

飛砂를 통해 신두 사구지대로 유입되는 주요 양이온의 규모와 공간적 패턴 분석*

유근배** · 류호상*** · 김성환***

The amount and spatial pattern of nutrient inputs carried by blown sands into the Sindu dune field

Yu, Keun-Bae · Rhew, Hosahng · Kim, Sung Hwan

요약 : 이 연구는 신두리 해안사구지대의 세 개 단면에서 포집된 비사를 분석하여 동반 유입된 양이온 Ca, K, Mg, Na의 양과 유입 범위를 조사한 것이다. 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, Ca, Na는 K, Mg에 비해 2~10배의 유입규모를 보였고, 지점별로 균일한 유입규모를 보이는 K, Mg, Na와 달리 Ca는 사구지대 북쪽으로 갈수록 커지는 경향을 보였다. 둘째, 비사의 도달 한계와 혼합으로 인한 희석효과로 인해 비사를 통한 양이온의 유입범위는 해변에서 내륙으로 대략 100m 이내에 국한되는 것으로 추정되었다. 비사이동을 통해 신두리 해안사구지대로 공급되는 양이온의 양은 연간 해변 1m당 Ca가 26.3kg, K가 2.7kg, Mg가 2.6kg, Na가 7.2kg인 것으로 추산되었다. 이는 비사가 염분포말로 공급되는 양과 유사한 규모로 해안사구지대에 영양을 공급할 수 있음을 시사하는 것이다.

주요어 : 해안사구, 사구복원, 신두 사구지대, 비사, 영양유입

Abstract : This research is aimed to investigate the amount and spatial range of nutrient inputs carried by blown sands, which were sampled at three transects in Shindu dunefield. The concentrations of Ca and Na are twice to ten times as much as those of K and Mg. The inputs of Ca tend to increase northward, while the other cations have no significant gradients in their inputs along the shore. The effective-carrying range of cations by blown sands is estimated as below 100m, mainly due to the inability for blown sands to continue moving behind the foredune ridges and 'dilution by mixing' effect during aeolian sand transport. Annually, with blown sands can some 26.3kg Ca, 2.7kg K, 2.6kg Mg and 7.2kg Na per width be transported into Shindu dune field. These figures imply blown sand is an important nutrient source into coastal dune habitats.

Key Words : coastal dunes, dune restoration, Shindu dune field, blown sand, nutrient input

* 이 논문은 2001년 교보생명교육문화재단의 지원을 받아 수행되었음.

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

*** 서울대학교 지리학과 박사과정 (Ph.D Candidate, Department of Geography, Seoul National University)

1. 서론

해안사구(海岸砂丘, coastal dunes)는 해안 시스템의 주요 구성요소의 하나로서 해변(海濱, beach)의 모래가 바람에 의해 운반되어 해변 후면에 형성된 모래 언덕이다. 해안사구는 폭풍이나 해일로부터 해안을 보호하는 천연의 제방이며 해변의 침식을 완충하는 모래 저장고이다. 또한 해안사구는 사질로 구성되어 있어 지하수 함양이 용이하며 지하수면이 해수면 이상으로 일정 높이를 유지하도록 기복을 제공하기 때문에 풍부한 양의 담수 지하수를 저장한다. 이는 염수가 내륙으로 침투하지 못하도록 하는 천연의 방벽 역할을 한다. 이와 함께 해안사구는 육지 생태계와 해안 생태계의 접이지대에 위치, 두 생태계와는 다른 서식환경을 제공하여 독특한 생태계를 이루고 있다. 따라서 해안사구는 사회경제적·생태적인 가치가 높은 자연자원(Natural Resources) 중 하나라고 할 수 있다(Carter, 1988).

최근 해안사구 개발문제가 사회적인 이슈로 대두됨에 따라 해안사구에 대한 일반의 인식이 제고되고 있다. 그동안 해안사구는 보전해야 할 자연자원으로 인식되지 못했다. 이로 인해 해안사구지대는 대부분 인접해 있는 해변과 함께 해수욕장의 적지로 인식되어 관광지로 개발되거나 규사 혹은 골재를 채취하는 장소로 활용되면서 다수의 해안사구지대가 그 원형을 잃고 말았다. 전국 해안사구지대 실태조사를 통해 조사된 133개의 해안사구지대 중 보전상태가 양호한 것으로 분류된 지역이 19개

소(14%)에 불과한 점을 감안하면(환경부, 2001a; 환경부, 2001b), 한국의 해안사구지대를 효율적으로 관리하기 위해 시급히 필요한 것은 사구복원을 성공적으로 수행할 수 있는 방안의 모색이라 할 수 있다.¹⁾

해안사구복원을 위해 흔히 사용되는 기법은 크게 기계적인 수단을 이용한 성토, 모래올타리를 이용한 비사집적, 사구식생의 식재 등 세 가지로 구분된다(Psutny and Ofiara, 2002). 이 중 사구식생의 식재는 자연적인 사구성장의 원리를 응용한 것으로 사구를 고정시키는 한편 생태 서식지로서 사구의 기능을 증진시키는 효과를 가지고 있어 사구복원에 널리 사용된다. 사구식생을 식재하여 훼손된 사구를 복원하고자 할 때 무엇보다 중요한 것은 식재종이 사구에 성공적으로 뿌리내리는 것이다. 성공적인 식재를 위해서는 식재 시기, 식재에 사용되는 식물종 등 여러 가지 요소들이 고려되어야 하지만 그 중 가장 중요한 요소로 꼽을 수 있는 것은 해안사구지대의 영양조건이다.

해안사구는 영양소를 보유할 수 있는 능력이 떨어지는 생태계로 알려져 있다. 점토광물과 유기물 함량이 낮아 양이온 치환용량이 낮고 사질입자 위주로 구성된 기질로 인해 토양 내의 영양소가 쉽게 용탈되기 때문이다(Barbour *et al.*, 1999; van der Valk, 1974). 이와 같이 해안사구 생태계는 외부에서 유입되는 영양소가 생태계의 부양에 매우 중요한 역할을 담당하는 시스템이므로 사구식생을 식재하여 훼손된 사구를 복원하고자 할 때 해당 사구지대의 영양소 유입경로를 파악하고 각 경로별 기

1) 2000년 안면도의 해안도로 건설로 인한 해안사구의 파괴에 대하여 학계의 문제 제기, 언론보도, 국회 상임위의 질의 등 사회적 관심으로 환경부는 2000년 “사구보전추진계획”을 수립하고 2001년 “우리나라 사구 실태파악과 보전·관리방안에 대한 연구”라는 제목의 보고서를 발간하였으며, 이 보고서에 기초하여 2002년 “海岸砂丘 保全·管理指針”을 발표하였다. 그러나 해안사구에 대한 연구성과가 일천하고 관리경험이 부족하여 여러 가지로 미진한 면이 많은 실정이다.

여도를 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

해안사구 생태계의 영양유입 경로로 흔히 언급되는 것은 강수와 해수기원의 염분포말(sea/salt spray), 지하수 등이다(van der Valk, 1974; Whipkey et al., 2000; Koerselman, 1992; McLachlan et al., 1996;).

특히 강수 혹은 해수기원의 염분포말은 해안사구 식생의 생장에 필요한 영양소를 공급하는 데 중요한 비중을 차지하는 것으로 인식되고 있으며, 지하수는 사구지대 내 외지에 형성되는 습지 생태계를 부양하는 핵심적인 영양공급원으로 인식되고 있다.

그러나 해안사구에서는 비사(飛砂, blown sand) 또한 중요한 영양유입 경로로 기능할 수 있다. 비사를 구성하는 해변 모래의 표면에는 해수에서 기인한 양이온이 다량으로 흡착되어 있기 때문이다.

비사는 강수나 염분포말, 지하수 등 다른 영양유입 경로와 비교할 때 많은 양이 집중적으로 유입되는 특성을 보이므로 해안사구의 영양수지에서 중요한 역할을 차지할 것으로 판단된다. 그러나 상대적으로 여타 영양유입 경로에 비해 연구가 미약한 수준이다.

비사에 의해 유입되는 영양소를 다룬 연구로는 Fay and Jeffrey(1992)의 연구가 주목할 만 하다.

이들은 우선 사구사(砂丘砂)와 비사(飛砂), 해변사(海濱砂)에 포함된 질소량을 비교·분석하여 질소의 함량이 해변사)비사)사구사로 나타남을 보여 비사가 질소의 공급원을 될 수 있음을 보였다.

