 식생 자료와 저서환경요인 자료를 이용한 상관분석 결과, 염습지 식생분포와 환경요인 중 염분농도와 노출시간이 비교적 유의한 상관관계를 나타냈으며, 염생식물과 염분농도는 음의 상관관계를, 노출시간과는 양의 상관관계를 나타냈다(Table 1). 또한 염생식물 자료를 이용하여 정점간의 관계를 수지도로 작성하였으며, 그 결과 세 개의 정점군으로 구분되었으며, 이들 정점간의 비유사성(dissimilarity)을 측정하여 2차원의 공간상에 표현한 다차원척도법(MDS)과 유사한 결과를 보였다(Fig. 9). 따라서 이들 식생자료를 근거로 구분된 각 정점에 주요 환경요인 변수를 적재하여 표현한 결과 본 연구지역의 염습지 식생분포는 염분농도와 노출시간, 그리고 유기탄소 등의 주요 환경요인 구배에 의해 수직적 대상분포를 나타냈다.

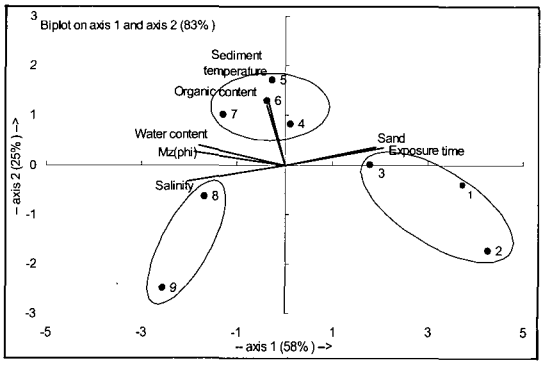

Fig. 8. Plot showing subdivision of sampling station on the first two dimensional PCA by the environmental factors in the salt marsh.

고 찰

염습지 식생생태계는 기본적으로 물과 퇴적물 그리고 식생의 상호작용에 의해 나타나는 유연한 해안 특성(Plastic coastal features)을 나타낸다(Wiegert et al., 1981). 일반적으로 염습지 식생이 존재하는 습지생태계의 염분농도 변화는 주변 유역의 강수량과 육상으로부터 담수의 유입, 태양 복사에너지에 의한 증발, 해수에 의한 침수 등에 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있다. 염습지 식생 하부에 위치한 갯벌 생태계의 경우 저질의

Table 1. The result of Spearman rank correlation coefficients (r) between environmental variables and halophytes in the salt marsh. $p<0.05$

Environmental variables	Organic carbon	Mean grain size	Water content	Sediment temp.	Exposure time	Halophytes	
						stem	root
Salinity (psu)	-0.028 0.771	0.038 0.697	0.335 0.000	-0.377 0.000	-0.559 0.000	-0.559 0.000	-0.487 0.000
Organic carbon (%)		0.974 0.000	0.103 0.290	-0.173 0.073	0.075 0.437	-0.146 0.133	-0.022 0.818
Mean grain size (ø)			0.136 0.160	-0.218 0.023	0.027 0.785	-0.174 0.072	-0.088 0.366
Water content (%)				0.081 0.403	-0.508 0.000	-0.161 0.096	-0.177 0.067
Sediment temp. (°C)					-0.100 0.303	0.162 0.094	0.146 0.132
Exposure time (h)						0.443 0.000	0.420 0.000
Stems (gDWt)							0.481 0.000
Roots (gDWt)							

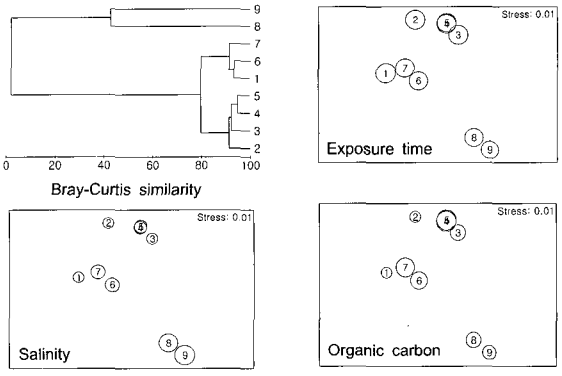

Fig. 9. Dendrogram for pair group-average clustering and non-metric multidimensional scaling (MDS) ordination of Bray-Curtis similarity for square-root transformed halophytes dry weight data with overlap circles of environmental variables from all stations in salt marsh.

