

방사림이 조성된 병술안 해안사구 퇴적물의 지화학적 단순성

신영호* · 이현아** · 유근배***

Geochemical Simplicity of Sediments on Byungsuran Dune Field Planted with Pine, West Coast of Korea

Young Ho Shin* · Hyoun A Lee** · Keun Bae Yu***

요약 : 한국 대부분의 해안사구 지역은 방사림이 조성되어 있으며, 방사림을 보전해야한다는 의견이 많다. 그렇지만 해안사구가 지닌 해안생태계 영양 순환의 역할이나 다양한 생물의 서식처 역할의 측면에서 방사림에 의한 식생피복 단순화에 대해 재고할 필요가 있다. 방사림이 조성되어 있는 서해안 병술안 해안사구지대의 퇴적물을 대상으로, 바다로부터의 이격 정도, 식생피복, 그리고 사구 미지형의 측면으로 나누어 물리·화학적 실험을 살펴보았다. 배아사구와 전사구 간 퇴적물의 물리·화학적 특성은 큰 차이를 보였지만 전사구와 2차사구 간 특성의 차이는 크지 않았다. 곱슬림과 혼합림으로 나누어 비교했을 때 물리·화학적 특성이 서로 극명하게 다르지 않았다. 마지막으로 사구열과 사구저지를 비교하였을 때에도 지화학적 다양성은 뚜렷하지 않았다. 외형적으로 확인되는 공간적 다양성에도 불구하고 퇴적물의 지화학적 다양성이 연계되어 나타나지 않는 것은 전사구까지 조밀하게 조림된 방사림의 영향으로 판단된다. 따라서 해안사구의 본연의 특성을 회복하기 위해서는 방사림의 일부를 지형적·생태적으로 역동적이며 다양하도록 조성해 나가는 방안을 고려할 필요가 있다.

주요어 : 해안사구, 방사림, 지화학적 다양성, 해안관리, 생태서식처

Abstract : Trees to arrest sand-shifting have been planted on most of coastal dunes in Korea and considered as conservative objects. However, we reconsider that the simplicity of these trees have hindered ecological roles of coastal dunes; geochemical cycle and habitats of endemic species in coastal ecosystem. We examined geochemical properties of sediments on Byungsuran dune field where is planted with pine trees. There are significant difference in properties between embryo dune sediments and foredune sediments, but there are not between foredune and secondary dune. There are no significant difference between pine forest sediments and mixed forest sediments. It is also not showed the difference between dune ridge sediments and swale sediments. Despite spatial diversity from appearance, geochemical properties are not linked with geomorphic and vegetational conditions because of dense planted trees on foredune. To recover natural properties of coastal dunes, we need to change the conservation scheme to increase geomorphic and ecological diversity.

Key Words : coastal dune, trees to arrest sand-shifting, geochemical diversity, coastal management, ecological habitat

이 연구는 2014년 환경부·국립생태원의 주관으로 진행된 '2014년 전국해안사구정밀조사: 중장사구'의 자료를 활용하였으며, 서울대 지리학과 BK21플러스 4-Zero 지향 국토공간창조사업단의 일부 지원으로 진행되었음.

* 서울대학교 지리학과 BK21플러스 4-Zero 지향 국토공간창조사업단 BK조교수(BK Assistance Professor, BK21Plus 4-Zero Land Space Creation Group, Seoul National University), syhgeo@snu.ac.kr

** 서울대학교 지리학과 박사과정(Doctoral student, Department of Geography, Seoul National University), uuuzzuu@snu.ac.kr

*** 서울대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Seoul National University), kbyu@snu.ac.kr

1. 서론

해안사구는 해안시스템을 구성하는 지형요소 중 하나로 해안보호의 관점에서는 자연방파제로서 (Carter, 1988; Psuty and Ofiara, 2002; Psuty, 2004), 생태적 관점에서는 독특한 서식처로서(유근배 · 류호상, 2007) 중요한 가치를 지닌다. 자연방파제이자 생물다양성을 보호하는 핵심지역으로서의 역할에 대한 연구는 국제적으로도 활발히 진행되고 있다 (e.g. Nordstrom *et al.*, 1990; Psuty and Ofiara, 2002; Acosta *et al.*, 2009). 이 중 생태서식처로서 해안사구에 접근하는 연구경향에서는 국내외적으로 생물학적 천이와 사구환경의 스트레스에 대한 생리적 적응양식 등이 주요 주제가 되고 있다(Martínes and Psuty, 2004; 유근배 등, 2013). 국내에서도 이러한 해안사구의 중요한 가치를 인식하여 다양한 연구 및 조사가 수행되고 있으며(e.g. 김대현, 2004; 송호경 등, 2005; 유근배 등, 2012; 신학섭 등, 2013), 환경부에서도 해안사구의 보전을 위해 2003년부터 ‘전국 해안사구 정밀조사’를 수행하고 있다.

유근배 · 류호상(2007)은 해안사구를 이해하는 주요 관점으로 “고환경 지시자로서 해안사구”, “모래 저장고로서 해안사구”, “생태서식처로서 해안사구”를 제시하여, 각각의 관점 또는 이를 종합화한 관점에서 해안사구에 대한 이해를 넓혀야 함을 강조하였다. 유근배 등(2012)은 해안사구의 구성요소들 간의 관계를 각 요소간 다양성(diversity)의 관점에서 접근하였다(그림 1). 즉, 해안사구의 지형다양성(geodiversity)을 근간으로 생물다양성(biodiversity)과 지화학적 다양성(geochemical diversity)의 관계를 복합적으로 검토할 필요가 있다는 것이다. 이러한 시각은 김대현(2004), 유근배 등(2005), 유근배 등(2012)에 의해 전개되어 왔다.

김대현(2004)은 해안사구의 지형적 공간특성에 따라 퇴적물의 물리·화학적 분포특성이 각기 다른 특징을 보인다는 점을 보였다. 그리고 해안사구 생태시스템에서 영양소의 공간적 분포를 이해하기 위해서는 해안선으로부터의 거리뿐만 아니라 각 영양소

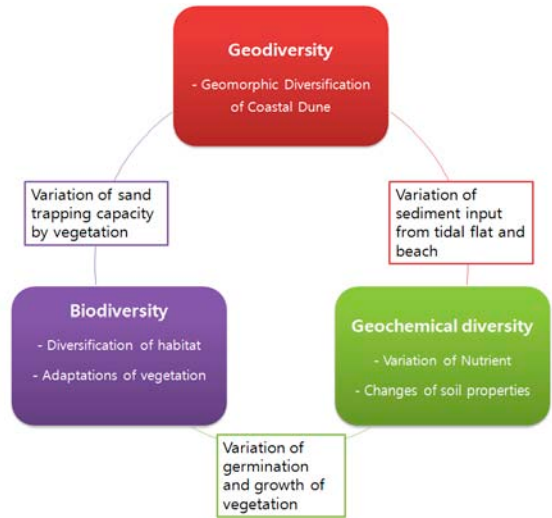


그림 1. 해안사구에서의 지형다양성, 지화학적 다양성, 생물다양성 간의 상호관계(유근배 등, 2012)

의 지화학적 특성과 연구 지역의 식생분포, 기후 기상 조건 등을 종합적으로 고려해야함을 언급하였다. 유근배 등(2005)은 해안사구로 유입되는 모래퇴적물에서 치환성양이온 분석을 통해 비사가 염분포말에 상응하는 양의 영양분을 사구로 공급하고 있음을 밝혔다. 유근배 등(2012)은 전사구의 형태에 따라 유입되는 영양염류가 시공간적으로 다른 양상을 보이며, 이러한 차이로 인해 각 지점에 따라 주요 식생이 다르게 나타날 수 있음을 강조하였다. 그렇지만 이들의 연구는 서해안에서 비교적 모래의 유입이 활발히 진행되는 신두리 사구지대를 중심으로 수행되었기 때문에, 현재 방사림 등의 식재를 통해 사구의 형성이 지체 또는 고정되어 있고, 퇴적물의 이동이 활발하지 않은 대부분의 서해안 사구지대의 특성으로 일반화하기에는 부족하다. 방사림이 조성되어 있는 경우 김대현(2004)이나 유근배 등(2012)이 주목한 전사구의 지형 특성의 차이가 뚜렷이 확인되기 힘들 뿐만 아니라 유근배 등(2005)이 제시한 비사의 유입을 통한 영양분의 유입패턴이 방사림에 의해 제한될 수밖에 없다.

생태분야에서 해안사구 방사림의 생물다양성에 대한 현황 연구는 비교적 활발하게 이루어진 편이지만(홍선기 등, 2006; 김하송, 2008; 김찬범 등, 2013), 방사림이 해안사구의 지형다양성과 지화학적 다양성

과 어떠한 관계를 맺고 있는지, 더 나아가 이것이 생물다양성과 어떻게 연계되는지에 대한 논의는 아직 부족한 편이다. 한편, 최근 해안사구 내 방사림의 지형적 또는 생태적 함의를 재해석하려는 시도가 이루어지고 있다. 예를 들면, 최광희 등(2012)은 서해안의 소항사구를 대상으로 태풍의 내습이후 곰솔로 식재된 지역이 초본으로 피복된 지역에 비해 더디게 회복되는 것을 관찰하여, 모래의 이동과정이 침식된 사구 지형회복에 가장 중요한 역할을 하였다고 제시하기도 하였으며, Kim *et al.*(2014)도 곰솔에 의하여 전사구의 식생과 퇴적물 특성이 자연 상태에서 변모되었다고 하였다.