또한 대표적인 사구식생종인 암모필라속 *Ammophila arenaria* 와 갯보리속 *Elymus farctus*

의 생육이 아무런 처리도 하지 않은 사구사와 비사, 질소를 투여한 사구사에서 차이를 보이는지 실험하여 *Ammophila arenaria* 에 비사를 공급했을 때 직접 질소를 투여했을 때와 마찬가지로의 결과가 얻어짐을 확인하였다. 이 연구는 비사가 해안사구의 영양유입 경로로서 중요한 위치를 차지하고 있음을 보여준 주목할만한 사례라 할 수 있다. 그러나 질소 이외의 영양소 유입에서 비사가 기여하는 정도에 대한 연구는 아직 시도된 바 없다.

마그네슘(Mg), 칼슘(Ca), 칼륨(K)은 식물의 생장에 필수적인 주요 양이온이다. 마그네슘은 엽록소 분자의 구성물질이자 식물체 내의 여러 효소를 활성화시키는 역할을 하며, 칼륨은 식물 내 삼투압과 이온균형, 기공개폐와 관련된 효소를 활성화시키는 역할을 한다. 칼슘은 식물체 내의 세포벽을 구성하는 물질로서 효소의 보조인자로서 기능하기도 하며 세포벽의 투수성을 조절하는데 관여한다(Barbour et al., 1999). 한편 나트륨(Na)은 식물체에서 필수적으로 요구되는 영양소는 아니지만 식물 내 삼투압과 이온균형과 관련이 있으며 염 스트레스의 주원인이다.

따라서 위의 네 가지 양이온의 유입량과 특성을 이해하는 것은 해안사구지대의 영양수지를 파악하고, 더 나아가 사구복원을 위한 식생 식재가 성공적으로 진행되기 위해 고려하거나 보완해야 할 요소가 무엇인지를 판단하는데 필수적인 작업이다. 나트륨, 마그네슘, 칼슘, 칼륨이 해수 내에 풍부하게 포함되어 있는 양이온²⁾이라는 사실은 비사가 이 네 가지 양이온을 해안사구로 운송하는 주요 매개체일 수 있음을 시사하는 것이다.

2) 해수에는 다양한 이온들이 용해되어 있으나 보통 염소(Cl⁻, 55.07%), 나트륨(Na⁺, 30.62%), 황산염(SO₄²⁻, 7.72%), 마그네슘(Mg²⁺, 3.68%), 칼슘(Ca²⁺, 1.17%), 칼륨(K⁺, 1.10%)이 전체의 약 99%를 차지한다. 이 값은 평균적인 수치이므로 시기와 지역에 따라 차이를 보일 수 있다.

따라서 비사를 통해 위의 네 가지 양이온이 얼마나 유입되는지를 파악하는 것은 해안사구지대의 양이온수지를 이해하여 향후 사구복원을 위한 효과적인 식생 식재 계획을 세우는데 기여할 수 있으리라 생각된다.

이 연구는 비사가 해안사구지대의 양이온 유입 통로 역할을 할 수 있을 것이라는 데 주목하여 비사를 통해 해안사구지대로 공급되는 나트륨, 마그네슘, 칼슘, 칼륨의 양을 분석하고자 하는 것이다.

이와 함께 비사를 통한 양이온의 공급이 지나는 공간적 패턴을 조사하고자 하는 것이다. 이 연구를 통해 해결하고자 하는 연구 질문은 아래와 같다.

첫째, 비사와 함께 유입되는 나트륨, 마그네슘, 칼슘, 칼륨의 양은 얼마나 되는가? 비사유입량을 고려할 때 해안사구지대 전체에 유입되는 네 가지 영양소의 총량은 얼마 정도로 추산할 수 있는가?

둘째, 비사와 함께 유입되는 나트륨, 마그네슘, 칼슘, 칼륨이 공급되는 지역적 범위는 어느 정도인가? 비사의 유입패턴과 결부시켜 볼 때 영양소의 유입은 어떤 특징을 나타내는가? 영양소별로, 혹은 포집 구역별로 차이를 보이는가?

이와 같은 문제를 해결하기 위해 신두리 해안사구지대에 3개의 측정단면을 선정하고 비사포집기를 설치하여 2000년 12월부터 2002년 2월까지 주기적으로 비사를 포집한 뒤, 포집된 비사와 동반 유입한 네 가지 양이온의 농도를 ICP-AES 분석법을 이용하여 측정하였다.

측정 결과를 이용하여 네 가지 양이온의 유입량

과 지역적 범위, 각각의 양이온들의 유입패턴 등을 분석하였다.

2. 연구지역과 연구방법

1) 연구지역

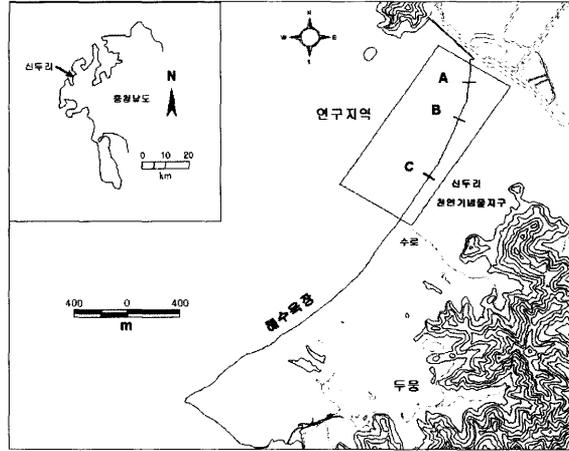
신두리 해안사구지대는 서해안 태안반도의 북서부에 위치한다. 수리적인 범위는 북위 36°49'~36°52', 동경 126°11'~126°13'이며 행정구역상으로는 충청남도 태안군 원북면 신두리에 속한다. 신두리 해안사구 지대는 의항리와 황촌리 사이로 만입된 지역에 위치하며, 내륙 경계는 배후 산지와 대략 일치한다. 해안사구 지대의 범위는 해안을 따라 길이가 약 4km에 달하며, 폭은 0.5~2km에 달한다 ((그림 1)).

신두리 해안사구의 중앙부에 있는 수로를 경계로 남쪽 지역은 해수욕장과 군 훈련지 등으로 사용되고 있다. 특히 해수욕장 지역은 전사구 전면 일부에 해안옹벽이 설치되어 있으며 콘크리트 건물 이 위치하고 있어 사구 경관의 인위적인 변형이 심하다.

반면에 수로를 경계로 북쪽 지역은 상대적으로 원형에 가까운 상태로 보전되어 있으며 현재 문화재청에 의해 천연기념물로 지정되어 있어 인위적으로 경관을 변형시키지 못하도록 되어 있다.³⁾

이 연구는 자연 조건 하에서 비사를 통해 해안사구지대로 유입되는 주요 양이온을 유입규모와 공간적 패턴을 분석하고자 하는 것이므로 수로 북쪽

3) 문화재청은 2001년 11월 말 '원형보존'의 필요성을 들어 신두리 산 263의 1동 81 필지의 사구 982,953 km²와 육지부 지정구역 지선 기준 500m 이내 해역을 천연기념물 제431호로 지정했다.



〈그림 1〉 연구지역

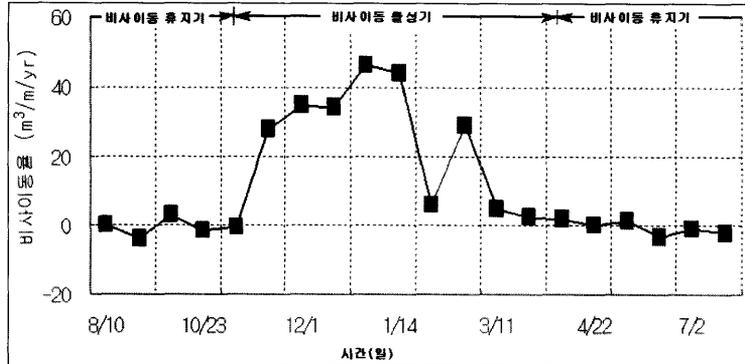
의 천연기념물 지정구역을 연구대상지로 삼았다. 신두리 해안사구지대에서는 주로 10월말부터 4월초에 이르는 기간동안 바람에 의한 모래이동이 활발하게 일어난다(박동원·유근배, 1979; 서종철, 2001). 이 기간은 북서계절풍이 지속적으로 강하게 불고 건조하며 사구식생을 구성하는 초본식물이 대부분 죽기 때문에 모래이동이 활발하게 일어난다. 그러나 이 시기를 제외한 다른 기간동안은 불규칙한 풍향과 식생의 활발한 성장, 습윤한 지면 조건 등으로 인해 바람에 의한 모래이동이 제한된다. 편위상 바람에 의한 모래이동이 활발하게 일어나는 기간을 ‘비사이드동 활성화기’, 모래이동의 이동이 제약되는 시기를 ‘비사이드동 휴지기’로 지칭하기로 한다면 신두리 해안사구지대의 경우 비사이드동 활성화기는 대략 10월말부터 4월초, 비사이드동 휴지기는 4월 중반부터 10월 중반까지로 볼 수 있다(〈그림 2〉). 비사이드동 활성화기는 비사를 통해 신두

리 해안사구지대로 주요 양이온이 활발하게 유입되는 시기라고 할 수 있다.