염분농도 변화는 공극수 함량과 밀접한 반비례 관계를 보였으며(Koh and Shin, 1988), 입도조성 측면에서도 사질이 우세한 지역에서는 수직구배나 시간에 따라 공극수의 염분농도 변화가 심한 반면에, 니질 퇴적상인 지역은 심한 농도변화를 보이지 않았다(Johnson, 1967). 염습지 식생 내의 염분농도가 심하게 변화하는 것은 일반적 현상이며, 조위의 변화, 담수유입, 강우, 해수의 침수 빈도 등의 원인으로 변화가 매우 심한 환경에 속하며(Valiela et al., 1978; Teal and Howes, 1996), 염생식물은 강우량이 많은 저염분 지역에서 해수의 고염분 지역까지 폭 넓게 분포 한다(Lieth and Moschenko, 1998).

염분농도: 본 조사에서 염생식물이 혼군락을 형성하는 지역의 염분농도는 평균 20 psu 내의 비교적 낮은 염분변화를 보였으나, 하부로 갈수록 서서히 증가하여 칠면초가 순군락을 이루는 지역은 26 psu 이상을 보였다. 하부 지역의 높은 염분농도는 인접한 갯벌과 유사하게 나타났으며, 인천지역 갯벌의 염분농도 변화는 주로 여름철에 증가하고 겨울철로 가면서 감소하는 경향을 나타낸다(Park, 1991). 그러나 염습지 식생의 경우 여름철에 감소하고 겨울철에 증가하는 다른 양상을 보였다. 이는 갯벌의 경우 여름철 노출에 따른 태양의 복사량에 의한 건조와 증발, 대기의 영향, 그리고 입도조성 중 니질 함량이 높아 담수의 침투시간보다 증발시간이 빠른 원인 등에 의해 염분농도가 증가하는 반면, 염습지 식생은 여름철 강수량의 증가로 인하여 육상으로부터 담수 유입과 염생식물에 의해 건조와 증발 속도가 떨어져 낮은 농도를 보였다가 이후 해수의 잠김에 의해 증가 한다(Ihm, 1987). 일반적으로 겨울철에는 강수량 감소와 노출 증가로 염분농도가 증가한다.

노출정도: 해수의 침수정도는 각 지역의 지형 구조에 따라 달라지며, 이로 인한 토양의 전기전도도가 공간적 차이를 보이기 때문에 염습지 식생 주변 토양의 염분농도가 달라지며 이 염분농도의 구배에 따라 염습지 식생은 수직구배를 형성한다(Kim and Min, 1983; Ihm, 1987). 또한 염습지 식생의 수직분포는 침수와 토양의 염분도, 경쟁 등의 상호작용에 의해 결정되기도 하며 이 중 가장 중요한 요인은 조위(tidal level)의 변화이다(Pennings and Callaway, 1992). 한편 염습지 식생을 노출의 정도에 따라 고위염습지(high marsh)와 저위염습지(low marsh)로 구분하기도 하였다(Ranwell, 1972). 즉 상부에 위치하여 육상 환경의 영향을 받으며 연속노출 시간이 10일 이상인 고위염습지와 연중 평균 360일 이상 해수에 잠기는 저위염습지로 구분하였다. 이 구분에 따르면 동검 염습지는 최하부에 위치한 정점 9를 기준으로 연중 306일 노출되는 반면, 정점 1을 기준으로 한 침수시간은 연중 14일로 나타났으며, 염습지 식생 분포대의 조위가 평균해수면(mean sea level: 464 cm)보다 257-498 cm나 높은 지역에 위치하고 있어 고위염습지에 해당된다고 볼 수 있다. 따라서 조사지역은 노출로

인해 겨울철인 1월에 식생 지역이 눈으로 10일 이상 덮여있는 등 서식환경조건이 매우 열악한 경우가 관찰되기도 하였으며, 노출에 의한 영향으로 식생대의 위치와 폭이 각 연안마다 다르고, 조위에 따라 노출과 잠김 시간이 차이가 남에 따라 식생의 다양성과 분포대가 다르게 나타날 것이다.

