

신두해안사구지대로 유입되는 영양염류의 시공간적 특성

유근배* · 신영호** · 김대현*** · 김성환****

Spatio-temporal Variation of Incoming Nutrient into Shindu Coastal Dune, Korea

Keun Bae Yu* · Young Ho Shin** · Daehyun Kim*** · Sung Hwan Kim****

요약 : 이 연구는 생물서식처로서의 신두해안사구의 특성을 밝히고, 해안사구 내에서 지형다양성과 생물다양성 간의 관계를 살피기 위해, 신두해안사구지대에서 전사구 형태의 차이에 따라 발생하는 영양염류 유입의 시공간적 특성을 파악하였다. 영양염류의 주요 유입 통로를 바람에 의한 해변 모래의 이동으로 설정하였으며, 서로 다른 형태적 조건을 지닌 세 유형의 전사구에서 일정기간동안 유입된 영양염류(Na, Mg, K, Ca, P) 농도의 시공간적 특성을 비교하였다. Na, Mg, 그리고 K는 사구의 형태가 모래유입에 유리한 조건인 경우 공간적으로 내륙까지, 시간적으로는 더 늦은 시기까지 높거나 불규칙한 패턴이 관찰되었다. 이들 영양염류는 전사구에 형태에 따라 달라지는 비사의 유입변화와 관련이 깊다. Na의 경우 비사 이외에도 다른 유입경로도 중요함을 확인하였다. P는 해수와 비사의 영향과는 무관한 것으로 나타났으며, Ca는 국지적인 미지형보다 전체 해안사구시스템의 규모에서 분포의 차이가 났다. 영양염류의 시공간적 특성의 차이로 인해 주요 식생이 다르게 나타나는 것을 유추할 수 있었다. 이 연구는 생물서식처로서의 해안사구 지형이 지니는 역동성을 보여주며, 추후 해안사구의 관리나 해안사구 생물의 분포와 성장패턴을 이해하는데 정보를 제공해 줄 것이다.

주요어 : 해안사구, 전사구, 지형다양성, 영양염류, 시공간적 특성

Abstract : This study discussed characteristics of Shindu Coastal Dune as habitat, and relationship between geodiversity and biodiversity. It was identified spatio-temporal variation of incoming nutrients depended on geomorphic differences of foredunes. The main incoming path of nutrients into coastal dune was considered as influx with movement of wind blown sands from the beach and tidal flat. Concentrations of Na, Mg, K, Ca, and P in blown sands were compared. Concentrations of Na, Mg, and K showed high and irregular pattern in favorable condition of influx of blown sand. So these nutrients were related with geomorphic characteristics of foredunes. However, Na was also influenced by other factor such as salt spray. P was independent from effects of sea water and blown sands. In the case of Ca, a large coastal dune system rather than localized forms of foredunes made differences in the variation. Due to differences in spatio-temporal variation of nutrients, patterns of major vegetation could be inferred to

이 논문은 2003년도 서울대학교 한국학지원사업의 지원을 받아 연구되었음.

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

** 서울대학교 국토문제연구소 선임연구원(Senior Researcher, The Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University), syhgeo@snu.ac.kr

*** 켄터키주립대학교 지리학과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography, University of Kentucky), biogeokim@uky.edu

**** 신라대학교 지리학과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography, Silla University), phygeokim@chol.com

appear differently. This study shows geomorphic dynamics of coastal dunes as habitat, and will provide information for coastal dune management and for understanding biological distribution and growth pattern in coastal dune.

Key Words : coastal dune, foredune, geodiversity, nutrients, spatio-temporal variation

1. 서론

Yu and Rhew(2007)는 해안사구를 이해하는 주요 관점으로 “고환경 지시자로서의 해안사구”, “모래 저장고로서의 해안사구”, “생태서식처로서의 해안사구”의 세 가지를 제시하였다. 세 가지 관점이 각기 중요하지만 현재 국내에서는 마지막에 언급한 “생태서식처로서의 해안사구”의 관점이 주목받아왔다(Yu *et al.*, 2012). 정부에서는 “해안사구 보전·관리지침”을 통해 5대 기본 방침(Ministry of Environment, 2002)을 천명하였는데¹⁾, 주로 생태서식처로서의 해안사구라는 관점을 강조하고 있다. 사구를 생태서식처로 보는 입장은 해안사구를 이해하는 세 가지 관점 중 하나에 불과하지만 그 자체로 매우 중요하고 필요한 시각으로 볼 수 있다(Yu and Rhew, 2007). 이러한 관점은 최근 제기되고 있는 지형다양성(geodiversity)²⁾의 측면에서도 중요한 의미를 가진다.

퇴적물의 이동을 통해 변화하는 해안사구는 다양한 지형특성을 통해 서식지의 다양성과 생물종다양성으로 연결될 수 있다(Burnett *et al.*, 1998; Nichols *et al.*, 1998). 직접적으로 사구열의 지형은 염분포말(sea spray)과 비사(飛砂, blown sand)의 노출과 보호를 제어함으로써 사구지대 내의 토양의 성질에 영향을 준다(Oosting and Billings 1942; van der Valk 1974). 또한 유입되는 모래로 인한 직접적인 매장은 식생의 성장에 영향을 주기도 한다. 간접적으로 퇴적물의 이동은 영양염류의 재분포를 야기한다는 측면에서(Yu *et al.*, 2005) 식생의 분포에 영향을 줄 수 있다. 비사에 다량의 영양염류가 함유되어 있음은 선행 연구들에서 언급되어 왔으며(e.g. Fay and Jeffrey, 1992; Yu *et al.*, 2005), 영양염류의 공간적 분포와 식생의 분포가 서로 관련되어 있음이 제기되어 왔다

(e.g. Kim, 2004).

국내에서는 2000년대 이후 생태서식처로서 신두해안사구지대의 가치와 역할을 검토하는 연구가 발표되어 왔다(e.g. Park and Chang, 2002; Kim, 2004; Yu *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2005; Kahng, 2006; Kim *et al.*, 2008; Kim and Yu, 2009). Yu *et al.*(2005)은 비사를 통해 유입되는 주요 양이온들의 유입량과 유입범위를 조사하였으며, Kim(2004)은 식생의 공간적인 분포 양상을 토양의 물리·화학적 성질과 지형·해안선으로부터의 거리 요소들과의 관계 속에서 종합적으로 고찰하여, 내재된 생태지리학적 관계를 밝히고자 하였다. Song *et al.*(2005)는 신두해안사구지대의 주요 균락과 다양한 환경요소간의 관계를 설명하기도 하였다. 이러한 연구들을 통해 해안사구의 다양한 지형요소들이 내포하고 있는 지형다양성³⁾이 생물종다양성에 중요한 인자로 작용하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그렇지만 관련 연구와 축적된 자료가 아직 부족하여, 해안사구의 환경관리를 하는데 지형다양성의 측면이 충분히 고려되고 있지 못한 실정이다. 실제로 국내에서는 전사구의 성장을 유도하기 위한 모래펜스를 동일한 형태로 해당 해안선 전체에 걸쳐 설치해오고 있는 실정이다. 따라서 지형다양성과 이와 관련된 생물다양성의 개념에 맞는 관리방안을 수립하기 위해 이에 대한 연구가 더욱 진행될 필요가 있다.