따라서 이 연구에서는 해안사구지대 내의 지화학적 다양성-지형다양성-생물다양성의 중장기적인 상호 관계에 대한 이해를 높이기 위해, 방사림이 조성되어 있을 뿐만 아니라 다양한 지형 및 생물적 특성을 보이는 병술안 해안사구를 대상으로 지화학적 다양성이 어떠한 경향과 상호관계를 맺고 있는지를 검토하였으며, 더 나아가 관리적 측면에서의 함의를 도출하고자 하였다. 이를 위하여 사구 지대 내 다양한 특성을 보이는 지점을 구분하여 퇴적물의 물리·화학적 특성을 확인하였다. 첫째, 사구지대 내 지형의 배열(배아사구-전사구-2차사구)에 따라 표층퇴적물에서 나타나는 공간적인 물리·화학적 특성을 확인하였다. 둘째, 사구지대의 식생피복 유형과 피복 시기에 따른 표층퇴적물의 공간적인 물리·화학적 특성을 확인하였다. 마지막으로, 미지형(ridge-swale)에 따라 퇴적물의 공간적인 물리·화학적 특성을 확인하였다.

2. 연구지역과 연구방법

1) 연구지역

병술안 사구지대²⁾는 충청남도 태안군 안면도의 남서쪽 해안, 북위 36°27'39"~36°28'31", 동경 126°20'19"~126°20'46"에 위치하고 있다. 남북 방향으로 길이 1.5km, 너비 400m 규모로 형성되어 있다. 사구의

북서쪽으로는 꽃지 해변의 남단이 남서 방향으로 뻗어 나와 있고, 꽃지 해변과 병술안 사구지대 사이에는 소규모의 만(灣)³⁾이 형성되어 있다(그림 2).

병술안 사구지대는 북쪽과 남쪽의 끝단에는 배아사구가 형성되어 있으며, 중앙부에는 해변과 평행하게 발달한 전사구와 최대 6열로 추정되는 2차 사구열이 형성되어 있다. 사구지대의 전체적인 형태는 사구열이 해안선과 평행하여 바다방향으로 전진하는 모습을 하고 있다. 전체적으로 곰솔림으로 피복된 면적이 넓으며, 전사구지대를 포함한 약 3열의 일부가 활엽수 혼합림으로 피복되어 있어 가시적으로 명확히 구분된다. 혼합림은 1985년과 1992년 사이에 발생한 인위적인 식생제거 이후 2차 천이가 진행된 것으로 판단되며, 졸참나무, 곰솔, 빛나무 등으로 구성되어 있다(환경부, 2014). 따라서 초지로 피복된 북쪽과 남쪽의 배아사구, 곰솔림으로 피복된 전사구 지대 및 2차사구 지대, 혼합림으로 피복된 중앙부의 전사구 지대의 3개 지역으로 구분된다.

병술안 사구지대는 다양한 시간 규모에 걸쳐 형성되었다. 현재 곰솔림과 일부 활엽수 혼합림으로 식피가 되어있는 중앙부의 사구지대는 사구열이 전진되며 형성시기를 달리하는데, Yu *et al.*(2009)은 뒤쪽 사구열부터 1.5ka, 1.3~1.4ka, 1.1ka, 0.7~0.8ka 경에 형성되었으며, 비교적 최근에 전사구열이 형성되었다고 밝혔다. 북쪽의 배아사구는 해변에서 연장된 사취의 형태를 띠고 있었으나, 병술만방조제의 축조 이후 퇴적이 증가하여 배아사구의 형태로 변모하였다. 남쪽의 배아사구 또한 과거 해변 또는 간석지였으나 남쪽 소형 방조제의 축조 이후 퇴적물이 쌓여 현재 배아사구로 변화되었다.

2) 연구방법

(1) 측선 설정과 시료 채취

병술안 사구의 지형다양성-생물다양성-지화학적 다양성의 관계를 살피기 위해 서로 다른 지형적·생물적 특성을 지닌 지점을 중심으로 4개의 측선을 설정하였다(그림 2, 표 1). BS1은 가장 북쪽에 위치한 측선으로 병술만방조제 전면에 새로이 형성되고 있는



그림 2. 병술안 사구지대의 항공사진과 측선의 설정

표 1. 측선의 특성

구분	길이 (m)	시료 채취	지형 특성 및 배열 (바다 → 육지방향)	식생피복 유형	형성시기*
BS1	312	11	<ul style="list-style-type: none"> • 해빈-배아사구-사주후면습지-사구열-구릉지 • 사구열과 사구저지의 구분 불분명 	<ul style="list-style-type: none"> • 전사구: 초본 식생 군락(갯그렁, 갯쇠보리-통보리사초, 통보리사초-갯그렁) • 사구열: 침엽수림(곰솔) 	<ul style="list-style-type: none"> • 초본피복 사구: 병술만방조제 축조 이후 • 목본피복 사구: BS2, BS3의 사구열과 비슷할 것으로 추정
BS2	229	9	<ul style="list-style-type: none"> • 해빈-사구열-간석지(간척지) • 사구열과 사구저지가 명확히 구분 	<ul style="list-style-type: none"> • 해안방향 사구열: 혼합림(졸참나무, 빛나무, 굴참나무 등) • 육지방향 사구열: 침엽수림(곰솔) 	<ul style="list-style-type: none"> • 후면 사구열부터 1.5ka, 1.3~1.4ka, 1.1ka, 0.7~0.8ka 경에 형성
BS3	334	15	<ul style="list-style-type: none"> • 해빈-사구열-간석지(간척지) • 사구열과 사구저지가 명확히 구분 	<ul style="list-style-type: none"> • 해안방향 사구열: 혼합림(졸참나무, 빛나무, 굴참나무 등) • 육지방향 사구열: 침엽수림(곰솔) 	<ul style="list-style-type: none"> • 후면 사구열부터 1.5ka, 1.3~1.4ka, 1.1ka, 0.7~0.8ka 경에 형성
BS4	177	6	<ul style="list-style-type: none"> • 해빈-배아사구-사주후면습지-사구열 • 배아사구의 경우 인위적 조성된 흔적이 관찰 	<ul style="list-style-type: none"> • 전사구: 초본 식생 군락(갯그렁, 좁보리사초-해당화, 순비기나무, 통보리사초, 갯잔디) • 사구열: 침엽수림(곰솔) 	<ul style="list-style-type: none"> • 초본피복 사구: 1985년과 1992년 사이 • 목본피복 사구: BS2, BS3의 사구열과 비슷할 것으로 추정

* Yu *et al.* (2009)와 환경부(2014)의 자료와 시기별 항공사진을 토대로 구성

배아사구와 목본으로 피복된 전사구 및 2차사구를 모두 지날 수 있도록 설정하였다. BS2와 BS3은 사구열이 잘 발달된 사구의 중앙부에서 선택하였다. BS2의

경우에는 Yu *et al.* (2009)의 연대측정 결과를 활용하기 위하여 동일한 측선을 선택하였고, BS3의 경우는 사구지대 내에서 가장 폭이 넓은 지점에 BS2 측선과

평행하도록 설정하였다. BS4는 병술안 사구의 남쪽 소형 방조제 주변에 설정하였다. 각 측선은 레이저거리측정기와 함적을 이용하여 지형단면을 측량하였으며, DGPS를 이용하여 각 시료채취 지점의 위치를 측정하였다.

퇴적물 시료 채취는 BS1에서 11개, BS2는 9개, BS3은 15개, BS4는 6개 지점을 대상으로(표 1) 2014년 8월에 채취하였다. 각각의 시료 채취장소는 미지형적인 특성(지형다양성 고려)과 식생피복의 조건(생물다양성 고려)을 고려하여 사구열(ridge)-사구저지(swale)의 배열과 초본-곰솔림-혼합림 등의 위치에 따라 결정하였다. 각 시료 채취 장소에서 퇴적물 시료는 지표면으로부터 각각 0~20cm, 40~60cm, 80~100cm의 깊이마다 채취하였다. 깊이별로 시료를 채취한 이유는 퇴적 깊이에 따라 미지형 및 식생의 영향이 각기 달리 반영되어 퇴적물의 물리·화학적 특성이 차이가 날 것으로 판단하였기 때문이다. 한편, 각 측선마다 연장선상에서 해빈의 표층 시료를 채취하여 사구퇴적물과 비교에 활용하였다.