연구지역은 전사구의 해빈대비고도⁴⁾, 전사구열의 방향, 경사, 사면의 형태적 특징, 식피 밀도 등을 바탕으로 크게 A, B, C 세 지역으로 구분된다(〈표 1〉, 〈그림 1〉, 〈그림 3〉-좌). 사구지대 북부(이하 A) 지역과 사구지대 중부(이하 C)지역은 해빈대비고도가 2~3.5m 정도로서 비사이드동 활성화기의 중반 이후부터 해빈에서 유입된 비사가 전사구의 정상부를 넘어 배후의 사구지대로 이동하기 시작한다. 이에 비해 A지역과 C지역 사이에 위치한 B지역의 경우 전사구의 해빈대비고도가 5~6m에 달하여 해빈에서 유입된 비사가 대부분 전사구 전면의 사면에 퇴적되는 모습을 보인다. 해빈에서 유입된 비사가 소로가 위치한 전사구 정상부를 넘어 배후지 사구지대로 넘어가는 것은 비사이드동 활성화의 후반부에 접어든 이후부터이다(류호상,

4) 여기서 해빈대비고도란 사구와 해빈의 경계부와 사구정상부의 고도차를 의미한다. 사구와 해빈의 경계는 전사구 사면의 경사 급변점을 기준으로 삼았다. 신두리 해안사구지대의 경우 사구와 해빈은 식생피복의 여부로 비교적 손쉽게 구분할 수 있다.

飛砂를 통해 신두 사구지대로 유입되는 주요 양이온의 규모와 공간적 패턴 분석



〈그림 2〉 신두리 해안사구지대의 비사이동 활성화기와 비사이동 휴지기

출처: 서종철(2001)의 자료를 바탕으로 재구성

2001).

2) 연구방법

(1) 비사시료의 포집

① 포집기

비사 포집에 사용된 포집기는 Leatherman(1978)과 Rosen(1978)이 제안한 수직 원통형 포집기를 변형한 것이다(〈그림 3〉-우). Leatherman-Rosen형 수직 원통형 포집기는 포집 효율이 떨어진다는 단점이 있으나, 제작이 간편하고 비용이 저렴하여

전세계적으로 널리 사용되는 포집기이다. 2000년 12월 ~ 2001년 11월의 기간 동안은 A 지역과 C 지역의 해빈-사구 경계부와 사구 정상부에서 비사를 포집하였다. 2001년 11월 현장에 설치한 포집기가 파손되어 2001년 12월 13일 포집기를 재설치하였다. 이 때 비사의 내륙 이동 범위와 영양유입의 공간적 패턴을 상세히 살펴보기 위하여 기존의 위치(해빈-사구 경계, 사구 정상부) 외에 사구 후면부와 이차사구에도 포집기를 추가로 설치하였고, A, C 지역 외에 B 지역의 해빈-사구 경계부와 사구 정상부에 포집기를 설치하였다(〈그림 3〉-좌).

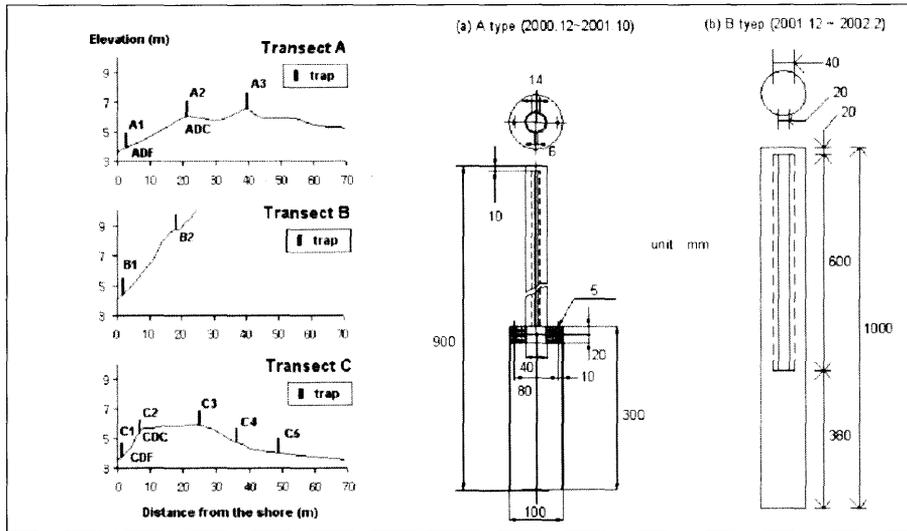
〈표 1〉 비사포집지역의 지역별 특성

포집지역	해빈대비고도(m)	사구열 방향	전사구 경사(%)	사면 특성	식피밀도	비사 유입율	
						서종철(2001)	류호성(2001)
A	2-3	N8° E	11	선형	소	46.7	2.26
B	ca. 6	N26° E	26	선형	대	8.1	7.34
C	2.5-3.5	N37° E	18.6	불록	중	8.8	2.48

주) 1. A, B, C 구역의 특성은 류호성(2001)의 기술내용을 이용하여 재구성한 것이다.

2. 식피밀도는 A, B, C 구역의 상대적인 정도를 비교한 것이다. 즉, 여기서 '대', '중', '소'의 의미는 식피밀도가 B > C > A 임을 지시하는 것이다.

3. 비사유입율의 경우 서종철(2001)의 단위는 m³/m/yr 인데 반해, 류호성(2001)의 자료의 단위는 m³/m/4month 이다. 두 값을 비교할 수 있는 수치로 보정하는 문제, A, C 지역의 경우 두 값이 서로 큰 차이를 보이는 문제에 대해서는 결과 부분에서 논의하게 될 것이다.



〈그림 3〉 비사포집지역별 단면과 포집기 설치 위치(좌), 비사포집에 사용한 포집기(우)

② 비사시료의 구성

분석에 사용된 비사자료는 2000년 12월 ~ 2002년 2월동안 포집되었다. 비사자료는 포집기가 설치된 위치와 사용한 포집기의 유형, 포획 기간 등에 따라 서로 구별되는 두 가지 자료로 구성되어 있다(표 2). 편의상 이것을 BS-I, BS-II로 지칭하기로 하자. BS-I은 2000년 12월 ~ 2001년 3월까지 A type의 포집기를 이용하여 포집된 시료이다.

BS-I은 A, C 지역의 해변-사구 경계(Dune foot, 이하 DF)과 사구정상(Dune crest, 이하 DC)에서 대략 1주일 간격으로 포집되었다. 2001년 4월 ~ 11월까지도 BS-I을 얻은 것과 동일한 포집기 배치로 비사포집을 시도하였으나, 식생피복의 발달로 비사이동이 제한되어 A의 DF에서만 비사시료가 포집되었다. 한편 이 기간동안 A의 DF에서 회수된 비사시료는 2000년 12월 ~ 2001년 3월동안 포집된 자료에 비해 포집기간이 길고 부정기적이었다. 따라서 2001년 4월 ~ 11월까지 포집된 비사시료는

분석에서 제외하더라도 양이온 유입량을 추정하는데 큰 오류를 범하지는 않으리라 판단하였다.

BS-II는 2001년 11월 현장에 설치했던 A type의 비사포집기가 파손됨에 따라 기존의 포집기를 철거하고 B type의 포집기로 재설치한 이후 포집된 시료들이다. BS-II는 A, B, C 지역 모두에서 포집된 비사시료로서 BS-I에 비해 전사구 배후지까지 포집범위를 넓혀 비사시료를 포집하였고, 대략 2주간의 간격으로 포집된 비사를 수거하였다. BS-I, BS-II의 포집위치와 포집기간을 〈표 2〉, 〈표 3〉으로 정리하였다.