이 연구는 생태서식처로서의 해안사구를 이해하고, 해안사구 내에서 지형다양성과 생물다양성간의 관계를 살펴보기 위해 진행되었다. Figure 1은 이 연구에서 확인하고자 하는 해안사구시스템 내 요소들 간의 관계를 묘사한 것이다. 연구의 기본구조는 Geodiversity를 중심으로 Geochemical diversity, Biodiversity의 측면으로 설명을 확대해나가고자 하는 것

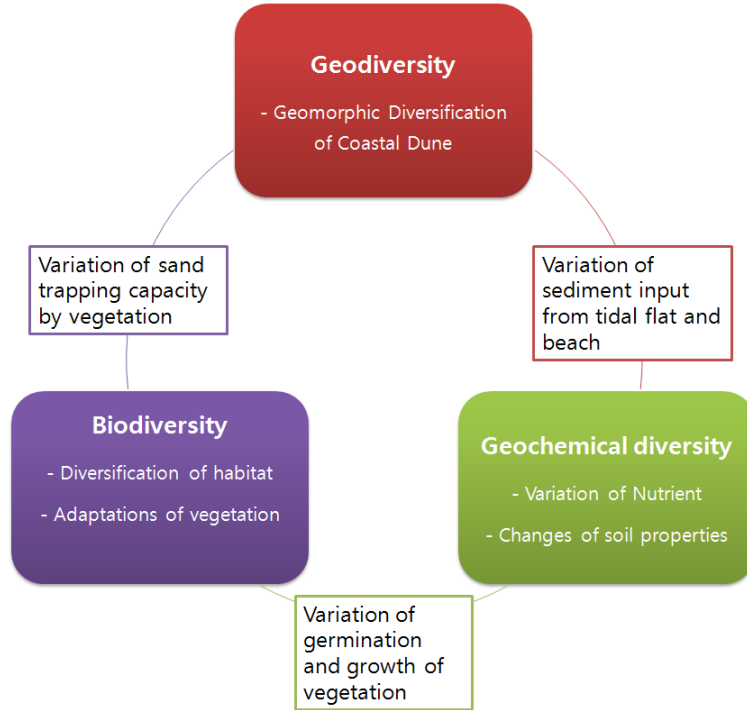


Figure 1. Interaction among Geodiversity, Geochemical diversity, and Biodiversity in Coastal Dune.
 해안사구에서의 지형다양성, 지화학적 다양성, 생물다양성 간의 상호관계

이다. 보다 세부적으로는 신두해안사구 지대에서 전사구열의 지형적 차이에 따른 전사구 지대의 영양염류의 유입 변화를 파악하고, 그 결과 나타나는 식생의 서식지분화를 설명하는 것을 목적으로 한다. 이 연구에서는 해안사구시스템 중에서 전사구에서 일어나는 관계를 보다 면밀히 살피고자 하였다. 전사구(fore-dune)는 지형변화가 활발한 공간으로 미지형 조건에 따라 비사의 유입이 크게 달라지며(e.g. Rhew, 2001; Yu *et al.*, 2005), 이는 영양염류의 유입의 차이를 야기할 것이고, 이에 따라 식생의 분포패턴에 영향을 줄 것이기 때문이다⁴⁾. 전사구에서의 지형과 식생간의 관계는 더 나아가 중·장기적인 해안사구 지형의 형성과 발달에 중요한 역할을 할 것이다(e.g. Rhew, 2010; Shin and Yu, 2011).

2. 연구지역과 연구방법

1) 연구지역과 연구축선의 설정

신두해안사구지대는 본래의 지형과 생태계가 비교적 온전하게 보전된 서해안의 대표적인 해안사구 지대이다(Figure 2). 행정구역상 태안군 원북면 신두리에 해당하며, 태안반도의 북서쪽 끝에 위치하고 있다. 해안사구의 북서쪽은 외해로 개방되어 있고, 해안사구의 전면에는 넓은 간석지가 형성되어 있다. 신두해안사구지대의 북동쪽 지역은 지형적·생물학적 가치를 고려하여 2001년 이후 천연기념물 431호로 지정·관리되고 있으며, 이후 체계적인 보전을 위한 움직임도 계속 되어왔다. Kahng(2003)에 의하면, 신두해안사구지대의 사구사는 SiO₂(85.1%), Al₂O₃(7.58%), Fe₂O₃(1.43%) 등으로 구성되어 있

며, 운모편암에서 기원하는 석영·장석·백운모의 주 성분광물과 흑운모·석류석·지르콘·스핀과 같은 부 성분광물을 포함하고 있다.

지형적 특성이 생물의 분포에 미치는 영향을 파악하고자 하는 연구목적에 따라 연구측선을 설정하였다. 전사구의 지형적 특성을 고려하여 해안선에 수직 방향으로 세 개의 측선을 설정하였다(Figure 2A). A측선은 신두해안사구지대의 북부에 완전한 경사지에 설정하였다(Figure 3A). A측선의 상부 해변은 다른 측선에 비하여 넓게 형성되어 있으며, 약 50m에 이르기까지 경사의 구배는 소폭 진동하며 전반적으로 완만하게 증가하는 경향을 보인다. B측선은 신두해안사구지대의 중부에 설정하였다. B측선 전면의 상부 해변은 A측선에 비하면 좁으며, 전사구기저부(dune-foot)부터 급한 경사를 보인다. 이러한 급경사는 해안

으로부터 15m 정도 이격되어 완만해지면서 배후로 연결되며 사구저지대로 전이된다(Figure 3B). C측선은 B측선에서 50m 정도 남쪽으로 이격되어 있으며, B측선과 비슷한 형태의 전사구열에 폭 5~6m의 통로가 형성되어 있는 곳을 선정하였다(Figure 3C). C측선의 단면은 고도변화가 작게 나타나며, 25m 부근까지 고도가 완만히 증가하다가 이후 사구저지대로 전이된다. 해변과 맞닿은 전사구기저부로부터 배후 약 50m 지점까지 7m 간격으로 각 측선당 8개 지점의 퇴적물 채취지점을 선정하였다(Figure 2C)⁵⁾. 채취지점의 선정은 Seo(2001), Rhew(2001), Yu *et al.* (2005)의 연구 결과를 참고하였다.