(2) 퇴적물 분석

해빈 퇴적물을 포함한 총 130개의 시료를 대상으로 입도, 유기물함량 및 주요 치환성양이온의 농도, 그리고 산성도(pH)와 전기전도도(EC)를 분석하였다. 사구퇴적물의 물리적 특성을 확인하기 위하여 입도 분석을 실시하였다. 입도분석은 체(sieve)를 0.5 파이(ϕ) 간격으로 구성하여 체질하였으며, GRADISTAT (Blott and Pye, 2001)을 이용하여 계산하였고, 통계적 입도 변수는 Folk and Ward(1957)의 방법을 따라 산출하였다. 사구퇴적물의 화학적 특성을 파악하기 위해서 유기물함량, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 주요 치환성양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+})⁴⁾의 함량을 구하였다. 유기물함량은 작열감량법(LOI, loss on ignition)을 활용하였으며, pH와 EC는 건조 시료와 증류수를 1:5로 배합하여 30분간 진탕한 후 실험실용 측정기(Accumet model 50, Fisher scientific)를 이용하여 측정하였다. 주요 치환성양이온은 건조 시료와 암모늄아세트산용액을 1:5로 배합하여 30분간 진탕한 후 여과지를 이용하여 거른 후, 추출액에

대하여 대구대학교 공동기기원 ICP장비를 활용하여 측정하였다. 한편 퇴적물 분석 결과에 대한 유형별 구분 간의 비교는 SPSS의 t-test와 ANOVA를 통하여 통계적 유의성을 확인하였다.⁵⁾

3. 결과

1) 지형적 구배(바다로부터 이격 정도)에 따른 표층 퇴적물의 특성

병술안 해안사구지대에서 지형적 구배(바다로부터 이격 정도)에 따라 표층 퇴적물에서 나타나는 물리·화학적 특성의 경향성을 확인하기 위해 다음과 같이 구분하여 살펴보았다. 먼저 해빈(8개)과 사구지대의 퇴적물(40개)을 구분하였고, 사구지대의 경우 배아사구(5개), 전사구(14개), 2차사구(21개)로 세분하여 상호간 비교를 하였다(그림 3, 표 2).⁶⁾

해빈과 사구의 퇴적물 간에는 모든 분석항목에서 차이가 나타났다(그림 4). 사구퇴적물은 해빈퇴적물에 비하여 평균 입경이 세립하고 분급이 양호한 특성을 보였다. 이러한 특성은 해안사구에서 연구된 많은 연구에 의해 잘 알려진 것으로(e.g. Friedman, 1961; 류완상, 2002) 바람에 의해 퇴적되는 사구퇴적물과 파랑에 의해 퇴적되는 해빈퇴적물에 미치는 주요 퇴적프로세스가 서로 다를 것을 보여준다. 유기물함량의 경우에는 미소하게 사구퇴적물이 높게 나타났지만 통계적으로 유의미하지는 않았다. 이는 주로 사구퇴적물 중에 배아사구 퇴적물의 유기물함량이 해빈퇴적물 수준으로 낮았기 때문에 통계적 유의성이 없었던 것으로 판단된다. 하지만 pH와 EC, 치환성양이온 항목에서는 사구퇴적물에 비해 해빈퇴적물의 값들이 높고 범위가 넓게 나타나 뚜렷이 차이가 나는 특징을 보였다. 특히 치환성양이온 항목에서 해빈퇴적물에 비하여 사구퇴적물의 값이 낮은 것은 바다 혹은 해빈이 치환성양이온의 기원이 되고 염분포말 및 비사의 형태로 사구로 공급되고 있음(Ceron, 1990; Fay and Jeffrey, 1992)을 보여준다.⁷⁾ 한편 EC의 경우는 대체



그림 3. 지형적 구배별 시료 그룹

로 치환성양이온의 전체 함량에 따라 특성이 좌우된다고 볼 때, 해변퇴적물이 값이 높을 수밖에 없다. 해변퇴적물과 사구퇴적물 간의 물리·화학적 특성의 차이가 극명하게 나타난다는 점은 병술안 해안사구에서도 해안사구와 해변이 서로 다른 지화학적 역할을 하고 있음을 보여준다.

지형적 구배에 따른 차이를 상세하게 살펴보기 위하여 사구퇴적물을 배아사구, 전사구, 2차사구로 나누어 검토하였다(그림 5). 평균 입경에서 전사구와 2차사구는 배아사구에 비해 세립한 특성을 보였으며, 상호간에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 분급은 배아사구에서 가장 불량하며, 2차사구에서 양호해진다. 일반적으로 해안선으로부터 배아사구-전사구-2차사구의 순서로 거리가 멀어지는 것을 염두에 둘 때, 입도특성에서 해안으로부터 육지 방향으로의 거리조각 효과가 일부 나타나는 것으로 판단되지만, 전사구와 2차사구간의 입도 특성의 차이는 크지 않았다.

유기물함량의 경우 배아사구에 비해 전사구와 2차사구가 높게 나타나는 특징을 보였으며, 2차사구와 비교했을 때 전사구의 평균치는 큰 차이가 없지만 값의 분포가 넓게 나타나는 특징을 보였다. 전사구의 경우에 방사립 하층의 초본식생이 밀생하고 있는 곳과

표 2. 지형별 표준 퇴적물의 특성

구분		평균 입경(φ)	분급 (φ)	LOI (%)	pH	EC (μS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)
해빈 (n=8)	평균	1.84	0.80	0.87	8.66	1078.57	119.49	12.83	105.27	7.07
	표준편차	0.50	0.54	0.46	0.34	130.25	93.15	7.66	67.45	3.83
해안사구 (n=40)	평균	2.10	0.52	1.04	5.76	245.22	82.96	7.12	12.44	3.18
	표준편차	0.25	0.28	0.65	1.74	197.10	153.59	10.92	30.01	3.90
배아사구* (n=5)	평균	2.07	0.53	0.57	8.42	449.00	295.86	6.05	25.48	4.01
	표준편차	0.13	0.15	0.21	0.18	216.42	351.43	1.70	19.35	1.18
전사구** (n=14)	평균	2.13	0.49	1.33	6.16	207.43	73.82	9.55	5.15	2.81
	표준편차	0.15	0.15	0.90	1.37	94.80	70.49	15.45	1.89	1.13
2차사구*** (n=21)	평균	2.15	0.47	0.97	4.72	180.25	26.96	4.70	5.71	2.12
	표준편차	0.16	0.14	0.44	1.18	91.74	41.22	6.90	2.41	0.93

* 북쪽 방조제 전면과 남쪽 물막이 전면에 위치, 1967년과 1985년 사이 방조제와 물막이 공사 이후 발달

** 해안선 방향에 위치한 사구열로 0.7~0.8ka 경에 형성(Yu *et al.*, 2009)

*** 다수의 사구열로 구성되어 있으며, 전면부터 1.1ka, 1.3~1.4ka, 1.5ka에 각각 형성(Yu *et al.*, 2009)

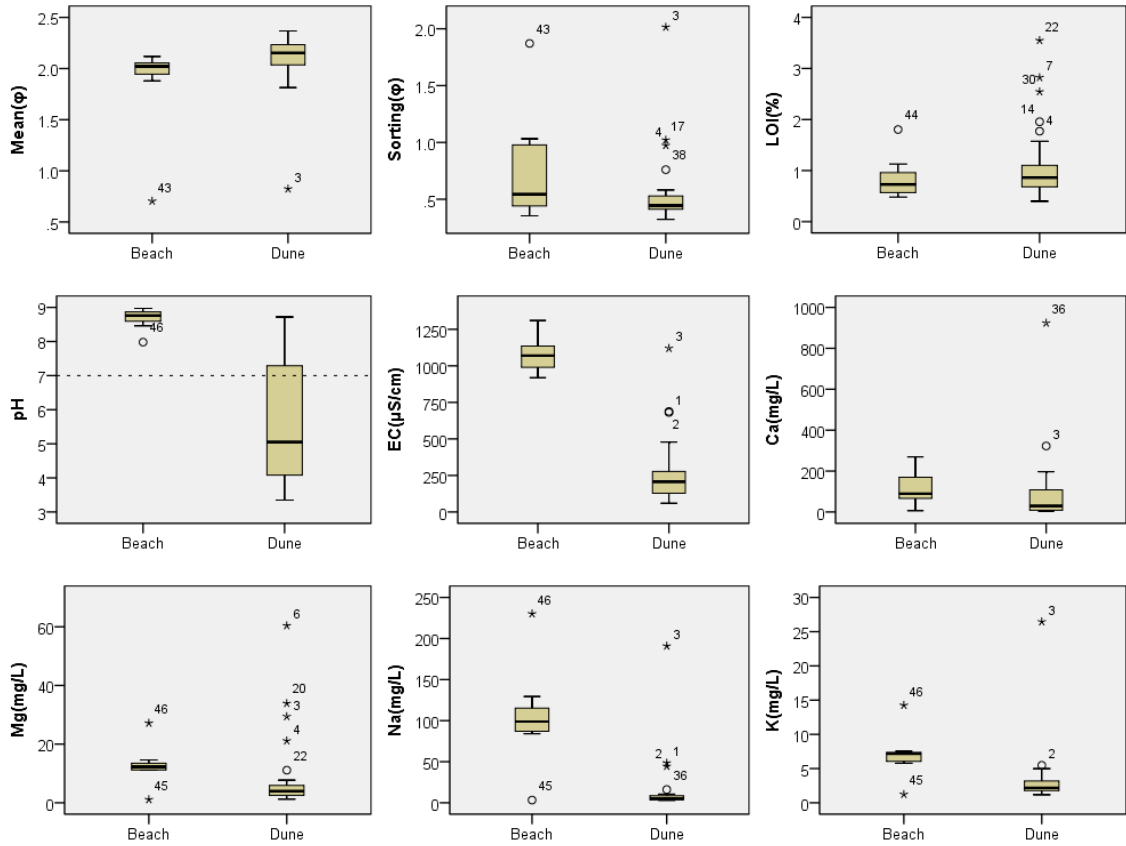


그림 4. 해변퇴적물-사구퇴적물 물리·화학적 특성 비교

그렇지 않은 곳이 다양하게 포함되었기 때문에 값의 편차가 다소 나타난 것으로 판단된다. 표층퇴적물의 채취 깊이가 0~20cm 범위였고, 일반적인 토양의 유기물 함량이 5% 내외로 나타나는 것을 비교해 볼 때, 현재 전사구와 2차사구에서는 충분한 유기물의 축적 및 토양화 과정이 일어나고 있다고 볼 수는 없었다.