퇴적물의 유기물 함량: 염습지 식생내의 유기물 함량은 서식하는 식물의 고사에 의해 고사된 식물체가 퇴적물 내로 유입되면서 유기물 함량을 증가 시킨다(Min, 1985; Kim and Ihm, 1988; Kim et al., 1989; Sarda et al., 1995; Craft et al., 1988). 이러한 연구 결과는 염생식물 분포에 따라 염습지 식생내의 유기물 함량이 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 조사지역 내의 염생식물이 혼군락을 형성하는 지점에서 유기탄소와 질소 함량이 높게 나타난 것은 위의 조사와 유사한 결과를 보였다. 또한 일반적으로 갯벌생태계에서는 입도조성이 사질보다 니질이 우세한 지역에서 유기물 함량이 높게 나타난다. 그러나 본 조사지역에서는 니질이 우세한 하부지역보다는 염생식물이 혼군락을 이루는 지역에서 비교적 높게 나타났다. 따라서 이와 같은 결과는 유기탄소와 유기질소 함량이 퇴적상보다는 식생의 분포와 관련이 있을 것으로 예측할 수 있다. 황의 변화는 염생식물 뿌리에 의해 퇴적층 깊이까지 산화층이 형성된 지역보다 니질이 우세한 하부지역에서 비교적 높게 나타났다. 따라서 염습지 식생 퇴적물 내의 유기물 변화는 염생식물의 고사에 의한 공급과 식물의 줄기와 뿌리에 의한 유기물질의 물리적 이동의 방해로 인한 축적의 결과로 해석할 수 있으며, 따라서 염습지 식생의 유기물질은 염생식물의 분포와 퇴적상과의 상호작용에 의한 변화로 볼 수 있다.

입도 조성: 동검도 갯벌의 부유물질 농도 변화는 창조류보다는 낙조류 때 유속이 강하여 저층으로부터 많은 양의 부유물질이 재부유되어 증가하며, 8월의 부유물질 농도는 타 계절에 비해 크게 증가하지 않는 것으로 나타났으며, 강화도 남단 갯벌의 경우 여름에서 겨울까지 침식이 진행되는 것으로 나타났다(Lee et al., 1990). 또한 조사지역의 주변 갯벌은 6월부터 10월까지 퇴적물이 집적되고, 10월에서 12월까지 침식되는 현상을 보였다(KORDI, 1998). 염습지 식생내의 퇴적상은 갯벌의 영향으로 하부지역은 니질 퇴적상을 보였으며, 육상과 인접한 상부지역은 육상기원의 사질 퇴적상을 보였다. 또한 염생식물의 줄기에 의한 부유물질 이동이 차단되어 식생 내에 퇴적된 결과로, 표층 퇴적상이 상부 일부 정점을 제외하고는 전반적으로 니질 퇴적상을 보인다. Ranwell (1972)의 염습지 식생 내 퇴적물의 입도조성과 조위에 따른 염습지 구분에서 염습지 식생 군락 면적이나 식생은 본 조사지역과 다소 차이는 있지만 퇴적상의 변화에 있어서는 상부의 사질지역, 중부의 사니질, 그리고 하부의 니질지역으로 구분되어지는 것은 매우 유사하였다. 인천 지역 대부분 갯벌의 입도조성은 상부는 세립질이며, 저조선으로 갈수록 조립화 되는 양상을 보인다. 갯벌 상부에 위치한 본 염습지의 입도조성은 육상과 인접한 상부지역은 육상기원 사질이 우세한 조립질이며, 습지 하부의 갯벌로 갈수록 니질이 증가하여 세립화되는 경향을 보였다. Kim and Ihm (1988)은 서해안의 간석지에서 토양의 입도조성에 따라 사구, 사질, 점토질 염습지로 구분하였으며 사질에는 갈대, 지채, 해홍나물, 천일사초, 갯질경, 갯잔디, 쑥, 매자기 등이, 점토질에는 칠면초, 나문재 등이 분포하는 것으로 보고하였다. 이는 본 조사지역에서 사구식물은 출현하지 않았지만 사질과 점토질 식생 분포는 유사한 패턴을 보였다.