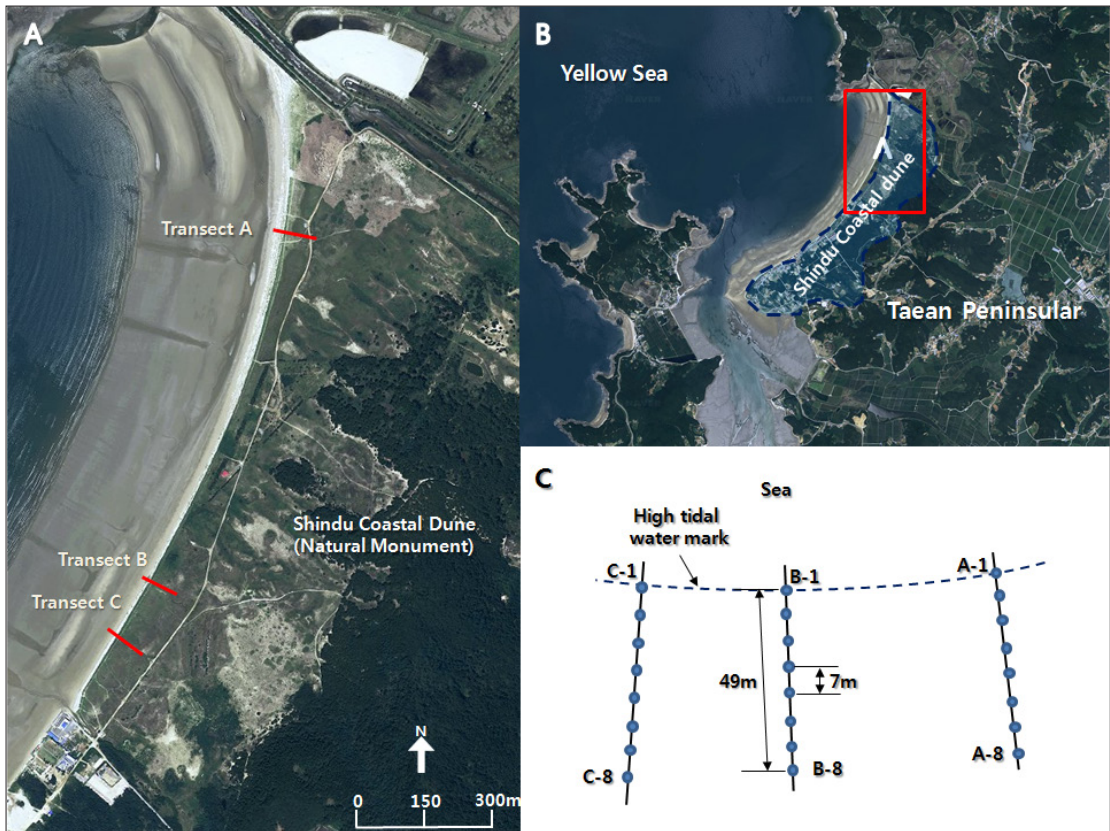


Figure 2. Study area and transect, 연구지역과 연구측선

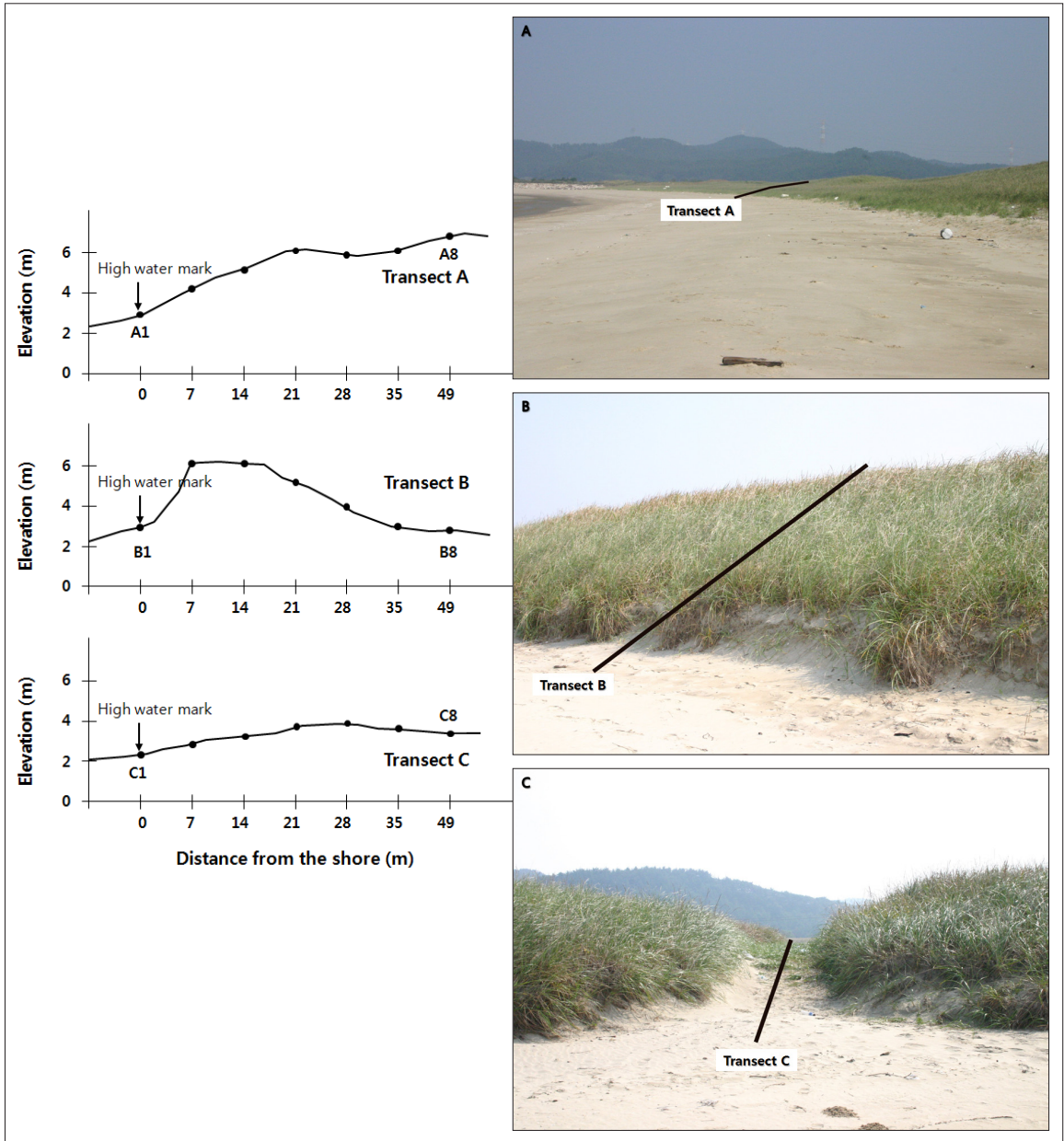


Figure 3. Geomorphic diversity of transect (October 2, 2003). 연구측선의 지형적 다양성

2) 연구방법

플라스틱 깔때기와 플라스틱 병을 이용하여 만든 모래포집기를 각 채취 지점에 미리 설치한 후(Figure 4), 일정기간이 경과한 후 포집된 퇴적물을 채취하였

다. 모래포집기를 설치하여 퇴적물을 채취한 이유는 모래의 이동이 표층을 중심으로 이동되기 때문에, 이동되는 모래만을 채취하기 위함이다. 다만 연구에 사용된 모래포집기는 대기를 통해 유입되는 염분포말의 영향을 완전히 제거하지 못한다는 한계가 있다.

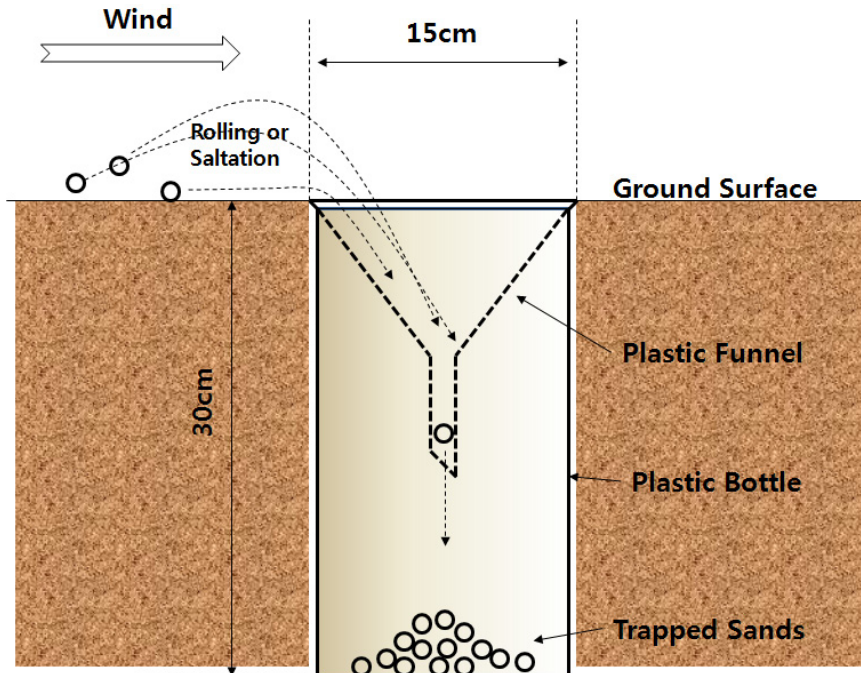


Figure 4. Sand trap for blown sands. 모래포집기의 개념도

신두해안사구에서는 겨울철 복서계절풍의 영향으로, 겨울부터 이른 봄까지 다량의 해빈 모래가 해안사구로 유입되기(Seo, 2000; Rhew, 2001; Ryu, 2002) 때문에, 시계열적 차이를 효과적으로 파악하기 위해서 2월 중반부터 2주 간격으로 5회에 걸쳐 퇴적물 시료를 채취하였다. 또한 시료가 채취된 2월부터 4월까지의 신두해안사구지역의 식생이 발아하여 성장하는 시기로 간주될 수 있어 의미가 있다고 판단하였다.