pH와 EC, 그리고 치환성양이온들의 분석항목에서는 전반적으로 배아사구-전사구-2차사구 순으로 값이 낮아지는 경향을 보였으며, 배아사구-전사구 간의 차이보다 전사구-2차사구 간의 차이가 적게 나타나는 특성을 보였다. pH와 EC, 그리고 Ca²⁺ 항목에서는 배아사구-전사구-2차사구 순으로 값이 뚜렷하게 낮아지는 경향을 보였지만, Mg²⁺의 경우에는 배아사구와 전사구 간의 차이가 크지 않게 나타났으며, Na⁺와 K⁺의 경우에는 전사구와 2차사구 사이의 값

의 차이가 크지 않았다. 치환성양이온 함량의 경우 퇴적물 채취 방법⁸⁾에서 차이가 있어 직접적으로 비교는 어렵지만, 서해안에서 이루어진 기존 연구결과와 대비해 보면 조립에 의한 목본식생의 영향이 극명하게 드러난다. 김대현(2004)과 유근배 등(2012)은 조립이 이루어지지 않은 신두리 해안사구의 전면부를 대상으로 연구를 수행하였는데, Ca²⁺의 경우는 다소 불규칙적인 분포패턴을 보였다고 설명하였으며, 이를 패사 또는 패각의 유입 여부와 관련시켜 설명하였다. Mg²⁺은 해변으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 함량이 감소하는 경향이 보인다고 하였다. Na⁺의 경우 유근배 등(2012)은 해변으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 경향이 나타난다고 하였지만, 김대현(2004)은 오히려 증가하는 패턴이 나타나며 여름철 강우로 인한 용탈로서 원인을 추정하였다. 이에 반해

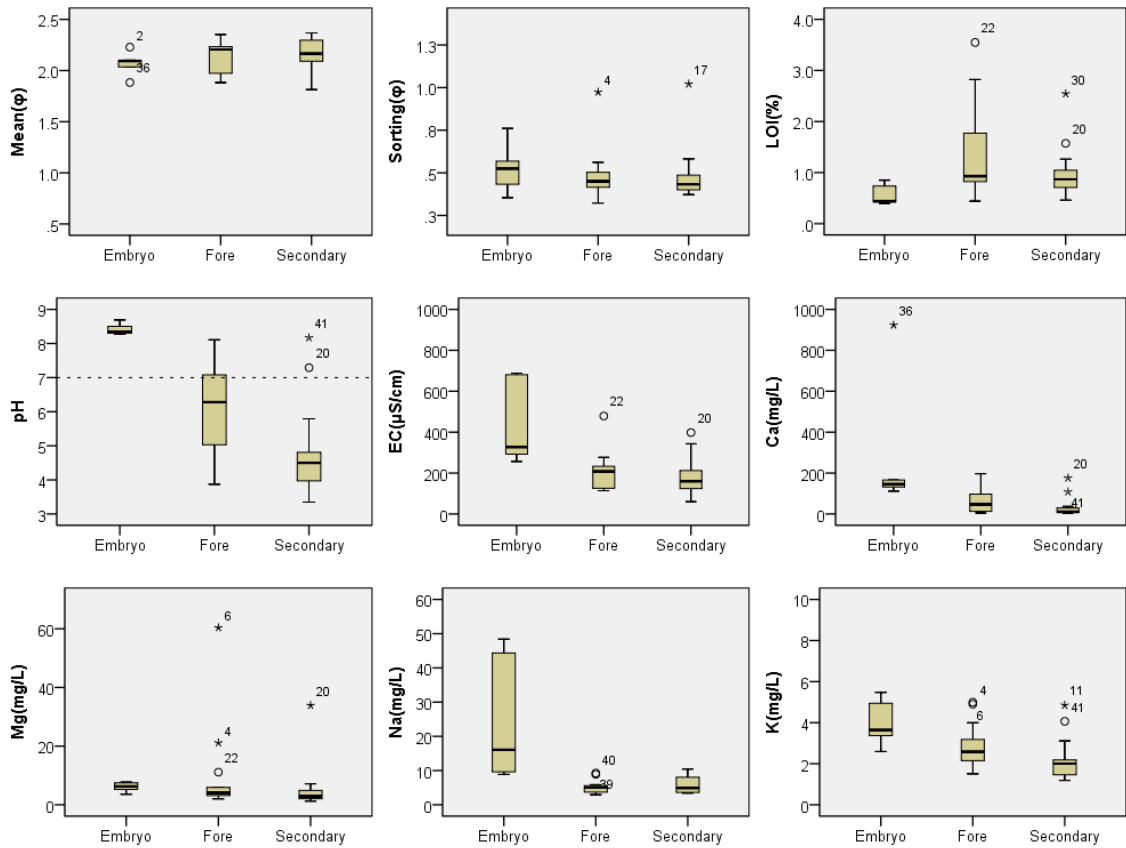


그림 5. 지형별 사구퇴적물의 특성

병술안 사구지대에서는 치환성양이온 항목에 따라 차이는 있지만 전반적으로 해빈에서 멀어질수록 함량이 급격히 감소하는 패턴이 나타났다. 병술안 사구지대의 경우 일부 배아사구를 제외하고는 주로 목본으로 피복되어 있어 모래의 유입과 염분포말의 유입이 전사구에서부터 급격히 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 영양염류가 사구 내로 유입되는 경로가 주로 염분포말(Clayton, 1972; van der Valk, 1974; Whipkey *et al.*, 2000)과 비사(유근배 등, 2005)임을 고려할 때 목본 식생의 피복 여부는 사구 내 지화학적 다양성을 감소시키는데 크게 기여할 것임을 추측할 수 있다.

종합해 볼 때, 해빈-배아사구-전사구-2차사구로 이어지는 거리조락의 효과(Salisbury, 1925; Clayton, 1972)가 병술안 사구지대에서도 나타나고 있다고 판

단된다. 그렇지만 병술안 사구지대의 경우 서구에서 연구된 자연적인 천이가 일어나는 사구지대와는 달리 몇몇 항목에 있어서는 거리조락 효과가 분명하지 않은 경향도 나타났고, 전사구와 2차사구 간의 차이가 크지 않은 경우도 많았다. 모래의 유입이 활발한 사구지대의 전사구는 지속적으로 침식과 퇴적이 반복되기 때문에 식생이 정착하지 못하거나 피복되더라도 초본 식생이 출현하는 것이 보통이지만, 병술안 사구는 조립에 의하여 전사구까지 목본 식생으로 피복되어 있어 사구로 유입되는 퇴적물 및 영양염류를 차단하였을 것이다.

2) 식생피복에 따른 표층 퇴적물의 특성

병술안 사구지대의 식생피복은 크게 초본, 곰솔림

과 혼합림으로 구성되어 있다. 서로 다른 식생 피복에 따라 퇴적물의 물리·화학적 특성이 차이가 나타나는지를 확인하기 위해 시료들을 재분류하여 초본(A), 곰솔림(B)과 혼합림(C)으로 나누어 퇴적물의 특성을 살펴보았다(표 3, 표 4, 그림 6). 시료들을 재분류하는 과정에서 곰솔림과 혼합림의 퇴적물 그룹들이 바다로부터의 거리라는 조건이 일치하도록 BS2와 BS3의 2차사구의 퇴적물 일부를 제외하였다.

평균입경은 혼합림의 퇴적물이 다소 세립한 결과가 나타났지만 큰 차이가 있다고 보기는 어려웠다. 반면에 분급에서는 혼합림의 퇴적물이 분급이 상대적으로 양호하게 나타났다. 전체적으로 보면 퇴적물 입도의 측면에서는 초본과 곰솔림의 퇴적물이 서로 비슷한 반면에, 혼합림이 다소 다른 유형의 입도 특성을 보인다고 할 수 있지만 의미를 부여할 정도로 큰 차이가 있지는 않았다.

유기물함량의 경우에는 혼합림 > 곰솔림 > 초본의 순서로 높게 나타났다. 시료 채취시 확인한 바로는 혼합림의 경우 하층식생이 잘 발달하여 있을 뿐만 아니



그림 6. 식생피복별 시료 그룹

표 3. 식생피복의 구분

구분	주요 식생**	현존식생 피복 시기*	시료 번호
A (n=5)	초본 - 갯그렁, 갯쇠보리, 통보리사초, 좁보리사초, 해당화, 순비기나무, 갯잔디 등	1992~2012년 사이	BS1-1 ~ BS1-2 BS4-1 ~ BS4-3
B (n=7)	침엽수림 - 곰솔	1967~1985년 사이	BS1-7 ~ BS1-11 BS4-4 ~ BS4-5
C (n=13)	혼합림 - 곰솔, 줄참나무, 벚나무, 굴참나무	1985~1992년 사이	BS2-1 ~ BS2-5 BS3-1 ~ BS3-8

* 시계열 항공사진을 통해 추정(1948, 1967, 1985, 1992, 2007, 2012)

** 환경부(2014)

표 4. 식생피복별 퇴적물의 물리·화학적 특성

구분		평균 입경(φ)	분급 (φ)	LOI (%)	pH	EC (μS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)
A (n=5)	평균	2.07	0.53	0.57	8.42	449.00	295.86	6.05	25.48	4.01
	표준편차	0.13	0.15	0.21	0.18	216.42	351.43	1.70	19.35	1.18
B (n=7)	평균	2.09	0.46	1.00	6.02	119.89	60.52	4.08	5.46	2.38
	표준편차	0.16	0.07	0.82	1.13	70.28	61.68	0.86	2.62	1.20
C (n=13)	평균	2.13	0.43	1.17	5.04	196.31	33.85	4.13	4.01	2.40
	표준편차	0.16	0.07	0.80	1.18	97.00	52.08	2.68	0.78	0.78