퇴적물의 함수량: 염습지 식생에서 함수량은 염생식물 분포의 제한요인이 되기도 하나(Ihm, 1987; Kim and Min, 1983), 염생식물의 수분에 대한 분포양상이 폭넓게 작용하는 등 지형적 영향과 일부 다른 요인에 의해 크게 영향을 받기도 한다(Lee and Oh, 1989; Kim and Ihm, 1988). 조사지역 상부의 세 정점에서는 비교적 낮고, 하부로 갈수록 서서히 증가하여 하부의 두 정점에서 연중 일정한 함수량을 유지하는 경향을 보였다. 함수량이 가장 높은 정점은 염생식물의 혼군락이 끝나고 칠면초 군락이 시작되는 지역이며, 염습지 상부의 지층수가 집적되는 지점으로 조사정점 중에서 퇴적상이 가장 세립한 정점이다. 대체로 상부 일부 정점을 제외하고 식생이 혼군락을 형성한 지역과 칠면초가 순군락을 형성한 하부지역 사이에 함수량은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 염생식물의 뿌리가 퇴적층의 수분을 유지시키는 중요한 역할을 하기 때문인 것으로 사료되며, 본 연구의 결과만으로 함수량이 염생식물 분포의 제한요인으로 단정하기는 무리이며, 지역이나 지형, 퇴적상과 염생식물 분포 등 복합적인 작용의 차이에 의한 것으로 보인다.

온도: 염습지 식생 주변의 겨울철 1월 수온은 평년에 비해 3.6℃가 높았으며, 여름철에는 평년보다 대체로 낮은 수온 변화를 보였다. 염습지 식생의 표층퇴적물 온도는 3월부터 급격히 증가하였으며, 수온에 비해 여름과 봄철에 높게 나타난 것으로 보아 두 계절에 태양 복사열이 증가한 영향으로 보인다. 또한 염생식물이 혼군락을 이루어 식생점유율이 높은 지역이 점유율이 낮아 노출공간이 넓은 지역보다 퇴적온도가 낮은 이유는 염생식물이 복사열을 차단하여 퇴적물 온도 상승을 제한하고, 수분 증발을 억제하여 일정 온도와 수분을 유지시키는 역할을 하고 있었다.

염습지 식생 분포와 환경요인과의 상호 관련성 분석에 의하면 염생식물의 분포는 주로 염분농도와 노출시간에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. Kim and Ihm (1988)은 염분농도가 토양의 함수량을 조절하며 염생식물의 분포와 수분관계에 큰 영향을 미칠 것으로 예측하였으며, 퇴적물의 염분농도는 식물의 분포에 영향을 주는 환경요인으로 염분농도의 구배에 의해 식물이 대상분포를 이루고, 염생식물과 중성식물의 분포는 토양의 염분농도에 의해 결정됨을 밝혔다(Min, 1985). 또한 염생식물은 지형의 변화에 따른 해수의 침수정도와 전기전도도에 따라 수직분포가 결정된다고 하였다(Bertness and Ellison, 1987; Pennings and Callaway, 1992). Ihm (1987)은 전기전도도가 낮은 지역에서 천일사초가 높은 지역에서 칠면초가 출현함을 보고하였다. 이와 같은 결과는 본 조사지역의 염생