해빈 모래와 동반하여 유입될 것으로 예상되는 영양염류(Na, Mg, P, K, Ca)⁶⁾의 함량을 분석하였다. 분석한 영양염류는 해수의 일반적인 화학적 조성을 참고하여⁷⁾, 식물의 성장과 관련이 많은 것을 선택하였다. 채취된 시료에 대한 실험실분석과정은 다음과 같았다.

1. 유건시킨 시료 3g을 100ml 용량의 삼각 플라스크에 넣고 30ml의 1M 암모늄아세테이트 용액을 가한다.
2. 삼각 플라스크를 30분간 진탕한 후 추출액을 여

과지(Whatman No. 2)로 걸러낸다.

3. 유도 결합 플라즈마 분광분석기(ICP-AES)를 사용하여 여과액의 치환성 양이온 농도를 측정한다.

3. 결과와 토의

1) 유입영양염류의 전체적 특성

각 채취지점에서 확보한 퇴적물로부터 추출한 영양염류 함량의 전체적인 특성은 Table 1과 같다. 분석된 시료에서 확인한 영양염류의 전체 평균을 보면, P가 비교적 낮은 함량을 나타냈으며, 반면 Ca는 상대적으로 높은 함량을 보였다. 전체적으로 Ca(85.88 mg/kg⁸⁾) > Na(9.19) > Mg(7.73) ≈ K(7.16) > P(0.65)의 순으로 경향성을 보였다. Yu *et al.*(2005)는 신두해안사구지대에서 Ca와 Na가 K와 Mg에 비해 2~10배

의 유입규모를 보이며, 해수 중 영양염류의 비율 순위 (Na>Mg>Ca>K)와는 다르다는 것을 확인한 바 있다. 이에 대하여 Yu *et al.* (2005)은 이온별 흡착력의 차이, 포집된 후 수거하기 전까지 발생한 용탈, 국지적인 기원 등을 원인으로 추정한다. 이 연구에서는 Yu *et al.* (2005)이 제시한 것과 비교할 때, 다른 영양염류에 비해서 Na의 상대적 함량이 낮았다. Na는 다음의 변이계수와 관련된 내용에서 살펴보겠지만, 최대값(52.15)과 최소값(2.24)의 차이가 크고 값의 분포가 불균등하기 때문에 평균적인 값의 차이가 나타날 수 있는 여지가 있다. 이러한 경향으로 인해 Yu *et al.* (2005)과는 차이가 있는 것으로 판단된다.

영양염류 중 B측선의 Mg, K, Ca의 함량들은 A측선과 C측선의 값에 비하여 낮은 분포를 보인다(Figure 5, t-test 분석 결과 유의). 이에 반해 B측선의 Na

와 P는 다른 측선에 비해 낮지 않았다. 이를 고찰해 볼 때, B측선의 경우 A측선과 C측선에 비해 전사구의 경사가 급하기 때문에, 해수기원의 Mg와 K의 전반적인 유입량의 차이를 발생시킨 것으로 보인다. Ca의 경우는 B측선의 값이 낮은 분포를 보이기는 하지만, A측선의 Ca의 분포가 워낙 크게 나타나기 때문에, Mg와 K와는 다른 설명요인이 필요한 것으로 보인다. Na와 P의 차이가 크지 않은 것은 전사구의 지형적인 차이 이외에도 설명력이 높은 다른 요인이 있음을 보이는 것이다. 이에 대해서는 다음 절에서 더 논의할 것이다.

Table 1에 제시한 변이계수(Coefficient of Variation, CV)를 통해 전체 시료의 영양염류 분포를 살펴 보면, 시공간적 변이가 상대적으로 크게 나타난 항목은 Na(CV=1.03)와 Ca(CV=1.00)이다. Na의 경우 각

Table 1. Descriptive statistics of nutrients input with blown sands. 비사를 통해 유입된 영양염류의 기술통계

(unit: mg/kg)

Transect		Na	Mg	P	K	Ca
A	Mean	9.18	8.18	0.65	8.11	190.58
	Min.	3.42	4.46	0.19	4.89	25.16
	Max.	43.08	14.02	1.96	18.00	309.46
	S.D.	9.21	1.84	0.30	2.97	66.95
	C.V.	1.00	0.23	0.47	0.37	0.35
B	Mean	7.48	6.72	0.63	5.95	29.91
	Min.	2.24	4.00	0.17	2.86	14.83
	Max.	32.96	12.00	0.98	12.48	88.74
	S.D.	7.83	2.03	0.23	1.86	12.30
	C.V.	1.05	0.30	0.36	0.31	0.41
C	Mean	10.92	8.30	0.68	7.42	37.17
	Min.	2.32	4.37	0.18	3.33	16.27
	Max.	52.15	23.54	1.19	25.96	162.53
	S.D.	10.96	3.11	0.27	3.92	28.46
	C.V.	1.00	0.37	0.39	0.53	0.77
Total	Mean	9.19	7.73	0.65	7.16	85.88
	Min.	2.24	4.00	0.17	2.86	14.83
	Max.	52.15	23.54	1.96	25.96	309.46
	S.D.	9.45	2.48	0.27	3.13	85.55
	C.V.	1.03	0.32	0.41	0.44	1.00

* C.V. (Coefficient of Variation)=(S.D./Mean)

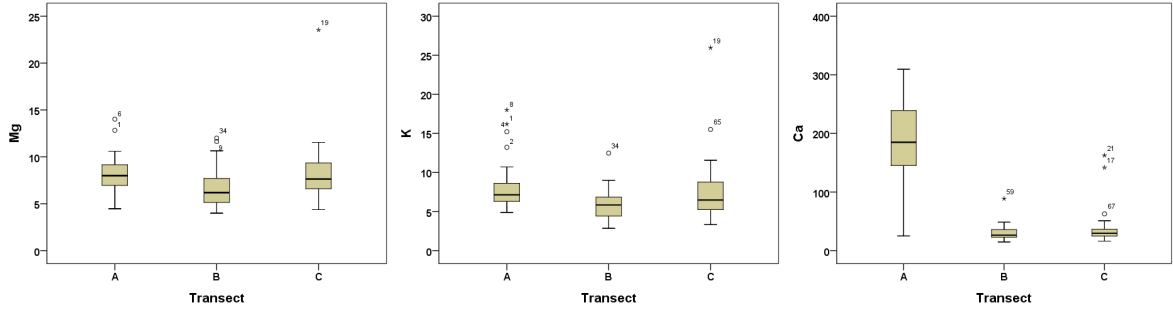


Figure 5. Box-plots of Mg, K, and Ca. Mg, K, Ca 함량의 상자도표

측선의 내부에서의 변이계수는 각각 약 1의 값을 보이며 비슷하다(CV=1.00~1.05). Ca의 경우 A측선(CV=0.35)과 B측선(CV=0.41)의 변이계수가 다른 영양염류들(Mg, P, K)의 변이 정도와 비슷하지만, C측선(CV=0.77)에서는 다른 영양염류의 변이 정도에 비해 높게 나타난다. 즉, Na의 경우는 각 측선 내부에서 변이가 크게 나타나는 반면, Ca의 경우는 측선간의 변이가 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 앞 문단에서 제시한 내용을 고려한다면, Na의 경우 전사구 형태를 넘어서 다른 요인(해빈으로부터의 변화, 시료채취 시기의 변화 등)에 의해 설명될 필요가 있는 것으로 판단된다.

각 변수들 간의 상관관계를 확인한 결과, Na-Mg($r=0.644$), Na-K($r=0.567$), 그리고 Mg-K($r=0.648$)의 경우 유의한 양의 상관관계가 나타났다. Na, Mg, K는 모두 해안선에서 배후지역으로 갈수록 값이 낮아지는 경향이 있는데, 이로 인하여 상호 양의 상관관계가 나타난 것으로 판단된다. 이에 대해서는 다음 절에서 공간적인 분포를 보여주는 그래프를 통해 설명하도록 하겠다. 이와는 반대로 P와 Ca 간에는 약한 양의 상관관계($r=0.237$)가 나타난다. 한편, P와 Na 간에는 음의 상관관계($r=-0.452$)가 확인되었다. 이를 통해 볼 때, Na, Mg, K 간의 함량변화를 일으키는 프로세스가 관련되어 있으며, P와 Ca의 경우는 다른 영양염류에 영향을 미치는 프로세스와는 상이한 프로세스가 영향을 미친 것으로 판단된다. 그렇지만 시공간적으로 값들이 어떻게 분포하는지를 살펴보지 않으면 해석이 쉽지 않다. 따라서 이에 대한

설명은 다음 절에서 각 측선별·시기별 변화를 통해 설명하도록 하겠다.