라 식생 밀도 또한 높게 나는 경향이 있었다. 따라서 퇴적물 내에 유기물의 축적이 더 이루어진 것으로 보인다. 그렇지만 일반적인 삼림의 토양과 비교했을 때는 매우 낮은 수치이다. 한편 초본피복지의 경우 식생 밀도가 높지 않을 뿐만 아니라 대부분 배아사구에 포함되어 있으므로 유기물의 축적이 상대적으로 낮았다고 볼 수 있다.

pH의 경우 초본>곰솔림>혼합림의 순서로 높은 수치를 보였다. 이는 유기물함량의 순서와 반대되는 경향으로, 혼합림의 경우 상대적으로 높은 유기물함량으로 인하여 산성도가 높은 반면에 초본피복지의 경우에는 인접한 해수의 영향으로 인하여 염기도가 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. 곰솔림의 pH(평균: 6.02)의 경우 다른 서해안 곰솔림인 구시포 및 명사십리 토양의 pH가 5.7~5.8임을(박종민 등, 2009) 감안할 때 조금 높은 편이지만 큰 차이가 있다고 보긴 힘들다. 혼합림의 경우에도(평균: 5.04) 완도 정도리 방풍 혼합림 토양의 경우 최저 4.7임을(임동욱 등, 2010) 비교했을 때, 조금 높거나 비슷한 편이다. EC의 경우에는 해수의 영향을 많이 받는 초본피복지가 높게 나타났으며, 곰솔림과 혼합림 간에는 혼합림이 조금 높은 경향이 있었다.

치환성양이온 항목의 경우 초본피복지가 곰솔림과 혼합림에 비해 모든 항목에서 높게 나타났다. 이는 모래의 유입과 염분포말의 유입 정도가 극명히 다르게 나타나기 때문이다. 곰솔림과 혼합림 사이에는 곰솔

림의 경우 다른 서해안 곰솔림인 구시포 및 명사십리 토양의 pH가 5.7~5.8임을(박종민 등, 2009) 감안할 때 조금 높은 편이지만 큰 차이가 있다고 보긴 힘들다. 혼합림의 경우에도(평균: 5.04) 완도 정도리 방풍 혼합림 토양의 경우 최저 4.7임을(임동욱 등, 2010) 비교했을 때, 조금 높거나 비슷한 편이다. EC의 경우에는 해수의 영향을 많이 받는 초본피복지가 높게 나타났으며, 곰솔림과 혼합림 간에는 혼합림이 조금 높은 경향이 있었다.

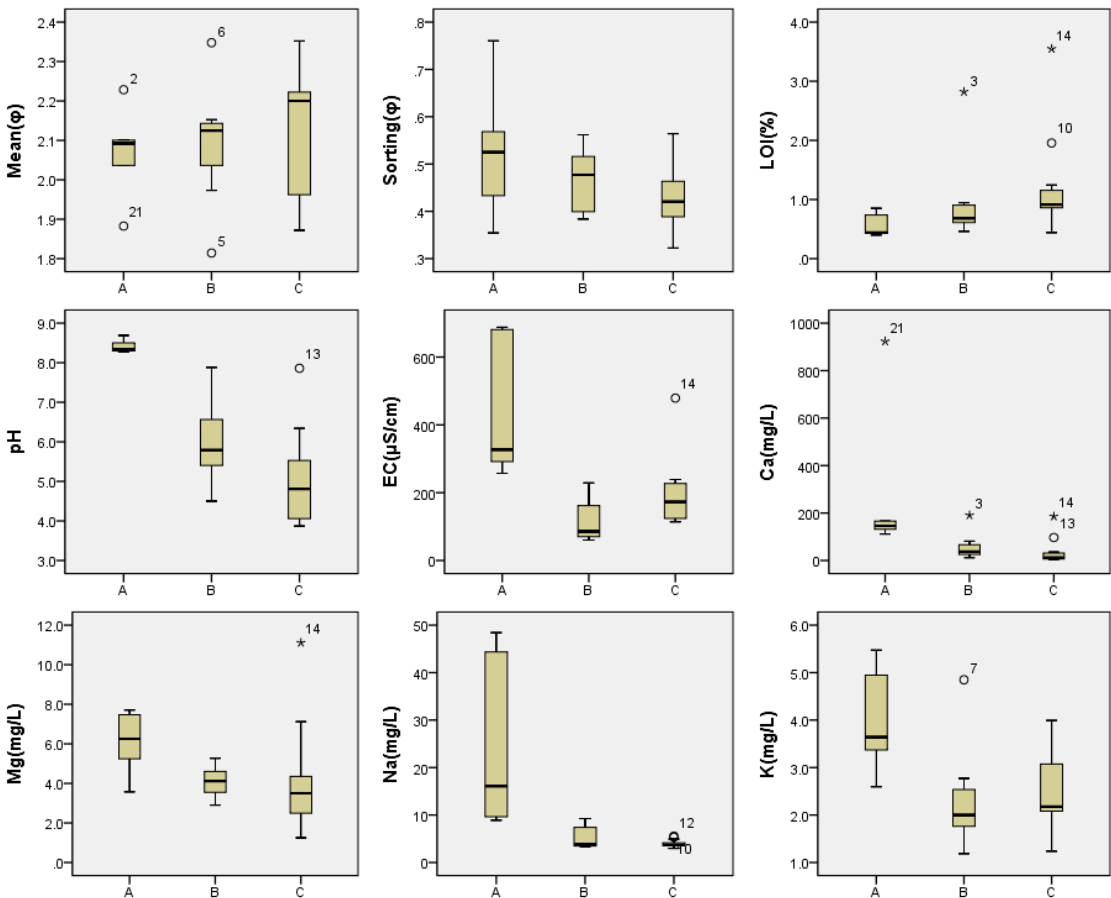


그림 7. 식생피복별 사구퇴적물의 물리·화학적 특성(A: 초본, B: 곰솔림, C: 혼합림)

림에서 K^+ 을 제외한 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 이 조금 높게 나타나는 특성이 있었다. 이러한 차이는 하층 식생이 조밀하지 않은 곰솔림의 경우에 염분포말이 다소 많이 유입된 것으로 해석해 볼 수 있다. 그렇지만 통계적으로 서로 차이가 난다고 보기는 어려웠다. 한편 K^+ 는 혼합림에서 조금 높게 나타났는데, 식생자체에 상당량의 K^+ 가 고정될 뿐만 아니라(van der Valk, 1974) K^+ 와 식생 피복 유형과의 명확한 상관관계를 확인할 수 없다는 연구(Chapin *et al.*, 1986; Houle, 1997)도 있어, 식생과 K^+ 함량의 관계를 명확히 설명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

종합해 볼 때, 초본피복지는 퇴적물의 입도 특성은 큰 차이가 없지만 해수의 영향을 크게 받아, pH, EC, 그리고 모든 치환성양이온 항목이 높게 나타난 반면, 유기물함량은 목본 식생으로 피복되어 있는 경우보다 낮았다. 목본으로 피복된 곰솔림과 혼합림 간에는 곰솔림에서 유기물함량이 낮고 pH가 높은 특성이 보였으며, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 등의 치환성양이온의 경우에도 조금 높은 경향이 있었다. 이는 혼합림에 비해 하층식생이 덜 발달하였을 뿐만 아니라 식생의 밀도 또한 낮아, 유기물축적이 적게 일어나고 염분포말이 쉽게 유입되었기 때문으로 판단된다. 그렇지만 해당 항목의 차이는 그리 큰 편은 아니었으며, EC의 경우 혼합림이 높은 특성을 보이기 때문에 보다 연구가 더 진행되어야 할 필요가 있다. 한편 추가적으로 40~60cm 퇴적물, 80~100cm의 퇴적물의 특성을 앞의 분석과 동일하게 식생피복별로 비교하였을 때, 곰솔림과 혼합림에서 관찰되었던 지화학적 특성의 차이는 거의 없어, 식생피복에 의한 영향은 지표퇴적물에만 국한됨을 확인할 수 있었다. 더 나아가 곰솔림과 혼합림의 퇴적물의 물리·화학적 특성이 극명하게 다르지 않은 점은 현존 식생이 자연적으로 천이된 것이 아닌 식재 또는 교란을 받았으며, 그 이후 충분한 시간이 지나지 않았기 때문이라고 판단된다.

3) 사구 미지형(사구열-사구저지)과 퇴적깊이별 퇴적물의 특성

사구열(dune ridge)과 사구열 사이의 사구저지(swale)는 사구지대 내의 미지형을 구성하고 있으며,

상대적인 고도나 경사, 향 등의 차이로 인하여 지화학적·생물학적으로 국지적인 차이가 나타나는 것으로 알려져 있다(Kim and Yu, 2009). 병술안 사구지대의 중앙부에서는 최대 6열이 확인될 정도로 해안선의 전진으로 인한 사구열이 발달해 있다. 조립 또는 교란된 병술안 사구지대에서도 사구열과 사구저지간 퇴적물의 물리·화학적 특성이 달라지는 지를 확인하기 위하여, 사구열을 가장 많이 포함하고 있는 BS2와 BS3를 중심으로 살펴보았다(표 5, 그림 8).