식물의 분포와 유사한 결과를 보였으며, 조사지역의 염생식물 분포는 상부에는 갈대와 해홍나물이 서식하고, 중부에는 갯질경, 지채, 갯골풀, 갈대가 분포하며, 하부에는 칠면초가 순군락을 이루는 수직분포를 보였다. 또한 염분농도는 조위에 따라 월별 심한 변화를 보이는 결과를 보였으며 특히 상부지역은 월별 염분농도가 비교적 낮고 변화가 심한 것으로 나타났고 평균 15.3 psu를 보였다. 또한 주변 갯벌 환경의 영향을 상당히 받고 있는 것으로 보이는 하부 지역의 염분농도는 25.9-28.2 psu를 보이며 칠면초가 순군락을 형성하고 있었다. 염생식물의 혼군락이 끝나고 칠면초 군락이 시작되는 경계지역은 하부로 갈수록 증가하던 염분농도가 다소 감소하는 현상을 보이는데 그 이유는 이 지점이 육상으로부터 유입되는 지층수의 영향으로 항상 수분이 고여 있으며, 담수량의 증가와 상반되는 염분농도의 감소가 나타나는 것으로 보인다. 조사지역의 조위에 따른 염분농도 변화는 염생식물의 수직분포와 높은 상관성을 보였으며, 염생식물 서식지를 제한하는 중요한 환경요인으로 작용하였다.

염생식물의 서식위치를 결정하는 여러 환경요인 중 염분의 영향과 밀접한 관계를 보이는 것은 노출시간과 상반되는 해수에 의한 침수빈도와 시간으로 염생식물의 수직분포가 결정되며, 염습지 고도(elevation)가 증가 할수록 퇴적물의 염분농도는 감소하고 퇴적층의 산화환원은 증가한다고 하였다(Bertness and Ellison, 1987). 또한 Penning and Callaway (1992)는 염습지 식생의 분포패턴을 결정하는 환경요인은 해수의 유입이나 퇴적물의 염분농도, 식물의 종간 경쟁 등의 상호작용에 의해 결정되나 이들 중 비교적 중요한 영향을 미치는 요인은 조위의 변화에 의해 결정된다고 주장하였다. 따라서 조사지역의 염생식물 서식처를 침수빈도에 따라 구분한 결과, 조사지역은 고위염습지로 구분되었으며(Ranwell, 1972; Bertness, 1991), 이곳에 서식하는 염생식물은 장기간 대기에 노출되어 있었으며, 또한 노출과 상반되는 해수의 잠김에 의해 염생식물의 생리적 활동에 영향을 받고 있었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업인 "갯벌의 효율적인 이용과 보전을 위한 연구(BSPE 99748-00-1245-3)와 하구역의 관리 및 기능회복기술개발(PE97101)"의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Bertness, M.D. and A.M. Ellison. 1987. Determinants of pattern in a New England salt marsh plant community. Ecol. Monogr., 57, 129-147.

Bertness, M.D. 1991. Zonation of *Spartina patens* and *Spartina alterniflora* in a New England salt marsh plant community. Ecology, 72, 138-148.

Choi J.K., C.H. Koh, Y.C. Park, B.H. Choi, B.S. Park and K.N. Han. 1997. A nature scenery and an ecosystem of Incheon coastal Island. The present situation and an conservation. Ocean Science & Technology Institute, Inha University, Incheon, 1-69.

Choung, Y.S. and J.H. Kim. 1991. Studies on the population biology of some clonal plants in a coastal reclaimed land. 1. Rhizome architecture, patch formation and growth of *Calamagrostis epigeios* plants. Kor. J. Ecol., 14, 327-1991.

Craft, C.B., S.W. Broome, E.D. Seneca and W.J. Showers. 1988. Estimating sources of soil organic matter in natural and transplanted estuarine marshes using stable isotopes of carbon and nitrogen. Est. Coast. Shelf Sci., 26, 633-641.

Del Moral, R. and A.F. Watson. 1978. Vegetation on the stikine analysis. Northwest Sci., 33, 43-64.

Folk, R.L. and W. Ward. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. J. Sed. Petrol., 27, 3-26.

Hong, W.S. 1956. The study of vegetation on the west coast of Korea I. Kor. J. Biol., 1, 17-24.

Hong, S.W., Y.C. Hah and Y.K. Choi. 1970. Ecological studies of the certain Halophytes on the high saline soil. Kor. J. Bot., 13, 25-32.

Ihm, B.S. 1987. The distribution and growth of halophytes at the coastal marsh. Bull. Inst. Litt. Biota, 4, 71-79.

Johnson, R.G. 1967. Salinity of interstitial water in a sandy beach. Limnol. Oceanogr., 12, 1-7.