2) 각 영양염류의 시공간적 특성

(1) Na

Na의 경우 사구의 기저부에서 배후로 갈수록 값이 점차 낮아지는 경향을 볼 수 있다(Figure 6A)⁹⁾. 특히 A측선의 경우 값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다(A1과 A2의 차이가 큼). B측선의 경우는 배후로 갈수록 변이의 폭과 평균치가 완만하게 줄어드는 특성을 보인다. Seo(2001)과 Rhew(2001)에 따르면, B측선이 위치한 지점에서 비사의 유입량이 A측선에 비해 적으며 배후로 가면서 급격하게 감소하는 경향이 있다고 하였다. Na의 유입경로가 비사를 통한 것이라고 가정한다면, B측선의 Na의 함량의 분포가 A측선에 비하여 낮아야 하며, 배후로 갈수록 급격히 줄어드는 패턴을 보여야 한다. 하지만 이 연구에서는 그런 차이를 확인하기는 힘들었다. 한편 Kim(2004)은 B측선과 인접한 지점에서 Na의 경우 기존의 인식에 의한 가설과는 달리 해안선으로부터의 거리에 따른 기울기를 보이지 않고 오히려 거리의 증가에 따라 그 농도가 다소 증가하는 양상을 보인다고 하였다. 이를 통해 볼 때, B측선의 변이의 폭과 평균치가 완만하게 감소한다는 것은 Na의 경우 비사에 의한 유입이외에도 다른 유입경로가 있을 수 있음을 지시하는 것으로 파악할 수 있다. 가능한 유입경로는 염분포말(sea spray)에 의한 유입이 가장 유력할 것으로 판단된다. 한편 통로

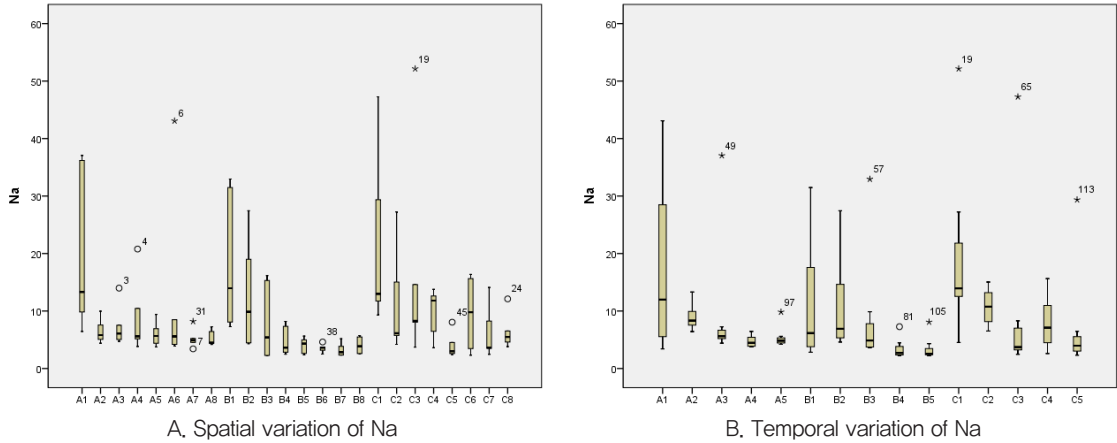


Figure 6. Spatio-temporal variation of Na. Na의 시공간적 변이

가 형성되어 있는 C측선의 경우에는 전반적으로 값이 줄어드는 경향을 보이지만, 배후에서 비교적 높은 값을 보이기도 하였다. 이는 통로가 형성되어 있어 활동적인 비사의 유입이 배후로 직접 유입되는 상황을 설명해주는 것으로 판단된다.

시기적으로 보면 겨울철에서 봄철로 진행되면서 모든 측선에서 변이의 폭과 평균치가 줄어드는 것을 확인할 수 있다(Figure 6B). 이는 계절이 겨울철에서 봄철로 바뀔 때 따라 전반적으로 풍속이 감소하며 비사와 염분포말의 양이 줄어드는 것과 관련이 있을 것으로 판단된다. 하지만 C측선 4번째 시기(4월 초)에 변이의 폭과 평균치가 증가하는 모습을 보이는 특성을 보여 미지형별로 감소영향이 다를 수 있음을 보인다.

(2) Mg와 K

Mg와 K는 사구의 기저부에서 배후로 갈수록 값이 점차 낮아지는 경향이 나타나지만 Na에 비하여 뚜렷하지는 않다(Figure 7). Figure 7A와 Figure 7C를 보면, A측선과 B측선의 경우 배후로 갈수록 변이의 폭과 평균치가 줄어드는 경향을 보이고 있다. 물론 Mg의 값이 A2지점과 같이 낮거나 A8과 같이 높게 나타나는 경우(Figure 7A)가 있기 때문에 해석상의 주의가 필요하다. 또한 A측선에 비하여 B측선에서 배후

로 갈수록 변이의 폭과 평균치가 줄어드는 경향을 뚜렷이 관찰할 수 있다. B측선의 지형경사가 급해 비사의 유입이 제한된다는 것을 고려한다면(e.g Seo, 2001; Rhew, 2001), Mg와 K의 경우 지형경사의 차이에 따라 비사의 유입량의 차이를 야기하였고, 이들 영양염류의 유입경향 차이를 야기하였다고 볼 수 있다. Kim(2004)는 Mg와 K를 해안선으로부터 멀어질수록 농도가 줄어드는 대표적인 영양염류로 제시한 바 있다. C측선의 경우는 A측선과 B측선과는 달리, 배후로 갈수록 변이의 폭에 오히려 증가하는 경향을 보이기도 하며, 평균치도 크게 변하는 특성을 보였다. C측선이 통로의 형태를 띠고 있어, Na에서와 같이 배후로 비사가 많이 유입되어 이러한 특성이 나타나게 된 것으로 판단된다.

시기적으로 보면(Figure 7B, Figure 7D), A측선과 B측선의 경우 겨울철에서 봄철로 가면서 변이의 폭은 줄어들지만 평균치는 특별한 경향이 없는 것이 관찰된다. 변이의 폭이 줄어들기는 하지만 Na와 같이 뚜렷하지는 않다. 겨울철에서 봄철로 가면서 유입되는 비사의 양이 줄어든다는 것을 고려한다면, 평균치가 줄어들지 않은 것은 다소 의외의 결과였다. 그렇지만 Yu *et al.* (2005)가 제시한 ‘혼합에 의한 희석(dilution by mixing)’을 고려한다면 설명이 가능하다. ‘혼합에 의한 희석’이란 도약이동(saltation)의 방식을 통해서