평균입경의 경우 사구열에서는 중층(40~60cm)이 표층(0~20cm)과 하층(80~100cm)에 비해 다소 조립한 경향을 보였다. 반면에 사구저지는 중층이 표층이나 하층에 비해 세립한 경향을 보여 서로 다른 경향을 보였다. 그리고 각 층간 사구열과 사구저지를 비교할 때, 서로 다른 특성을 보였다. 그림 9와 같이 각 시료채취장소별로 볼 때에도 평균입경의 차이가 명확히 나타난다. 그림 10에서 사구열(R)의 경우 중층-표층-하층의 순으로 평균입경이 조립한 것으로 나타나는 반면에 사구저지(S)의 경우 표층-하층-중층의 순으로 조립한 것으로 나타난다. 분급에서는 사구열에서는 표층이 가장 불량하고 중층과 하층이 큰 차이가 없는 반면에, 사구저지에서는 하층이 가장 양호한 분급을 보이며 표층과 중층이 큰 차이가 나타나지 않았다. 또한 각 층간 사구열과 사구저지를 비교하면 표층에서는 사구열이, 중층에서는 사구저지가 불량한 특성을 보였다. 시료채취장소별로 볼 때(그림 10)에도 사구열과 사구저지의 분급의 차이가 분명히 드러난다.

이와 같이 입도 특성에서 사구열과 사구저지의 특성이 차이가 나는 이유는 현재로서는 설명하기 어렵다. 다분히 추정에 근거해 설명해 본다면 장기간에 걸친 세립질 입자의 이동과 관련되어 있을 것으로 판단된다. BS2 측선과 BS3 측선에서 사구열과 사구저지의 형성시기는 비교적 오래된 것(Yu *et al.*, 2009)으로 비교적 장기간 동안 현재와 같은 지형을 이루고 있었으며, 1960~70년대 곰솔 식재 이전에 강수나 지하수의 움직임에 의해 세립질 입자가 이동되었을 것으로 보인다. 사구열의 경우 중층에서 평균입경은 상대적으로 조립하고 분급이 양호한 특성을 보이는데, 중층

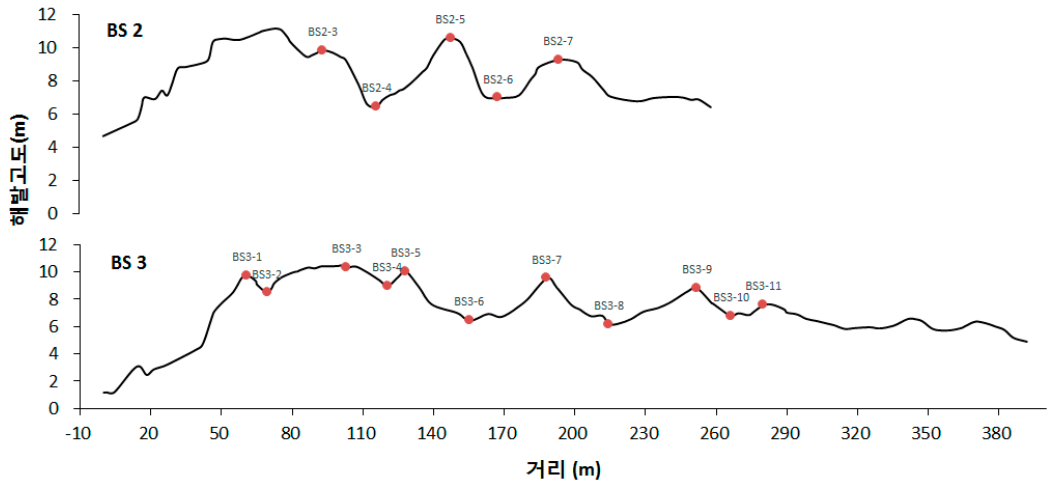


그림 8. 퇴적물 채취 지점 단면도

표 5. 사구열-사구저지 깊이별 사구퇴적물 특성

구분		평균 입경(ϕ)	분급 (ϕ)	LOI (%)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Na^{+} (mg/L)	K^{+} (mg/L)	시료 번호	
사구열	0~20 (n=9)	평균 표준편차	2.26 0.07	0.46 0.06	0.99 0.43	4.79 1.25	186.67 40.31	22.74 30.21	3.44 2.07	4.83 1.38	2.36 0.64	BS2-3 BS2-5
	40~60 (n=9)	평균 표준편차	2.12 0.15	0.36 0.02	0.34 0.07	5.58 1.26	85.02 48.99	14.12 24.30	1.34 0.64	3.72 0.69	1.23 0.29	BS2-7 BS3-1 BS3-3
	80~100 (n=9)	평균 표준편차	2.33 0.10	0.39 0.03	0.23 0.04	5.96 1.06	73.08 35.52	11.44 15.02	1.49 0.72	3.60 0.85	1.32 0.51	BS3-5 BS3-7
	합계 (n=27)	평균 표준편차	2.24 0.14	0.41 0.06	0.52 0.42	5.44 1.25	114.92 65.76	16.10 23.58	2.09 1.60	4.05 1.13	1.64 0.71	BS3-9 BS3-11
	사구저지	0~20 (n=7)	평균 표준편차	1.98 0.09	0.49 0.24	1.53 1.08	4.51 0.87	231.57 133.92	36.92 66.61	3.99 3.43	3.79 0.61	2.26 0.89
사구저지	40~60 (n=7)	평균 표준편차	2.32 0.06	0.41 0.02	0.34 0.07	5.34 1.14	102.39 44.28	14.77 25.01	1.57 0.76	3.44 0.71	1.32 0.56	BS3-2 BS3-4
사구저지	80~100 (n=7)	평균 표준편차	2.18 0.10	0.37 0.02	0.26 0.04	6.02 1.00	75.84 40.74	9.93 9.68	1.59 0.87	3.39 0.94	1.25 0.30	BS3-6 BS3-8
사구저지	합계 (n=21)	평균 표준편차	2.16 0.16	0.42 0.14	0.71 0.84	5.29 1.14	136.60 106.42	20.54 41.13	2.38 2.30	3.54 0.75	1.61 0.76	BS3-10

에서 세립질이 유출된 것으로 판단된다. 한편 사구저지의 중층은 평균입경이 상대적으로 세립하고 분급이 불량하게 나타나는 반면 상층은 평균입경이 상대적으로 조립하고 분급이 양호하여, 상층에서 중층으

로 세립질이 이동된 것으로 추정된다. 그렇지만 이에 대한 메커니즘은 추가적인 연구를 통해 보다 분명히 밝혀져야 할 내용으로 판단된다.

유기물함량의 경우 사구열과 사구저지 모두 표층

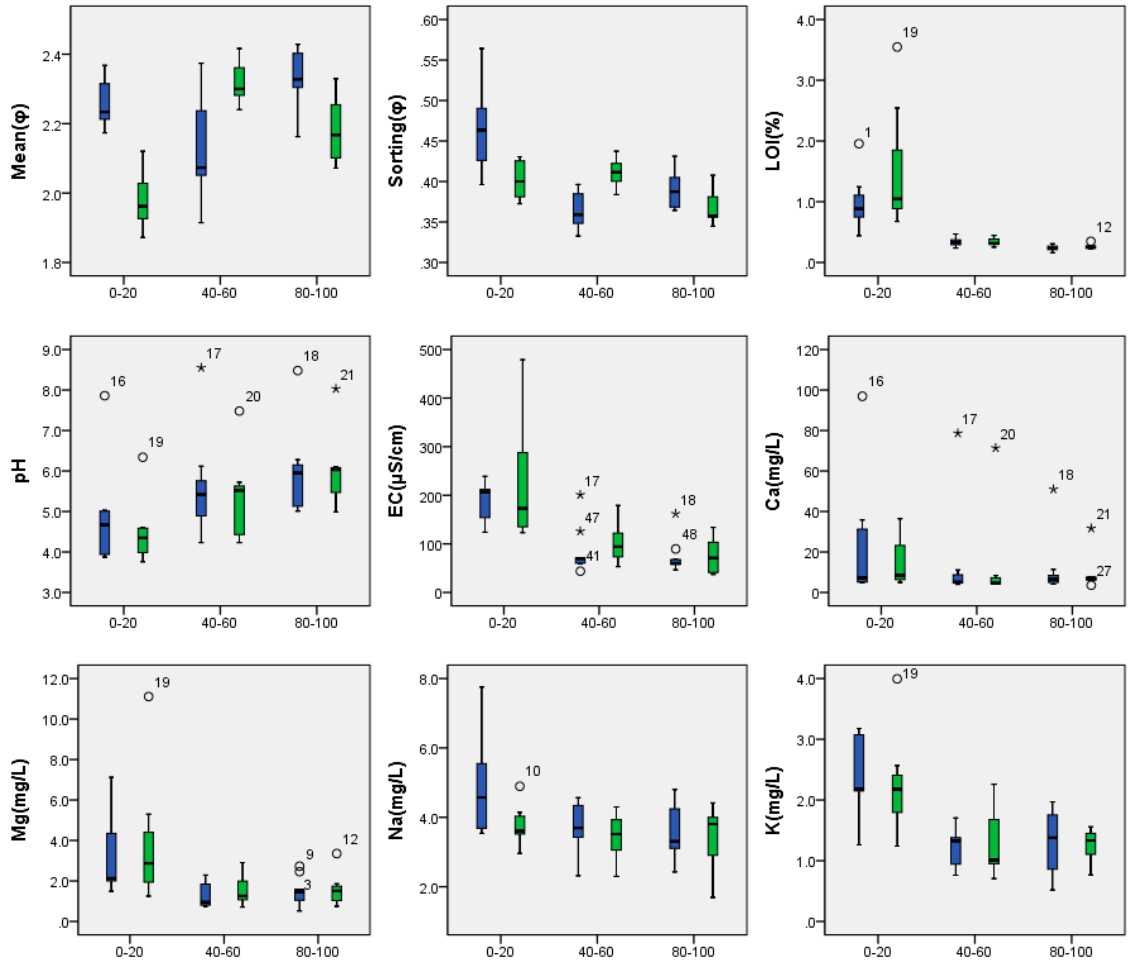


그림 9. 사구열-사구저지 깊이별 사구퇴적물 특성 비교(청색: 사구열, 녹색: 사구저지)