(2) 비사자료의 분석

비사에 흡착되어 동반 유입된 주요 양이온은 암모늄 아세테이트(NH₄OAc) 추출법을 이용하여 추출한 뒤 유도결합 플라즈마 분광법(ICP-AES, Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)를 이용하여 정량하였다. 암모늄 아

飛砂를 통해 신두 사구지대로 유입되는 주요 양이온의 규모와 공간적 패턴 분석

(표 2) 비사시료의 구성과 포집 지점

비사자료	총 포집기간	회당 평균포집기간	시료 회수	포집지점		
				단면	포집기 설치 지점	
					해빈-사구경계	정상 → 배후지
BS-I	200.12 ~ 2001.3	8일	8회	A	ADF	ADC
				B	CDF	CDC
BS-II	200.12 ~ 2002.2	13일	5회	A	ADF(A1)	ADC(A2) - A3
				B	B1	B2
				C	C1	CDC(C2) - C3 - C4 - C5, SCs

주) 1. DF = 해빈-사구 경계, DC = 사구정상, SCs = 비교를 위해 이차사구에서 얻은 시료
 2. ADF 와 A1, ADC 와 A2, CDF 와 C1, CDC 와 C2 가 동일한 위치임.

(표 3) 분석에 사용된 비사시료의 회수별 포집기간

비사자료	회수	내 용	포집기간
BS-I	1	'00.12.09-15	6
	2	'00.12.22-29	7
	3	'00.12.29-'01.01.05	7
	4	'01.01.20-02.01	12
	5	'01.02.09-17	8
	6	'01.02.23-03.02	7
	7	'01.03.02-09	7
	8	'01.03.23-30	7
BS-II	1	'01.12.13-22	9
	2	'01.12.22-'02.01.05	14
	3	'02.01.05-11	6
	4	'02.01.11-25	14
	5	'02.01.25-02.14	20

세테이트 추출법은 중성의 1M 암모늄 아세테이트 용액을 이용하여 비사 표면에 흡착되어 있는 양이온을 NH₄⁺이온으로 치환, 추출하는 방법이다. 이 방법은 물에 용해될 수 있는 형태 혹은 빠르게 치환될 수 있는 형태로 토양 내에 존재하는 알칼리 혹은 알칼리토 금속의 함량을 측정하는데 널리 사용된다(Simard, 1993). 구체적인 방법은 다음과 같다. -1Φ(2mm)체를 통과한 음건시료 6g에 회석울을 5:1(추출액: 시료)로 하여 1M 암모늄 아세테이트 용액(CH₃COOHNH₄) 30ml를 가한다. 시료의 양이 적을 경우 회석울 10:1을 적용시키기도 하였

다. 30분간 진탕한 후 여과지(Whatmann No.44)로 추출액을 여과한다. 발광분광계(Shimadzu ICP Q-1000)를 이용하여 추출액으로부터 치환성 양이온(Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺)의 농도를 측정한다.

유도결합 플라즈마 분광법을 이용해 각각의 양이온에 대해 얻어진 값은 추출액으로부터 얻어진 ppm 단위의 농도(C)이다. 이 값을 비사 1kg당 동반 유입되는 양이온의 양(mg)으로 변환하려면 다음과 같이 계산하면 된다.

$$Q = D \cdot C$$

여기서 Q는 비사 1kg 당 동반 유입되는 양이온

의 양(mg/kg), D는 희석율로 5 혹은 10(ml/g = l/kg), C는 추출액에서 얻어진 양이온의 농도(ppm=ml/l)이다. 이 때 Q를 “동반 유입율”이라고 정의한다. 이 연구에서는 동반유입율(Q)을 이용하여 비사를 통해 해안사구지대로 유입되는 양이온의 양과 유입범위를 분석·정리하였다.

3. 연구 결과 및 논의

1) 양이온의 유입량과 유입 범위

(1) 양이온의 유입량

비사에 의해 해변에서 해안사구로 유입된 양이온의 유입량을 분석하기 위해서는 해변-사구 경계부에서 포집된 비사시료의 동반유입율 평균과 산포를 살펴보아야 한다. <표 4>와 <그림 4>은 각 양이온별 유입량의 평균과 산포, 변이계수 등을 정리한 것이다. BS-I, BS-II가 존재하는 A, C 지역

의 경우는 각각에 대해 평균과 산포를 정리하였고 전체평균을 따로 계산하였다. 또한 t-검정법을 이용하여 두 자료 간의 유의한 차이를 보이는지 살펴 보았다.

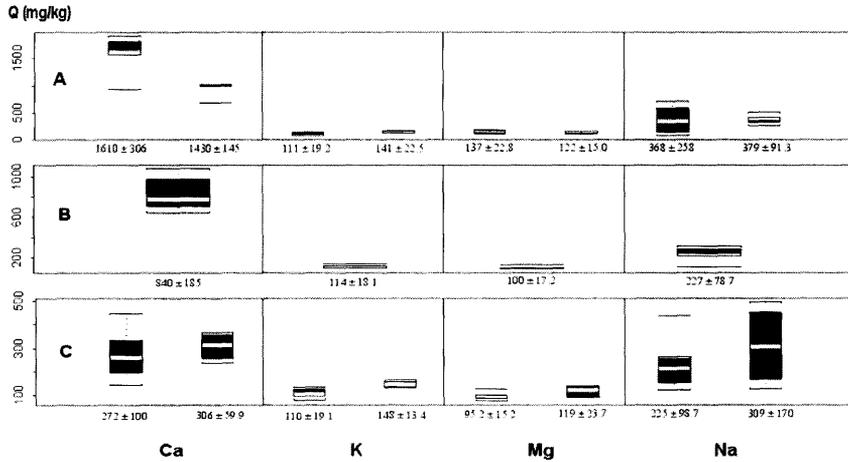
표와 그림을 통해 알 수 있는 것은 비사 1kg 당 동반 유입되는 Ca, Na의 값이 K와 Mg의 값보다 높게 나타난다는 것이다. Ca의 경우는 A 지역의 경우 K, Mg의 10배가 넘는 값을, C지역에서는 2배 이상의 값을 보여주고 있다. Na의 경우는 지역에 따른 변화는 현저하지 않으며 대략 K, Mg의 3배에 해당되는 값을 보여주고 있다. 이는 해수 중 양이온 비율의 순위(Na>Mg>Ca>K)와는 일치하지 않는 결과이다. 이와 같은 결과가 나타나는 데는 각 이온별 흡착력 차이, 포집기에 포집된 후 수거하기 전까지 발생한 용탈, 국지적인 기원 등 다양한 요인이 작용하였을 것으로 사료되나 이 부분은 추후 연구가 요구되는 부분이며 이 연구의 범위를 넘는다.

변이계수를 이용해 각 영양소별 동반유입율의

<표 4> 포집지역에 따른 영양소별 동반 유입율의 평균과 표준편차

포집지역	Ca		K		Mg		Na	
	BS-I	BS-II	BS-I	BS-II	BS-I	BS-II	BS-I	BS-II
A	1610±306 (0.19)	1430±145 (0.10)	111±19.2 (0.17)	141±22.5 (0.16)	137±22.8 (0.17)	122±15.0 (0.12)	368±258 (0.70)	379±91.3 (0.24)
	1351±418 (0.31)		122±25.0 (0.20)		131±20.8 (0.16)		372±204 (0.55)	
	0.001		*0.024		0.228		0.929	
B	840±185 (0.22)		114±18.1 (0.16)		100±17.2 (0.17)		227±78.7 (0.35)	
C	272±100 (0.37)	306±59.9 (0.20)	110±19.1 (0.17)	148±13.4 (0.09)	95.2±15.2 (0.16)	119±23.7 (0.20)	225±98.7 (0.44)	309±170 (0.55)
	283±87.4 (0.31)		123±24.9 (0.20)		103±20.9 (0.20)		253±126 (0.50)	
	0.544		*0.006		0.060		0.296	

주) 1. 모든 수치는 동반유입율의 단위, 즉 mg/kg이다. 이는 이 표의 수치가 비사 1kg당 동반 유입된 해당 양이온의 mg수임을 의미한다.
 2. A, C의 경우 BS-I, BS-II 별 평균과 표준편차, 자료 전체에 대한 평균과 표준편차, 두 평균의 차이 여부에 대한 t-test 결과 나타난 유의확률값(p-value)이다. 0.05 이하의 유의확률값을 나타낸 것은 *으로 표시하였다. 등분산 가정의 유효성은 별도의 검정 결과 모든 경우에 타당한 것으로 나타났다.
 3. ± 부호가 붙은 수치는 (평균)±(표준편차)의 꼴로 표시된 것이다.
 4. 괄호 안의 수치는 변이계수, 즉 (표준편차)/(평균)이다. 변이계수가 0.30 이상인 것은 굵은 글씨로 표시하였다.