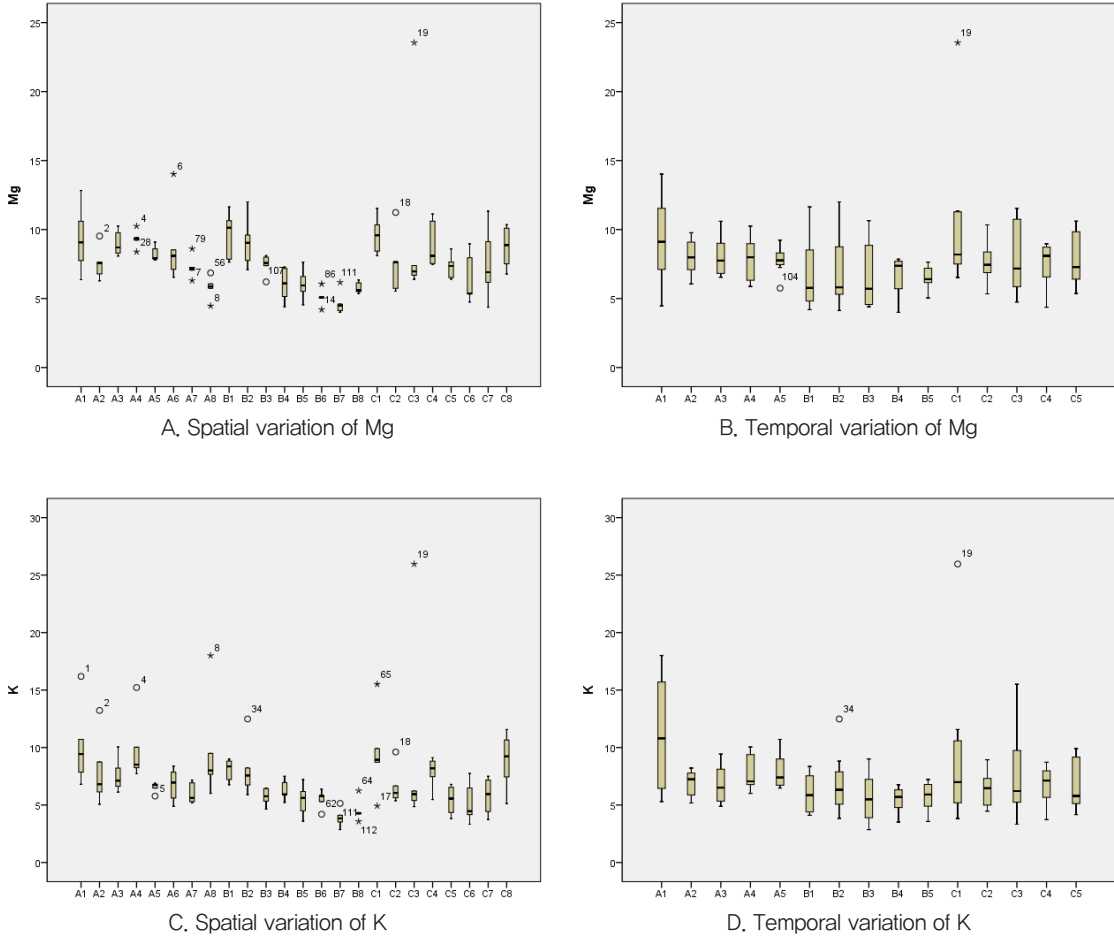


Figure 7. Spatio-temporal variation of Mg and K, Mg와 K의 시공간적 변이

움직이는 비사의 경우, 염분포말과 같이 직접적인 유입과는 달리 이동과정에서 기존의 지표 모래와 섞이게 되어 유입되는 영양염류의 농도가 떨어지게 되는 것을 말한다. 이를 고려하면 비사를 매개체로 유입되는 영양염류의 경우 변이의 폭이 줄어들 수밖에 없다. C측선의 경우 특정한 경향성을 보이지 않는데, 통로의 특성상 안정화되지 않았을 뿐만 아니라, 낮은 식피 밀도에 의하여 '혼합에 의한 희석' 효과가 낮았기 때문으로 판단된다.

(3) P

P의 경우는 채취지점별 차이가 크게 나타나지 않

았다(Figure 8A). 이러한 경향은 앞에서 살펴보았던, Na, Mg, 그리고 K와는 뚜렷하게 다르다. C측선은 다른 측선에 비하여 변이의 폭이 다소 크게 보이지만 유의할 수준은 아니다. 또한 A측선과 B측선에서 평균치가 미약하게 증가하지만 통계적으로 유의하지는 않다¹⁰⁾. Kim(2004)은 B측선에서 P의 함량이 사구 배후지역의 특정지점을 중심으로 높게 나타난다는 결과를 제시한 바 있어, 해수로부터의 영향을 받는 영양염류가 아님을 간접적으로 제시한바 있다.

시기적인 변화모습을 보면, 모든 측선에서 값이 증가하다 정체 또는 감소되는 것을 뚜렷하게 확인할 수 있다(Figure 8B). 따라서 계절의 변화에 따라 비사의

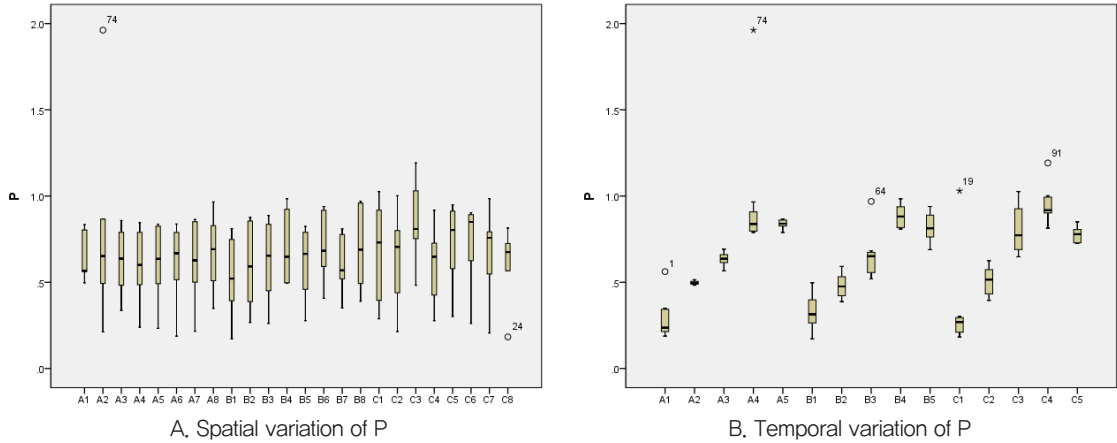


Figure 8. Spatio-temporal variation of P. P의 시공간적 변이

양이 줄어드는 경향과는 뚜렷하게 다른 특성을 보였다. 이는 P가 비사의 유입 프로세스와는 다른 인자에 의하여 영향을 받고 있다는 것을 말해준다. 계절의 변화를 고려해 본다면, 식생의 변화(식물 잔해의 분해, 발아, 성장 등)가 영향을 주었을 것으로 유추해 볼 수 있다. 가설의 수준으로 겨울철동안 축적된 식물의 잔해가 봄철로 접어들어 분해됨에 따라 식물잔해에 포함되어 있었던 P가 퇴적물로 유입되어 P가 증가하는 경향을 보인다고 설명할 수 있다. P의 유입프로세스가 식생의 변화와 관련되어 있다는 것을 증명하기 위해서는 식생의 변화에 따른 P의 변화추이를 살펴보는 연구가 필요하며, 추후 연구에서도 P의 변화에 주목할 필요가 있다고 판단된다.

(4) Ca

공간적으로 Ca의 경우 A측선의 패턴과 B와 C측선의 패턴이 전혀 다르게 나타났다(Figure 9A). A측선에서는 절대적인 함량이 높았으며, 해변에서 멀어짐에 따라 함량이 증가하는 공간적 특성을 보였다. 이와는 달리 B와 C측선에서는 뚜렷한 공간적 특성을 찾기가 힘들다. 시간적인 측면에서도 A측선과 여타 측선과의 특성은 다르게 나타났다(Figure 9B). A측선에서는 시간의 경과에 따라 평균치가 증가하는 반면, B와 C측선에서는 뚜렷한 경향성을 찾을 수 없었다.