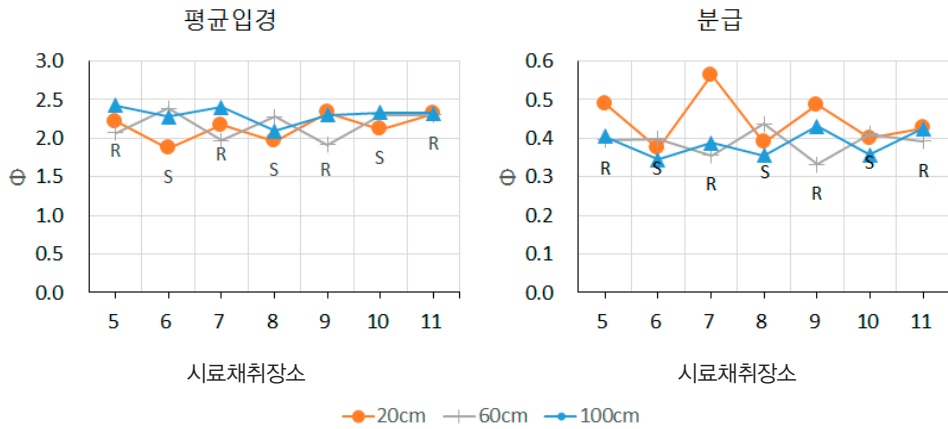


그림 10. BS3 축선의 사구열(R)-사구저지(S) 입도특성 추이

에서 가장 높은 함량을 보였으며, 중층과 하층의 유기물함량은 매우 적은 수치를 보였다. 표층의 유기물함량의 경우 사구저지에 비해 사구열이 다소 높았으며, 중층과 하층에서는 차이가 없었다. pH의 경우 사구열과 사구저지 모두에서 표층에서 하층으로 가면서 염기도가 높아지는 경향이 나타났으며, 사구열과 사구저지간의 차이는 크게 나타나지 않았다. EC의 경우에도 사구열과 사구저지 모두에서 표층이 중층이나 하층에 비해 높은 값을 보였으며, 각 층에서 사구열과 사구저지 간 값의 차이는 크지 않았다. 치환성양이온 항목의 경우 사구열과 사구저지 모두에서 표층의 함량이 높은 경향을 보였지만, 중층과 하층간의 차이는 크지 않았다. 사구열과 사구저지간 각 층을 비교했을 때는 Na^+ 의 경우 표층에서만 사구열이 조금 높게 나타나는 경향을 보였고, 나머지 항목에서는 큰 차이를 확인할 수 없었다.

비교적 장기간의 지형적 영향이 반영되어 있는 입도분석 결과를 제외한, 외부의 환경에 보다 민감하게 반응하는 다른 분석항목 중에서 유기물함량, EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 경우 전체적으로 표층에서 장소별로 편차가 심한 특성을 보인 반면, 중층이나 하층의 경우에는 상대적으로 일정한 편차를 보였다. 따라서 이들 항목의 경우 표층을 중심으로 외부의 영향을 쉽게 받고 있으며, 중층이나 하층의 경우에는 그 영향이 적게 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 사질 토양인 사구의 특성상 용탈이 쉽게 일어나는 것과(김도균, 2010) 관련이 있을 것으로 판단된다.

사구지대 내의 미지형요소에 따라 퇴적물에서 확인되는 특성을 종합하면, 미지형요소에 따라 퇴적물의 입도특성은 크게 차이가 나는 반면에, 다른 분석항목들은 미지형요소에 따라 크게 차이가 나지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 조립이 이루어진 병술안 해안사구지대에서는 미지형요소의 차이에 의한 물리적 환경은 분화되어 왔지만, 지화학적 특성의 차이는 크게 나타나고 있지 않아, 자연적으로 식생이 천이되는 사구지대에서 관찰되는 지형에 기록에 따른 토양학적 분화와 이와 관련된 식생 군락의 분화(Oosting and Billings, 1942)가 온전히 이루어지고 있지 않다고 판단할 수 있다.

4. 결론

바닷바람과 비사로부터 주거지와 농경지를 보호하기 위해 한국의 해안사구 대부분은 방사림이 조성되어 있어 사구의 활동성을 저하시킬 뿐만 아니라 자연적인 사구 식생을 살펴보기는 어려운 실정이다. 방사림 조립 사업이 1952년에 시작되어 1960~70년대 시행된 해안방사림사업에 의해 활성화되었기 때문에 현재 존재하는 방사림은 최대 50년의 기간 동안 성숙되었고(Chun and Ezaki, 2002), 일부 방사림 군락은 이차림으로 천이가 나타난 사례(e.g. 김하승, 2008; 임동욱 등, 2010)가 보고되고 있다는 측면에서 현재와 같이 유지 및 보전해야 한다는 의견이 주를 이루어왔다. 그렇지만 본 연구의 결과에 비추어 보았을 때, 해안사구의 다양한 기능 중 해안생태계 영양 순환의 역할이나 다양한 생물의 서식처의 역할의 측면(유근배·류호상, 2007, 유근배 등, 2013)에서 이러한 해안사구 식생피복의 단순화에 대한 재고를 할 여지가 있다고 판단된다.

영양분의 함유량은 바다로부터의 거리에 영향을 받는 거리조락의 현상이 나타나며, 나아가 식생이 대상으로 분포하게 하는 원인이 된다고 알려져 있다(Kachi and Hirose, 1979; Wilson and Sykes, 1999). 그렇지만 병술안 해안사구지대의 경우 해빈으로부터 2차사구에 이르는 퇴적물의 물리·화학적 특성을 살펴볼 때, 전사구까지 조립이 되어 있는 특성이 반영되어 배아사구와 전사구 간 큰 차이를 나타내는 반면 전사구와 배후의 2차사구 간 특성의 차이는 크지 않아, 식생이 대상 분포가 나타날 수 없는 조건을 이루고 있다.

삼림으로 고정된 사구의 경우 식생으로 인해 바다로의 영양분 공급이 일부 차단되는 한편, 식생으로부터의 영양분 환원에 따른 공간적인 재분배가 나타난다. 병술안 사구에서는 곰솔림과 혼합림의 퇴적물의 특성을 비교했을 때, 물리·화학적 특성이 서로 극명하게 다르지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 현존 식생이 자연적으로 천이된 것이 아닌 식재 또는 교란을 받은 결과로 나타난 것이라 할 수 있으며, 각 식생

유형들이 성숙할 수 있는 기간이 상대적으로 부족했기 때문이라고 볼 수 있다. 이를 통해 볼 때, 현존 식생의 생물다양성은 해안사구퇴적물의 지화학적 다양성과 잘 연계되고 있는 단계가 아닌 것으로 판단할 수 있다.

해안사구의 사구열과 사구저지와 같은 미지형적 특징은 사구 토양의 지화학적 다양성을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 특히, 사구의 기복의 차이와 같은 지형적 다양성은 영양분 유입의 공간적 편중을 유발하여 재분배가 일어나게 하여(van der Valk, 1974), 생물다양성을 증가시키는 원인이 되기도 한다(유근배 등, 2012). 그렇지만 병술안 해안사구에서는 지화학적 다양성이 크게 확인되지 않았다.

종합하면 전사구까지 조밀하게 조림이 이루어진 병술안 해안사구에서는 지형다양성-지화학적 다양성-생물다양성이 상호 연계된 단계에 이르지 못했음을 확인할 수 있었다. 물론 이 연구는 서해안 해안사구 전체를 대상으로 한 것이 아니기 때문에 방사림이 식재된 모든 해안사구에 동일하게 적용될 지는 분명하지 않다. 또한 지형다양성-지화학적 다양성-생물다양성의 상호 관계를 단순화시켜 살펴보았기 때문에 내재되어 있는 메커니즘을 파악하는 데에는 한계가 있었다. 그렇지만 해안사구의 본연의 특성을 회복하기 위해서는 역동적이며 다양한 지형적·생태적 특성을 조성⁹⁾해 나가기 위해 보다 다각적인 방면으로 연구들이 추가적으로 진행되어야 함을 도출할 수 있었다.

주

- 1) 전국 해안사구 정밀조사는 해안사구의 형성과정과 보전상태 및 생태현황에 대한 정밀자료를 확보하여 해안사구의 기능과 가치 평가를 통해 국민의 의식을 제고하고 각종 개발압력으로부터 자연 생태계가 우수한 사구지대를 보호하기 위한 효율적 관리 방안을 제시하려는 목적으로 수행되고 있으며, 환경부에 의해 2003년부터 2013년까지 38개(서해안 23개, 동해안 8개, 남해안 7개)의 사구가 조사되어 생태자연도를 비롯한 각종 환경정보시스템에 포함되는 등

사구의 보전에 긍정적 기여를 해왔다.