〈그림 4〉 포집지역에 따른 영양소별 동반 유입율의 평균과 표준편차

산포 특성을 살펴보면 Na의 경우 0.70에 달하는 경우가 나타나는 등 산포가 크게 나타나고 Ca이나 Mg, K는 대체로 0.20 근방으로 유사하게 나타난다. 이것은 비사에 동반 유입되는 영양소 중 나트륨의 농도 변이가 가장 심하다는 것을 의미한다.

이는 아마도 나트륨이 용탈이 가장 용이한 영양소라는 점과 관계가 있을 것이라고 사료된다.

지역적인 측면에서 살펴보면 K, Mg의 경우 A, B, C 지역 간의 동반유입율이 거의 유사하며 Na의 경우 역시 A, B, C 지역 간의 유의미한 차이를 보여 주지 못하고 있는 반면, Ca의 경우는 A > B > C의 경향을 보여주고 있다. 이것은 비사를 통해 해안사구지대로 유입되는 칼슘의 양이 신두리 해안사구의 북부로 갈수록 커진다는 것을 의미한다. 이와 같은 경향성은 비사에 동반되어 유입되는 칼슘을 공급하는 공급원이 해수기원이라기보다는 보다 국지적인 요인과 관련이 있을 것임을 시사한다.

현장 관찰에 따르면 북부 쪽으로 갈수록 패각이나 패사 등이 집적율이 높아진다는 점과 북부 사구 옆 앞 간석지에 굴 양식장이 위치하고 있다는 점

등이 이와 같은 경향과 연관이 있을 것임을 짐작하게 하나 이를 명확히 규명하기 위해서는 추후 보다 자세한 연구가 필요하다고 본다.

BS-I, BS-II가 존재하는 A, C 두 지역의 경우, 두 자료 간의 유의한 차이를 보이는 것은 총 3가지 경우로 확인되었다. Ca의 경우 A지역에서 BS-I 자료의 평균이 BS-II 자료의 평균에 비해 큰 값을 보였다. 반면 K의 경우 A, C 지역 모두에서 BS-I 자료의 평균이 BS-II 자료의 평균에 비해 작은 것으로 나타났다. BS-I, BS-II 간의 차이를 유발한 요인으로 포집방식의 변화(포집기의 교체), 지역적인 요인에 따른 동반 유입율의 자연적인 변이, 비사 흡착력의 선택적 변이 등을 고려할 수 있으나, 이를 규명하는 것은 이 연구의 범위를 넘는다. 다만 전체 비사자료에서 얻어진 동반유입율의 평균을 이용하고자 할 때 이 점을 유념하여 해석에 주의를 기할 필요가 있다고 판단된다.

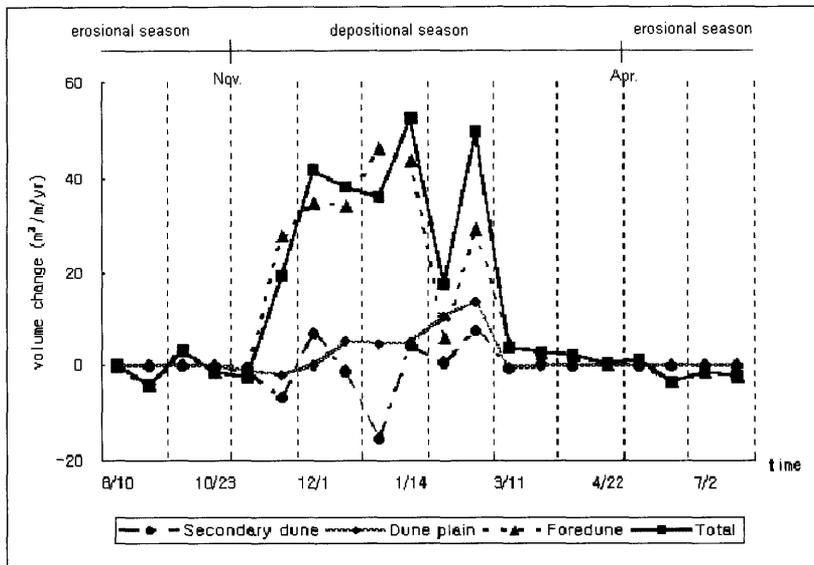
(2) 양이온의 유입범위

비사에 의해 동반 유입된 양이온의 유입범위 혹은

은 도달범위가 비사자체의 최대도달범위를 넘을 수 없다는 것은 자명하다. 서종철(2001)의 결과에 따르면 비사이동 활성기 혹은 유입된 비사에 의해 신두리 해안사구지대 전체의 부피가 증가하는 시기 동안 전사구(前砂丘, foredune)와 전사구 후면의 사구평원(Dune plain) 혹은 사구슬랙(Dune slack)의 부피는 증가하나 그보다 내륙에 위치한 이차사구(secondary dunes)지대는 부피의 증가와 감소가 번갈아 일어난다. 이러한 부피변화 패턴은 전사구와 전사구 후면의 부피변화는 주로 해변으로부터 유입된 비사에 의해 주도되지만, 보다 내륙쪽에 위치한 이차사구의 경우 자체적인 재동(再動, reworking)에 의해 주도되기 때문이라고 해석할 수 있다. 다시 말해 하나의 비사이동 주기 동안 해변에서 기인한 비사가 도달할 수 있는 최대 범위는 대체로 전사구와 사구평원(혹은 사구슬랙)이

위치한 지역과 일치한다고 할 수 있다. 전사구와 사구평원(혹은 사구슬랙)은 신두리 해안사구지대의 연구지역 내에서 곳에 따라 차이를 나타내기는 하나 대체로 해안선으로부터 대부분 100m 이내에 위치하고 있다. 따라서 비사 자체의 도달범위는 해변-사구 경계부로부터 대체로 100m 이내에 위치한 지역이라고 말할 수 있다.

포집기의 포집비사량의 패턴은 비사의 실제 도달거리가 이보다 적을 수 있음을 시사한다. 보다 내륙지대까지 포집기를 설치하고 비사포집을 시도하여 얻은 BS-II 자료에 따르면 A지역의 경우 비사이동 활성기의 후반부로 갈수록 가장 내륙에 위치한 A3(해빈-사구경계에서 수직거리 약 40m, 그림 3-좌)에서 포집되는 비사량이 해안 쪽에 위치한 A1, A2에서 포집되는 비사량에 비해 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나지만, B, C 지역의 경우



〈그림 5〉 신두리 해안사구지대의 하위지역별 부피변화 패턴

출처: 서종철(2001)에서 재구성

가장 내륙지역에 설치한 포집기(B2, C5)에 비사포집이 완료된 2002년 2월 14일까지 포집된 비사는 거의 무시할 수준에 불과했다(그림 6). B2는 해빈-사구경계로부터 수직으로 약 20m의 거리에 위치하며 C5는 약 50m의 거리에 위치한다(그림 3-좌).

포집기의 포집 효율이 100%가 아니라는 점과 비사포집이 완료된 시점이 비사이동 활성화 후반부 초기였음을 고려하더라도 이러한 결과는 B, C지역에서 비사가 공급되는 사구 배후지의 범위는 전사구와 사구평원(혹은 사구슬랙)이 위치하고 있는 해빈-사구 경계로부터 약 100m에 훨씬 못 미칠 수도 있음을 시사하는 것이다.

비사를 통한 양이온의 유입범위를 분석하기 위해 고려해야 할 또 다른 문제는 비사가 내륙으로 이동하면서 기존의 사구사와 혼합될 수 있다는 점이다. 비사는 '샬레이션(saltation)' 방식으로 이동하기 때문에 해안사구지대의 전사구로 유입되기 전 대부분 해빈의 모래로 구성되어 있던 '모래구름(sand cloud)'⁵⁾은 전사구열로 유입된 이후는 이미 전사구에 위치하고 있는 사구의 모래와 뒤섞이게 된다.⁶⁾ 이미 전사구에 위치하고 있는 사구 모래는 과거의 비사이동 활성화 때 해빈에서 공급된 것이기 때문에 해빈에서 유입된 비사에 비해 양이온의 함량이 떨어진다. 따라서 비사의 이동과정에서 해빈의 모래와 기존 사구의 모래가 뒤섞이게 되면 비사에 의해 동반 이동하는 양이온의 농도도 떨어지게 된다. 이를 편의상 "혼합에 의한 희석"(dilution by mixing)이라고 칭하기로 하자.