A측선에서 배후로 가면서 평균치가 늘어나는 것은, Na, K, Mg와는 달리 해변으로부터 유입되는 비사와는 관련이 적기 때문으로 판단된다. 전반적인 Ca의 시공간적 특성은 높은 패각 혹은 패사의 유입에서 그 원인을 찾음이 바람직하다고 여겨진다. Yu *et al.* (2005)은 신두해안사구에서 북쪽으로 갈수록 Ca의 함량이 높아지는데, 북부 쪽으로 갈수록 패각이나 패사 등의 집적율이 높아지고 북부 사구열 앞 간석지에 굴 양식장이 위치하는 것과 연관이 되어 있기 때문일 수 있다고 하였다. 이와 같은 해석을 따른다면, Ca의 공간적인 특성은 신두해안사구 전체의 규모에서의 분포패턴을 통해 생각해 볼 필요가 있다. 모래입자에 비하여 상대적으로 질량이 가벼운 패각이 선택적으로 배후 깊숙이 유입되어 Ca의 함량을 높였기 때문인 것으로 판단된다. 시기적으로 볼 때도 풍속이 약해지는 봄철이 되어 가벼운 패각이 선택적으로 전사구 지역으로 유입되어 그 함량이 오히려 늘어난 것으로 설명할 수 있다. 하지만 Kim(2004)는 B측선 부근에서 진행한 연구에서 Ca가 해안선으로부터 멀어질수록 낮아지는 경향이 있다고 설명하여 이 연구의 결과와 다른 결과를 제시하기도 하였다. 이를 명확히 규명하기 위해서는 해안사구의 전체모래 함량 중에서 패사의 함량을 확인하고, 비사와 패각이 이동하는 시기와 장소에 대한 정보를 확인할 필요가 있을 것이다.

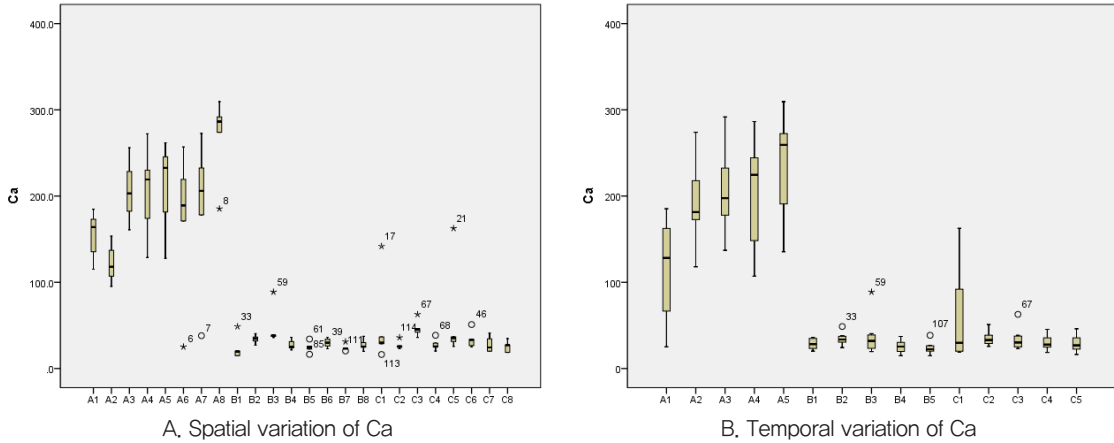


Figure 9. Spatio-temporal variation of Ca. Ca의 시공간적 변이

3) 영양염류의 시공간적 특성과 식생의 분포

연구지역에서 각 측선별 주요 식생이 다르게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 이 연구에서는 생물다양성, 또는 식생에 대한 정량적인 분석은 수행되지 않았다. 그렇지만 현장에서의 관찰결과와 관련 문헌의 검토를 통해 앞에서 제시한 영양염류의 시공간적 특성과 관련 지어 설명하는 것은 의미가 있다고 파악하였다. 측선별 영양염류의 특성을 정리하여 주요 식생과 대비해 보면 다음과 같다.

A측선에서는 Ca의 함량이 다른 측선에 비하여 높은 편이며, Na의 함량이 배후로 가면서 급격히 줄어드는 특성이 있었다. 그리고 K의 함량이 B측선에 비하여 높게 나타나는 경향이 있었다. A측선의 주변에는 통보리사초, 갯완두, 갯메꽃, 순비기나무 등이 주로 서식하고 있었다. 이는 Song *et al.* (2005)의 Ca가 높은 곳에 통보리사초가 나타난다는 설명과 Kim(2004)의 순비기나무가 나타난다는 것과 일치한다¹¹⁾. 또한 각 식생이 자라는 형태를 보면, 비교적 완만한 지형면을 따라 갯완두나 갯메꽃, 순비기나무의 덩굴이 해안선 방향으로 확대되어 가며 비교적 낮은 키를 보이는 것과 관련이 있다고 판단된다.

B측선에서는 Na가 배후지역으로 완만히 감소하는 경향을 보였으며, 상대적으로 Mg와 K는 다른 측

선에 비하여 낮은 분포를 보이며, 배후로 가면서 줄어드는 패턴이 관찰되었다. B측선이 위치한 전사구 열의 전면과 정상부에는 갯그렁이 밀생하고 있으며, 배후지역에는 띠가 밀생하고 있다. 이러한 경향은 Kim(2004)이 갯그렁과 Mg의 분포와 관계가 있다고 제시한 내용과 유사하다. 또한 사구저지대의 낮은 영양염류 환경에서 잘 관찰되는 띠의 경우 B측선의 전사구 경사가 급하여 장벽역할을 하고 있는 것과 관련되어 있는 것으로 판단된다.

C측선에서는 Na, Mg, K의 시공간적 변화가 크게 나타났으며, Mg, K, Ca의 경우 B측선에 비하여 높게 나타났다. C측선에서는 통로라는 특성상 식피가 높지 않았지만, 통보리사초와 좁보리사초를 일부 관찰할 수 있었다.

종합해본다면, 신두해안사구에서는 전사구의 형태에 따라 다양한 식생이 서로 다른 서식처를 점유하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 볼 때, 전사구의 지형다양성은 전사구에 분포하고 있는 식생의 생물종다양성과 관련이 되어 있음을 확인할 수 있으며, 만약 단일한 전사구지형만 분포한다면, 생물서식처는 어느 한 유형으로 나타날 것이라는 것을 유추해 볼 수 있다.

4. 결론

이 연구는 신두해안사구 지대에서 전사구열의 지형적 차이에 따른 배후 지대의 영양 조건의 변화를 파악하고 그 결과 나타나는 식생의 서식지분화를 통해 설명하는 것을 목적으로 하였다. 주요한 지형적 프로세스를 바람에 의한 해빈 모래의 이동으로 설정하였으며 각기 다른 형태적 조건을 지닌 세 군데의 전사구에서 퇴적물의 영양염류 농도를 파악하였다. 전사구에 형태에 따라 비교적 상이한 패턴을 보이며, 해수의 영향을 받는 영양염류는 Na, Mg, K이다. 이들 영양염류는 전사구의 형태가 비사의 유입에 유리한 조건인 경우 공간적으로 더 깊은 지점까지, 그리고 시간적으로는 더 늦은 시기까지 높거나 불규칙한 패턴이 관찰되었다. 그렇지만 Na의 경우는 비사를 통한 유입경로 이외의 프로세스가 중요한 역할을 하고 있음을 확인할 수 있었다. P는 해수와 비사의 영향과는 무관한 것으로 나타났으며, Ca의 경우는 국지적인 전사구열의 지형적 차이보다 전체 해안사구시스템의 규모에서 분포가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 전사구의 형태에 따른 영양염류의 유입의 차이와 해안사구 식생조성의 차이가 연관되어 있음을 설명할 수 있었다.

이 연구는 생물서식처로서의 해안사구 지형이 지니는 역동성을 잘 보여주는 것으로, 추후 해안사구의 관리나 해안사구 생물의 분포와 성장패턴을 이해하는데 정보를 제공해 줄 것이다. 또한 더 나아가 자연환경관리에 있어 지형다양성의 중요성을 인식하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

주

1) 그 내용을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 생태적 가치가 큰 해안사구는 절대 보전한다. 둘째, 무분별한 개발행위 제한-연안지역 경관을 막는 건축행위는 규제한다. 셋째, 불가피한 개발 시 환경친화적 이용방안을 강구하여 생태적인 균형을 유지하는 한도 내에서 환경친화적으로 이용할

수 있도록 한다. 넷째, 훼손된 해안사구는 복원한다. 다섯째, 지역차원의 해안사구관리가 이루어질 수 있도록 추진한다 (Ministry of Environment, 2005).