Kim, C.S. 1980. Study on the seed germination and salt tolerance of plants in reclaimed salt area. Kor. J. Bot., 23, 27-33.

Kim, J.H. and B.M. Min. 1983. On the soil properties, species diversity and mineral cyclings in reclaimed soil in Incheon. In: Ecological Studies on the Halophyte Communities at Western and Southern Coast in Korea (III). Kor. J. Bot., 26, 53-71.

Kim, J.H., H.T. Mun, B.M. Min and K.J. Cho. 1989. Nitrogen and phosphorus dynamics in a salt marsh in the Nakdong River estuary. Kor. J. Ecol., 12, 1-7.

Kim, C.S. and B.S. Ihm. 1988. Studies on the vegetation of the salt marsh in the southwestern coast of Korea. Kor. J. Ecol., 11, 175-192.

KMA (Korea Meteorological Administration). 1991-1996. Monthly Weather Report, 1-52.

Koh, C.H. and H.C. Shin. 1988. Environmental characteristics and distribution of macrobenthos in a mudflat of the west coast of Korea (Yellow sea). Neth. J. Sea Res., 22, 279-290.

KORDI (Korea Ocean Research and Development

Institute). 1998. Tidal flat studies for conservation and sustainable use. BSPE 97611-00-1058-3, 1-312.

Lana, P.C. and C. Guiss. 1992. Macrofauna-plant-biomass interactions in a euhaline salt marsh in Paranagua Bay (Southeastern Brazil). Mar. Ecol. Prog. Ser., 80, 57-64.

Lee, Y.C., J.K. Oh, Y.H. Seung, T.I. Yoon, J.K. Choi, J.S. Hong and Y.C. Park. 1990. Investigation of estuarine environment change by development of the Han River estuary and its comparison with the environmental pre-data. Ocean Science & Technology Institute, Inha University, Incheon, 1-329.

Lee, K.S. and K.C. Oh. 1989. Difference of Suaeda japonica Populations from two different habitats in Sorae, Incheon, Korea. Kor. J. Ecol., 12, 133-144.

Lieth, H. and M. Moschenko. 1998. Sustainable use of halophytes (salinity tolerant plants). UNESCO MAB, EU CONCERTED ACTION IC 18 CT 96-0055, 2nd enlarged ed., Osnabrueck, 1-10.

Min, B.M. 1985. Changes of soil and vegetation in coastal reclaimed lands, west coast of Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 1-144.

Min, B.M. and J.H. Kim. 1983. Distribution and cyclings of nutrients in *Phragmites communis communities* of a coastal salt marsh. Kor. J. Bot., 26, 17-32.

NORI (National Oceanographic Research Institute). 1991-1996. Annual Report Hydrography, 1-325; 349.

Park, H.S. 1991. An ecological study of the macrobenthos on a macrotidal flat, Inchon, Korea. M.S. Thesis, Inha University, 1-121.

Pennings, S.C. and R.M. Callaway. 1992. Salt marsh plant zonation: The relative importance of competition and physical factors. Ecology, 73, 681-690.

Ranwell, D.S. 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. Chapman and Hall, London, 1-258.

Sarda, R., K. Foreman and I. Valiela. 1995. Macroinfauna of a southern New England salt marsh: seasonal dynamics and production. Mar. Biol., 121, 431-445.

Teal, J.M. and B.L. Howes. 1996. Interannual variability of a salt-marsh ecosystem. Limnol. Oceanogr., 41, 802-809.

Valiela, I., J.M. Teal, S. Volkmann, S. Shafer and E.J. Carpenter. 1978. Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem: tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater. Limnol. Oceanogr., 23, 798-812.

Vogl, R.J. 1966. Salt marsh vegetation of upper New Port Bay, California. Ecology, 47, 80-87.

Wiegert R.G., L.R. Pomeroy and W.J. Wiebe. 1981. Ecology of a salt marsh: An introduction. In: The Ecology of a Salt Marsh. Pomeroy L.R. and R.G. Wiegert, eds. Spring-Verlag, New York, 3-19.

2005년 10월 2일 접수
2006년 5월 24일 수리