혼합에 의한 희석은 사구의 식피밀도에 따라 달라질 수 있다고 판단된다. 사구의 식피밀도가 높을 경우 비사가 전사구를 넘어 내륙으로 이동하려면 전사구 전면에 위치한 기존의 식생을 매몰시키면서 조금씩 전진해야한다. 이로 인해 전사구를 넘어오는 비사가 접촉하는 사구표면의 모래는 동일한 비사이동 활성화에 전사구 전면에 퇴적된 모래일 가능성이 높아진다. 결과적으로 식피밀도가 높은 전사구를 넘어 전사구 배후지에 공급되는 비사는 기존의 사구사와 혼합이 일어나는 정도가 떨어지게 된다. 반면 전사구의 식피밀도가 낮은 경우, 위와 같은 과정이 부진하기 때문에 해빈으로부터 비사가 샬레이션 방식으로 유입될 때 기존의 사구사와 혼합되는 정도가 높아지게 된다. 따라서 식피밀도가 낮은 전사구를 통과하는 비사의 경우 혼합에 의한 희석이 현저하게 나타날 수 있을 것이다.

〈그림 7〉은 해빈-사구 경계부 비사시료의 동반유입율에서 사구정상부 비사시료의 동반유입율을 뺀 값을 Δ 라 두고 각 지역별로 Δ 의 평균과 산포를 분석한 것이다. 상대적으로 식피밀도가 가장 높았던 B지역의 경우는 내륙에 설치한 포집기 B2에 포집된 비사량이 너무 작아 비교분석이 불가능하였다. Δ 가 양수인 경우는 해빈-사구 경계부 비사시료의 동반유입율이 더 높았음을 의미하는 것이고 Δ 가 음수인 경우는 사구정상부 비사시료의 동반유입율이 더 높았음을 의미하는 것이다. Δ 는 혼합에 의한 희석이 어느 정도 일어났는지를 살필

5) 바람에 의해 모래가 이동할 때 비사가 마침 구름과 같이 떼를 지어 이동하게 되는데, 이를 '모래구름(sand cloud)'라고 부른다.

6) 샬레이션(saltation)이란 모래가 개별적으로 길게 튀어 이동하는 것을 말한다. 바람에 의해 지면에서 일정 높이 이상 튀어 오르면 모래입자는 일정 거리를 비행한 뒤 다시 지면으로 떨어진다. 이 때 지면에 있는 모래가 충격에 의해 다시 튀어 오른다. 이 때 일정 높이 이상 튀어 오르면 모래입자는 다시 바람에 의해 일정 거리를 비행하고 지면에 떨어진다. 위와 같은 작용이 연쇄적으로 일어나면 다량의 모래가 떼를 지어 모래구름을 형성하면서 이동하게 된다. 그러므로 모래가 샬레이션을 통해 해빈에서 사구로 이동할 경우 모래의 구성이 점차 해빈사에서 사구사로 변화하게 된다.

수 있는 좋은 지표가 될 수 있다. <그림 7>에 따르면 전반적으로 Δ 의 평균은 양수로 나타나는 경우가 많아 혼합에 의한 희석이 모든 지역에서 어느 정도 일어난다고 판단할 수 있게 한다. 그러나 A 지역의 경우 모든 양이온에 대해 Δ 의 평균이 양수로 나타나 혼합에 의한 희석이 보다 현저한 것으로 나타났다. 이에 비해 C의 경우는 산포를 고려할 때 Δ 가 대부분 0 주변에 위치하고 있음을 알 수 있다.

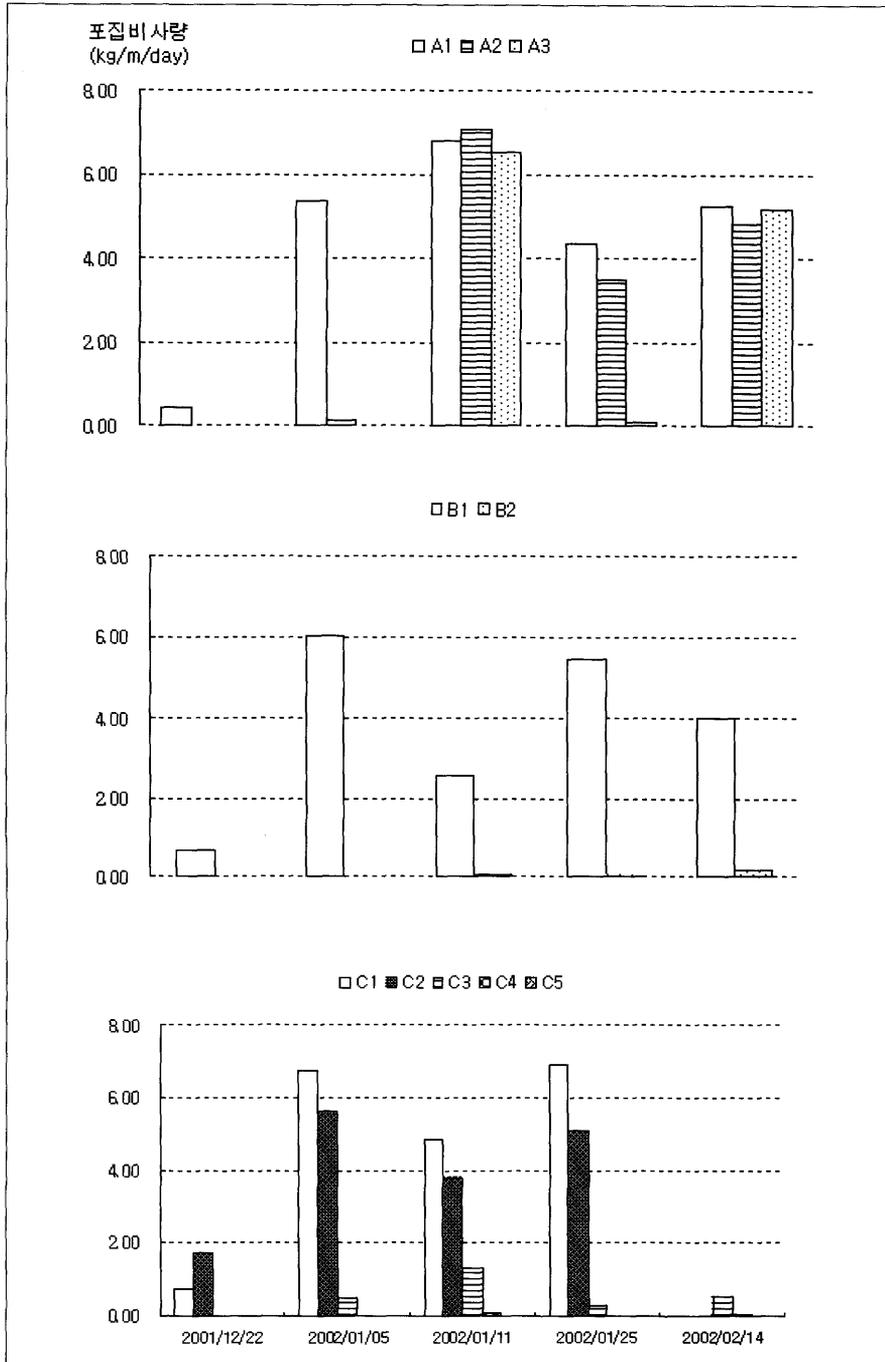
이는 위의 논의로부터 A, C 지역의 전사구 식피밀도의 차이에서 기인하였을 가능성이 높다고 본다.

결론적으로 비사에 의한 양이온의 유입범위는 비사자체의 최대도달거리와 혼합에 의한 희석효과에 의해 제한된다고 할 수 있다. 신두리 해안사구지대의 경우 비사자체의 최대도달거리는 해안사구의 부피변화패턴으로부터 해변-사구 경계로부터 약 100m 에 해당되는 것으로 파악될 수 있으나 각각의 비사이동주기에 따라 이보다 더 짧은 영역에 국한될 수도 있으며 공간적으로도 편차를 보일 수 있다. 한편 혼합에 의한 희석효과에 의해 비사의 양이온 공급 능력이 저하될 수 있으며 이는 전사구의 식피밀도 정도에 따라 영향을 받을 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 비사에바람에 의해 모래가 이동할 때 비사가 마침 구름과 같이 때를 지어 이동하게 되는데, 이를 '모래구름(sand cloud)' 라고 부른다.