- 2) 지형다양성은 1990년대부터 널리 사용되어온 용어로서 무생물적인 자연환경의 다양성을 설명하기 위한 목적을 가진다(Gray, 2004). 자연환경의 보존과 보전에 있어 생물 다양성(biodiversity)이 측면이 주로 강조되는 것에 대한 비판을 통해 제시된 것으로 볼 수 있다(Gray, 2004). Eberhard(1997)와 Sharples(2002)는 지형다양성을 “지질학적인(기반암), 지형학적인(지형의 형태) 그리고 토양적인 특성, 집합, 체계, 그리고 프로세스의 다양성”이라고 정리하였다. 지형다양성에 대한 논의는 현재도 활발히 이루어지고 있으며, 보다 과학적이며 체계적인 환경관리의 향상 측면에서 중요성을 더해가고 있다.
- 3) 현재 국내 지형연구에 있어서 지형다양성이라는 용어의 사용은 널리 활용되고 있지 못하지만, 많은 지형연구들은 이 지형다양성이라는 측면을 모두 내포하고 있다고 할 수 있다. 이 연구에서 지형다양성이라는 용어를 사용한 이유는 생물다양성에 상대적인 용어로서 활용될 수 있는 용어이기 때문이다.
- 4) 이 연구에서는 체계적인 식생조사를 별도로 실시하지 않았지만, 기존 문헌과 현장조사를 통하여 우점하고 있는 식물종에 대한 정보를 확인하였다.
- 5) 신두해안사구지대에서 전사구로 바람에 의해 전사구로 유입되는 해빈 모래의 유효 이동 거리에 대해서는 Seo(2001), Rhew(2001), Yu *et al.*(2005)의 연구 결과를 참고하였다.
- 6) 본문 중의 Na, Mg, P, K, Ca는 주요 수용성 양이온으로, Na⁺, Mg²⁺, Total P, K⁺, Ca²⁺를 의미하는 것이다.
- 7) 해수의 평균적인 화학 조성(중량비)은 다음과 같다. Cl⁻(55.04%)>Na⁺(30.62%)>SO₄²⁻(7.68%)>Mg²⁺(3.69%)>Ca²⁺(1.15%)>K⁺(1.10%)>HCO₃⁻(0.41%) (Beer, 1983, White *et al.*(1992)에서 재인용)
- 8) 이하의 mg/kg 단위는 생략하였다.
- 9) 그림에서 A그래프의 x축의 A1~A8은 A측선에서 해안선에서부터 내륙방향으로 시료채취지점을 의미하며, B그래프의 x축의 A1~A5는 2월 중순부터 2주 간격으로 4월 말까지의 시간의 경과를 의미한다. Figure 7, Figure 8, Figure 9 또한 위와 동일하다.
- 10) 배후로 갈수록 미약하게 증가하는 패턴으로 인하여, P와 Na 간에 음의 상관관계를 보인 것으로 판단된다.
- 11) Song *et al.*(2005)은 신두해안사구에서 영양염류와 관련하여 Ca의 함량이 높은 곳에는 통보리사초군락이, K와 P의 함량이 높은 곳에는 해당화군락이 나타난다고 하였으며, Kim(2004)은 전사구에 집중적으로 서식하는 갯그렁

과 순비기나무의 서식처는 토양 pH와 전기전도도, Mg, Ca가 높은 곳과 관계가 있다고 밝혔다.

참고문헌

- Burnett, M.R., August, P.V., Brown, J.H., and Killingbeck, K., 1998, The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity, *Conservation Biology*, 12, 363-370.
- Eberhard, R. (ed.), 1997, *Pattern & Process: Towards a Regional Approach to National Estate Assessment of Geodiversity*, Australian Heritage Commission.
- 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, 177-188.
- Gray, M., 2004, *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*, Willey.
- Kahng, T., 2003, The origin of coastal dunesand in the Chungcheongnam-do, *Journal of the Korean Geographical Society*, 38, 505-517 (in Korean).
- Kahng, T., 2006, The landforms and vegetation of coastal sanddune natural monument at Sindu-ri, Taean-gun, South Chungcheong Province, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 13, 35-44 (in Korean).
- 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, 135-148.
- Kim, D., 2004, Spatial distribution of nutrients from sea water and aeolian sands in a coastal dunefield, Sindu-ri, Korea, *Journal of Geography*, 43, 57-79 (in Korean).
- Kim, D., Yu, K.B., and Park, S.J., 2008, Identification and visualization of complex spatial pattern of coastal dune soil properties using GIS-based terrain analysis and geostatistics, *Journal of Coastal Research*, 2008, 24, 50-60.
- Ministry of Environment, 2002, *The Guideline for Conservation and Management of Coastal Dunes* (in Korean) (환경부, 2002, 해안사구 보전·관리 지침).
- Nichols, W.F., Killingbeck, K., and August, P.V., 1998, The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity, *Conservation Biology*, 12, 371-379.
- Oosting, H.J. and Billings, W.D., 1942, Factors effecting vegetational zonation on coastal dunes, *Ecology*, 23, 131-142.
- Park, K. and Chang, E., 2002, Detection of changes in coastal sand dunes using GIS technique and field monitoring, *Journal of the Korean Geographical Society*, 37, 511-521.
- Rhew, H., 2001, **Aeolian sand transport and morphological change in the foredune ridge, Shindu dunefield, Korea**, *Journal of Geography*, 38, 31-60 (in Korean).
- Rhew, H., 2010, *Exploring mesoscale behaviors of beach-dune profiles using a cellular automaton-based numerical model: computer simulation and case interpretation*, Unpublished doctoral dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Ryu, W., 2002, **Wind and aeolian sand transport in Shinduri coastal dune fields, Korea**, *Journal of Geography*, 40, 93-118 (in Korean).
- Seo, J.C., 2001, *Morphological changes and sediment budget of coastal dunefields in Shinduri, Korea*, Unpublished doctoral dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Sharples, C., 2002, *Concepts and Principles of Geodiversity*, Tasmanian Parks & Wildlife Service website.
- Shin, Y.H. and Yu, K.B., 2011, The Holocene coastal dune development and wet-dry condition, *Journal of the Korean Geographical Society*, 46, 569-582 (in Korean).
- Song, H., Park, G., Park, H., Seo, E., So, S., and Kim, M., 2005, Vegetation and soil properties of the coastal sand dune in Sinduri, Taean-Gun, *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 8, 59-68 (in Korean).
- van der Valk, A.G., 1974, **Mineral cycling in coastal fore-dune plant communities in Cape Hatteras Na-**

- tional Seashore, *Ecology*, 55, 1349-1358.
- Yu, K.B. and Rhew, H., 2007, *Coastal Dunes on the West Coast of Korea: A Geomorphological Perspective*, Seoul National University Press (in Korean).
- Yu, K.B., Rhew, H., and Kim, S.H., 2005, The amount and spatial pattern of nutrient inputs carried by blown sands into the Sindu dune field, *Journal of Geography*, 45, 165-183 (in Korean).
- Yu, K.B., Shin, Y.H., Kim, D., and Kim, S.H., 2012, *Coastal Dunes in Western Korea for Biological Habitats* (in press), Seoul National University Press (in Korean).

교신: 신영호, 151-742, 서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 220동 국토문제연구소(이메일: syhgeo@snu.ac.kr, 전화: 02-880-6322)

Correspondence: Young Ho Shin, Institute for Korean Regional Studies, Bldg. 220, Seoul National University, Gwanak-ro 1, Gwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea (e-mail: syhgeo@snu.ac.kr, phone: +82-2-880-6322)

최초투고일 2012. 3. 26

수정일 2012. 4. 16

최종접수일 2012. 4. 23