- 2) 태안군 안면읍 중장리에 위치하고 있어 중장사구라고도 불린다.
- 3) 병술만으로 불리며, 만의 대부분은 방조제가 축조되어 간척되어 있다.
- 4) 해수로부터 해변의 모래와 염분 포말로 유입되는 영양염류이며, 해수의 화학적 조성을 참고하여 식물 생장과 관련된 특성을 선택하였다. 한편, 해수의 평균적인 화학조성(중량비)은 다음과 같다. $Cl^- (55.04\%) > Na^+ (30.62\%) > SO_4^{2-} (7.68\%) > Mg^{2+} (3.69\%) > Ca^{2+} (1.15\%) > K^+ (1.10\%) > HCO_3^- (0.41\%)$ (Been, 1983; White *et al.* (1992)에서 재인용)
- 5) 통계적 검증의 결과는 본문 중에 일일이 기재하지 않았지만, 차이가 있다고 밝힌 부분은 통계적 유의성이 고려된 것이다.
- 6) 유형별 구분이 통계적으로 의미를 높이려면 유형별 시료 채취지점의 수가 유사해야 하는 것이 일반적이지만, 이 연구에서 지형구별 시료채취지점의 수가 각 유형별로 차이가 나타나는 것은 각 유형의 공간적 규모가 달랐기 때문이다. 예를 들면 배아사구의 경우 BS1과 BS4에서만 나타나고, 측선 내에서 전사구의 분포 거리에 비해 2차사구의 분포 거리가 길었던 것이 반영되어 있다.
- 7) 기반암의 풍화를 통한 치환성양이온의 공급도 고려될 수 있지만, 해안사구의 경우 대부분 풍화가 진전되어 있는 석영질 모래로 구성되어 있어 그 영향 정도는 작을 것으로 판단된다.
- 8) 유근배 등(2012)에서는 모래포집기를 통해 이동되는 모래 퇴적물을 채취하였으며, 채취 장소도 전사구를 중심으로 이루어졌다.
- 9) 예를 들면 해변-배아사구-전사구-2차사구로 전개되는 해역과 육역의 전이지대인 공간적 특성이 다양한 해안사구로 관리 및 보전하기 위해서는 전사구를 중심으로 방사림의 부분적 제거와 같은 방안도 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김대현, 2004, “해수와 해변 모래 기원 영양소의 공간적 분포: 신두리 해안사구 지대를 대상으로,” *지리학논총*, 43, 57-79.
- 김도균, 2010, “한국 남해안방풍림 자생수종의 내염성 및 내조성 수종 선별,” *한국환경생태학회지*, 24(1),

- 14-25.
- 김찬범 · 손요환 · 배영태 · 박기형 · 윤호중 · 김경하 · 이창우, 2013, “중부 서해안 해안사구 자생식물과 귀화식물 군락의 토양특성 비교,” 한국임학회지, 102(3), 323-330.
- 김하송, 2008, “전남 진도군 관매도 해안 방풍림의 식생과 관리방안,” 한국자연식물학회지, 21(1), 5-11.
- 류완상, 2002, “해안사구의 바람과 비사에 관한 연구-서해안 신두리를 사례로-,” 지리학논총, 40, 93-118.
- 박종민 · 김성원 · 박성학, 2009, “고창 구시포 해안 곰솔림의 생장특성에 관한 연구,” 한국환경생태학회지, 23(4), 365-375.
- 송호경 · 박관수 · 박혜림 · 서은경 · 소순구 · 김무열, 2005, “태안군 신두리 해안사구의 식생과 토양특성,” 한국환경복원녹화기술학회지, 8, 59-68.
- 신학섭 · 김혜진 · 한상학 · 고승연 · 강혜진 · 이서희 · 이천용 · 김찬범 · 배영태 · 신재권 · 윤충원, 2013, “서해안 해안사구식생의 유형분류와 사구토양 및 식물 무기성분 비교,” 한국임학회지, 102(3), 345-354.
- 유근배 · 류호상, 2007, 한국 서해안의 해안사구: 지형학적 관점을 중심으로, 서울대학교 출판부.
- 유근배 · 류호상 · 김성환, 2005, “비사를 통해 신두 사구지대로 유입되는 주요 양이온의 규모와 공간적 패턴 분석,” 지리학논총, 45, 165-183.
- 유근배 · 신영호 · 김대현 · 김성환, 2012, “신두해안사구지대로 유입되는 영양염류의 시공간적 특성,” 대한지리학회지, 47(2), 193-207.
- 유근배 · 신영호 · 김성환 · 김대현, 2013, 생태서식처로서 한국 서해안 해안사구, 서울대학교 출판문화원.
- 임동욱 · 최현우 · 장정재, 2010, “다도해해상국립공원 완도 정도리 방풍림의 식생구조와 보전,” 한국환경생태학회지, 24(1), 69-77.
- 최광희 · 정필모 · 김윤미 · 서민환, 2012, “태풍의 통과로 인한 해안사구 지형의 침식과 회복,” 한국지형학회지, 19(1), 17-27.
- 홍선기 · 박정원 · 양효식, 2006, “생태관광자원으로서 도서 지역 곰소의 생태적 특징-전라남도 신안군 중도,” 도서문화, 28, 223-244.
- Acosta, A., Carranza, M.L., and Izzi, C.F., 2009, Are there habitats that contribute best to plant species diversity in coastal dunes?, *Biodiversity and Conservation*, 18(4), 1087-1098.
- Blott, S.J. and Pye, K., 2001, GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Carter, R.W.G., 1988, *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*, Academic Press.
- Ceron, R.M.G., Nordstrom, K.F., and Psuty, N.P., 1990, The study of coastal dunes, in Nordstrom, K.F., Psuty, N.P., and Carter, R.W.G. (eds.), *Coastal Dunes: Form and Process*, John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ, 5.
- Chapin III, F.S., Vitousek, P.M., and van Cleve, K., 1986, The nature of nutrient limitation in plant communities, *The American Naturalist*, 127(1), 48-58.
- Chun, K.W. and Ezaki, T., 2002, A study on coastal sand dune fixation and stabilization in Korea(I) -On progress and erosion control facilities-. *Journal of the Japanese Society of Coastal Forest*, 2(1), 1-4.
- Clayton, J.L., 1972, Salt spray and mineral cycling in two California coastal ecosystems, *Ecology*, 53, 74-81.
- Fay, P.J., and Jeffrey, D.W., 1992, The foreshore as a nitrogen source for marram grass, in Carter, R.W.G., Curtis, T.G.F. and Sheehy-Skeffington, M.J. (eds.), *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*, Balkema, Rotterdam & Brookfield, 177-188.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters, *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26.
- Friedman G.M., 1961, Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics, *Journal of Sedimentary Petrology*, 31(4), 514-529.
- Houle, G., 1997, Interactions between resources and abiotic conditions control plant performance on subarctic coastal dunes, *American Journal of Botany*, 84(12), 1729-1737.
- Kachi, N. and Hirose, T., 1979, Multivariate approaches of the plant communities related with edaphic factors in the dune system at Azigaura, Ibaraki Pref. I. Association-analysis, *Japanese Journal of Ecology*, 29, 17-27.

- Kim, D. and Yu, K.B., 2009, A conceptual model of coastal dune ecology synthesizing spatial gradients of vegetation, soil, and geomorphology, *Plant Ecology*, 202(1), 135-148.
- Kim, Y., Choi, K.H., and Jung, P.M., 2014, Changes in foredune vegetation caused by coastal forest, *Ocean & Coastal Management*, 102(A), 103-113.
- Martínes, M.L. and Psuty, N.P. (eds.), 2004, *Coastal dunes: Ecology and Conservation*, Springer, New York.
- Nordstrom, K.F., Psuty, N.P., and Carter, B., 1990, *Coastal dunes: form and process*, Wiley, Hoboken, NJ.
- Oosting, H.J. and Bilings, W.D., 1942, Factors effecting vegetational zonation on coastal dunes, *Ecology*, 23(2), 131-142.
- Psuty, N.P. and Ofiara, D.D., 2002, *Coastal hazard management: Lessons and future directions from New Jersey*, Rutgers University Press, New Brunswick, NJ.
- Psuty, N.P., 2004, Coastal foredune development and regional morphology, In: Martínes, M.L. and Psuty, N.P. (eds.), *Coastal dunes: Ecology and Conservation*, Springer, 11-25.
- Salisbury, 1925, Note on the edaphic succession in some dune soils with special reference to the time factor, *Journal of Ecology*, 13(2), 322-328.
- van der Valk, A.G., 1974, Mineral cycling in coastal fore-dune plant communities in Cape Hatteras National Seashore, *Ecology*, 55(6), 1349-1358.
- Whipkey, C.E., Capo, R.C., Chadwick, O.A., and Stewart, B.W., 2000, The importance of sea spray to the cation budget of a coastal Hawaiian soil: a strontium isotope approach, *Chemical Geology*, 168, 37-48.
- Wilson, J.B. and Sykes, M.T., 1999, Is zonation on coastal sand dunes determined primarily by sand burial or by salt spray? A test in New Zealand dunes, *Ecology Letters*, 2(4), 223-236.
- Yu, K.B., Brook, G.A., Rhew, H., Shin, Y.H., Kim, S.H., and Brook, F.Z., 2009, Episodic coastal dune development in the Taean Peninsula and Anmyeon Island, Korea, during the mid to late Holocene, *Journal of Quaternary Science*, 24(8), 982-990.
- 교신: 이현아, 서울특별시 관악구 관악로 1, 서울대학교 지리학과(이메일: uuuzzuuu@snu.ac.kr)
Correspondence: Hyoun A Lee, Department of Geography, Seoul National University, Gwanak-ro 1, Gwanak-gu, Seoul, Korea (e-mail: uuuzzuuu@snu.ac.kr)
- 최초투고일 2015. 7. 21
수정일 2015. 8. 15
최종접수일 2015. 8. 27