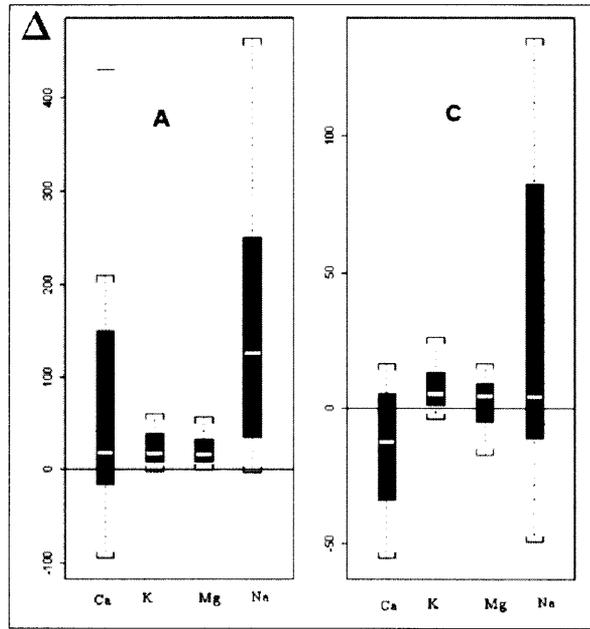
의한 양이온의 '유효도달거리'는 비사자체의 최대도달거리와 혼합에 의한 희석효과를 동시에 고려하여 판단하여야 할 것이다. 비사에 의한 양이온의 '유효도달거리'를 결정하는 문제는 이 연구의 범위를 넘어서며 추후 보다 상세한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이차사구지대에서 포집한 비사에서 분석된 동반유입율은 전사구에서 포집된 비

사에 비해 영양소별로 1/10~1/3 수준에 불과한 것으로 나타나 간접적으로 위의 결론을 지지한다(<그림 8>).

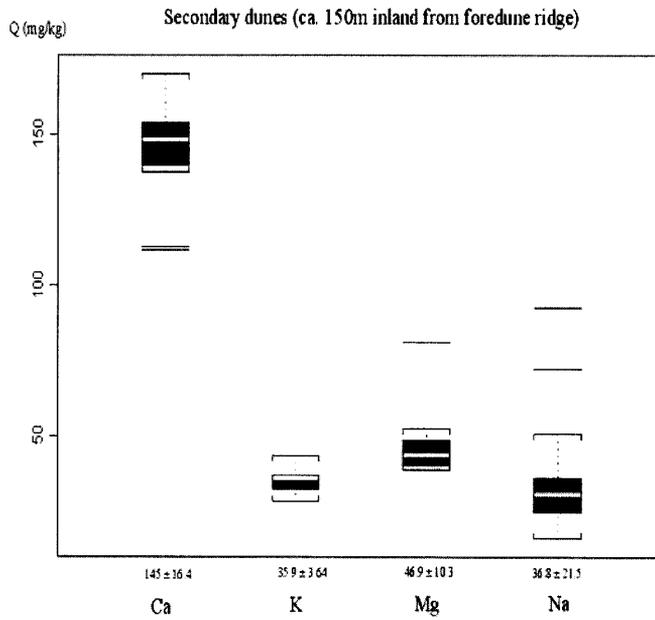
飛砂를 통해 신두 사구지대로 유입되는 주요 양이온의 규모와 공간적 패턴 분석



〈그림 6〉 포집시기별 비사의 최대도달거리



〈그림 7〉 A, C 지역의 혼합에 의한 희석 효과



〈그림 8〉 이차사구에서 포집된 비사시료의 동반 양이온의 규모

2) 주요 영양소의 연간 유입규모 추정

신두리 해안사구 지대의 전사구로 유입되는 비사량에 대해서는 선행연구에서 보고된 바가 있다(서종철, 2001; 류호상, 2001, <표 1>). 기존의 연구에서 밝혀진 비사유입량과 이 연구에서 포집된 비사를 분석해서 얻은 양이온별 동반유입율을 결합시키면 신두리 해안사구지대로 유입되는 주요 영양소의 연간 유입 규모를 추정해 볼 수 있다. 이를 위해서는 몇 가지 가정에 입각한 전처리가 필요하다.

첫째, 선행 연구에서 서로 다른 시간 간격동안 측정된 비사유입량을 연간 유입량으로 표준화시켜야 한다. 서종철(2001)은 1999년 7월부터 2000년 7월까지 1년 간 사구지형의 부피 변화를 측정하여 신두리 해안사구 지대로 유입되는 비사량을 측정하였다. 류호상(2001)은 서종철(2001)와 같은 방법을 사용하되 좀더 세밀한 간격의 측선을 이용하여 2000년 12월부터 2001년 3월까지 4개월 간 부피변화를 측정하여 비사유입량을 측정하였다. 그러므로 이 두 값을 이용하여 신두리 해안사구지대로 매년 유입되는 비사량을 추정하기 위해서는 우선 류호상(2001)의 값을 연간 유입량으로 변환해야 한다. 이는 전사구 부피변화 패턴을 이용하여 해결할 수 있다. 서종철(2001)가 조사한 1년 동안의 전사구 부피변화 패턴에 따르면 12월부터 3월까지 4개월 간 일어나는 부피 증가량이 전체 부피 증가량의 85%를 차지하는 것으로 나타났다(그림2). 전사구 부피변화 패턴이 매년 큰 변화를 보이지 않는다고 가정하면 류호상(2001)의 관측값에 보정계수 $1/0.85=1.18$ 을 곱하여 보정값을 얻을 수 있다.

둘째, 부피단위로 측정된 비사유입량을 질량단위로 변환시켜야 한다. 비사유입량은 해빈 1m 당

유입된 비사의 부피(m^3)로 측정된 것이다. 반면 비사를 통해 유입된 양이온의 양은 비사 1kg 당 동반 유입된 양이온의 질량(mg), 즉 동반유입율로 측정되었다. 따라서 비사 유입량을 이용하여 동반 유입된 양이온의 양을 구하기 위해서는 부피로 표현된 비사 유입량을 질량으로 변환시켜 주어야 한다. 이를 위해서는 신두리 해안사구지대 전사구의 용적밀도(bulk density)를 알아야 한다. 이 연구에서 신두리 해안사구지대 전사구의 용적밀도는 측정된 바 없으나 일반적인 사질 토양에서 확인되는 용적밀도 $1.4\sim 1.5 g/cm^3$ 와 크게 다르지 않다고 가정해도 무리가 없으리라 생각된다(Donahue et al., 1983, p. 58). 이렇게 가정한다면 부피로 측정된 해빈 1m 당 유입된 비사 유입량은 용적밀도를 곱하여 질량단위로 변환시킬 수 있다.

위의 두 가지 가정을 기초로 신두리 해안사구지대에 유입되는 양이온별 총량은 다음과 같다(<표 5>). <표 5>는 위에서 언급한 바와 같이 류호상(2001)의 관측값을 연간값으로 보정하는 보정계수를 1.18로 두고 용적밀도를 $1.5 g/cm^3 = 1500kg/m^3$ 로 두어 비사의 유입량과 이에 따른 주요 영양소의 유입량을 추정한 것이다. Ca가 가장 높은 값을 보이고 있으며 그 뒤로 Na, K, Mg 순을 따르고 있다.

다른 지역에서 측정된 자료이기 때문에 비교하기에는 무리가 따르지만, van der Valk(1974)에서 제시된 염분포말을 통한 전형적인 유입규모와 비교할 때 비사를 통해 동반 유입되는 주요 양이온의 유입규모는 유사한 수준인 것으로 보인다. 이는 비사를 통해 유입되는 양이온의 규모가 해안사구지대의 영양수지에서 중요한 위치를 차지할 수 있음을 시사하는 것이다.

물론 여기에 제시되는 추산치는 비사유입량의

(표 5) 비사를 통해 신두리 해안사구로 동반 유입되는 주요 양이온의 연간 유입규모

포집지역	보정계수	용적밀도 (t/m ³)	비사유입량 (t / m / yr)			양이온의 유입량 (kg / m / yr)				cf. 염분포말 유입 규모 (kg/m/yr)
			서종철(2001)	류호상(2001)	평균	Ca	K	Mg	Na	
A	11.8	1.5	70	4	37	56.2	4.6	4.8	13.8	Ca ~ 1.43
B			12.2	13	12.6	10.6	1.4	1.3	2.9	K ~ 1.37
C			13.2	4.3	8.8	2.5	1.1	0.9	2.3	Mg ~ 3.22
전체			34.8	5.5	20.2	26.3	2.7	2.6	7.2	Na ~ 23.5

주) 1. 염분포말의 유입규모는 van der Valk, 1974 의 연구결과에서 인용한 것임. van der Valk 는 미국 노스캐롤라이나 케이프 해터라스 Cape Hatteras 국립공원에서 해안사구지대에 공급되는 염분포말의 양을 추정함. 원자료에서는 kg/ha/yr 단위로 제시된 것을 100m 길이의 해안선에 대해 100m 내륙지까지의 범위로 비교한다고 보고 1kg/ha/yr = 1kg/100m/yr = 0.01kg/m/yr 로 변환함.

추정치가 아직은 불완전하다는 점에서 한계를 지닌다. 서종철(2001)와 류호상(2001)의 경우가 A, C 지역에서 큰 차이를 보이는 것은 측선의 변화를 측정하는 방식의 차이에서 기인한 것으로 자연적인 연간 규모라고 판단하기 어려운 측면이 있다. 전자는 측선의 길이를 이차사구까지 연장하여 지형변화를 측정하였으나 단면간의 간격이 넓은 반면, 후자는 주로 전사구를 중심으로 보다 많은 단면을 설치하여 공간변이의 영향을 줄여서 측정한 값이다. 보다 정확한 영양수지 연구를 위해서는 위의 두 요건을 고려하여 보다 정밀하게 부피변화를 측정하고 이를 이용하여 비사유입량 추정의 정확도를 높일 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

이 연구는 신두리 해안사구지대를 대상으로 비사와 함께 유입되는 주요 양이온 Ca, Mg, K, Na의 유입량과 유입범위를 조사한 것이다. 이를 위해 먼저 천연기념물로 지정된 신두리 해안사구지대의 전사구열을 대상으로 해빈대비고도, 전사구열의 방향, 경사, 형태적 특징, 식피밀도를 고려하여 A, B, C 세 개의 조사단면을 선정한 뒤, 비사포집기를

설치하여 비사를 포집하고 암모늄 아세테이트법으로 비사와 동반 유입된 양이온을 추출한 뒤 유도 결합 플라즈마 분광법(ICP-AES)을 이용하여 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 비사를 함께 유입되는 양이온의 농도의 경우 Ca와 Na가 높은 값을 나타내는 데 반해, K, Mg는 낮은 값을 나타냈다. Ca와 Na는 K, Mg에 비해 거의 2~10배의 규모를 보였다. 그러나 Na를 제외한 Ca, K, Mg의 변이계수는 유사하게 나타나 변이의 규모는 대체로 유사한 것으로 나타났다. 또한 Ca의 경우는 사구지대 북부로 갈수록 높아지는 경향성을 보였다. 이와 같은 양이온 농도의 패턴은 해수 내 농도 관계와 일치하지 않는다. 이는 비사를 통해 유입되는 양이온의 구성이 해수의 영향으로만 결정되는 것은 아님을 반증한다. 국지적인 요인, 혹은 비사 자체가 가지는 특성과 관계가 있으리라고 판단되나 이와 관련된 연구는 추후의 과제로 돌린다.

둘째, 비사와 함께 유입되는 양이온의 도달 범위는 비사 자체의 도달 한계와 함께 비사이동 과정에서 발생하는 혼합에 의한 희석 효과의 영향을 받는 것으로 판단되었다. 신두리 해안사구지대의 비사 도달 한계는 사구지대의 부피변화를 고려할 때 대략 해빈-사구 경계로부터 내륙으로 100m 정도에

해당되는 것으로 보이나, 혼합에 의한 희석효과로 인해 내륙으로 들어갈수록 운반되는 양이온의 양이 감소하여 실제 '유효도달거리'는 이보다 작을 것으로 판단되었다. 특히 전사구의 식피밀도는 비사이동 과정에 영향을 미쳐 혼합에 의한 희석효과를 조절하는 것으로 판단되었다. 즉, 식피밀도가 높을수록 해변사의 비율이 높아져 상대적으로 혼합에 의한 희석효과가 떨어지는 반면, 식피밀도가 낮을수록 기존의 사구사와 혼합되는 비율이 높아져 혼합에 의한 희석효과가 높아진다. 식피밀도가 높을수록 사구 배후지에 도달하는 비사의 도달거리가 줄어드는 경향이 있는 것을 감안하며 위의 두 가지 요인이 서로 결합하여 비사와 함께 유입되는 양이온의 '유효도달범위'를 일정하게 조절하는 것으로 판단된다.

셋째, 비사와 함께 유입되는 양이온의 농도(동반 유입율)과 비사의 유효도달 범위를 고려하여 신두리 해안사구지대로 연간 유입되는 주요 양이온의 양을 추산한 결과 해변 1m 당 Ca는 평균 26.3kg, K는 2.7kg, Mg는 2.6kg, Na는 7.2kg 이 유입되는 것으로 나타났다. 이는 전형적인 염분포말 유입규모와 유사한 규모이다. 양이온의 연간유입량 추정치가 불확실한 비사 유입량 추정치로 인해 부정확한 측면이 있다는 점과, 전형적인 염분포말 유입규모로 비교한 수치가 신두리가 아닌 다른 지역의 추정치라는 점을 감안하면 해석에 주의를 기해야 하나 이와 같은 결과는 신두리에서 비사가 영양수지에서 중요한 위치를 차지하고 있음을 지지하는 결과의 하나라고 해석된다.

참고문헌

- 류호상, 2001, "겨울철 모래이동과 전사구의 지형변화: 신두리 해안사구 지대를 사례로," *地理學論叢* 38, 31-60
- 박동원·유근배, 1979, "우리나라 서해안의 사구지형," *地理學論叢* 6, 1-10.
- 서중철, 2001, "서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물수지", 서울대학교대학원 박사학위논문.
- 환경부, 2001a, 우리나라 사구 실태파악과 보전·관리 방안에 대한 연구.
- 환경부, 2001b, 우리나라 해안사구 목록, 우리나라 사구실태파악과 보전·관리 방안에 대한 연구 부록.
- Barbour, M. G., Burk, J. H., Pitts, W. D., Gilliam, F. S. & Schwartz, M. W., 1999, *Terrestrial Plant Ecology* (3rd ed.), Addison Wesley Longman, Inc.
- Carter, R. W. G., 1988, *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*, Academic Press, London & San Diego.
- Clayton, J. L., 1972, Salt spray and mineral cycling in two California coastal ecosystems, *Ecology* 53, 74-81.
- Donahue, R. L., Miller, R. W. & Shickluna, J. C., 1983, *Soils: an introduction to soils and plant growth*, Prentice-Hall.
- Fay, P. J. & Jeffrey, D. W., 1992, The foreshore as a nitrogen source for marram grass, in Carter, R. W. G., Curtis, T. G. F. & Sheehy-Skeffington, M. J. (eds), *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*, Balkema, Rotterdam & Brookfield, 177-188.
- Koerselman, W., 1992, The nature of nutrient limitation in Dutch dune slacks, in Carter, R. W. G., Curtis, T. G. F. & Sheehy-Skeffington, M. J. (eds), *Coastal Dunes: Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*, Balkema, Rotterdam & Brookfield, 189-199.
- Leatherman, S. P., 1978, A new aeolian sand trap

- design, *Sedimentology* 25, 303-306.
- McLachlan, A., Kerley, G. & Rickard, C., 1996, Ecology and energetics of slacks in the Alexandria coastal dunefield, *Landscape and Urban Planning* 34(3-4), 267-276.
- Psuty, N. P. & Ofiara, D. D., 2002, *Coastal Hazard Management: Lessons and Future Directions from New Jersey*, Rutgers University Press, New Brunswick.
- Rosen, P. S., 1978, An efficient, low cost, aeolian sampling system, *Current Research Part A: Geol. Surv. Canada* 78-1A, 531-532.
- Simard, R. R., 1993, Ammonium Acetate-Extractable Elements, in Carter, Martin R(eds), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Lewis, 39-42.
- van der Valk, 1974, Mineral cycling in coastal foredune plant communities in Cape Hatteras, National Seashore, *Ecology* 55, 1349-1358.
- Whipkey, C. E., Capo, R. C., Chadwick, O. A. & 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(1-2), 37-48.