

신두리 해안사구지대의 영양유입에 관한 연구

서울대학교 사회과학대학 지리학과

1. 서론

1.1. 연구 배경과 연구 목적

해안사구(海岸砂丘, coastal dune)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 해변 침식을 완충하는 모래 저장고이다. 또한 해안사구는 사질로 구성되어 있어 지하수 함량이 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 사회·경제·생태적인 가치가 높은 자연자원(natural resources)이라고 할 수 있다(Carter, 1988).

최근 해안사구 개발의 문제가 사회적인 문제로 대두됨에 따라 사구에 대한 일반의 인식이 제고되고 있다. 사구의 훼손이 해변 침식을 가속화시키고 지하수의 염수 침입을 유발하여 지역 주민의 삶을 저하시킬 수 있다는 사실이 일반인에게도 알려지기 시작했고 정부도 이에 대한 대책을 수립하기 시작했다. 그러나, 아직은 해안사구에 대한 연구가 그리 활발하게 이루어지지 않고 있어 효과적인 관리를 위한 기초 자료가 매우 부족한 실정이다.¹

¹ 안면도 해안도로 건설에 의한 해안사구 파괴로 학계의 이의 제기과 KBS 등의 언론 기관의 보도, 국정 감사 환경노동 상임 위원회에서의 질의 등이 이어지고 사회적 이슈로 대두되자 환경부는 2000년 11월 28일 “사구보전 추진계획”을 수립하여 전국 각 시도에 사구의 훼손방지대책을 지시하였다. 또한 2001년 12월, 국내 존재하는 해안사구의 위치와 규모를 정리한 “우리나라 사구 실태 파악과 보전·관리 방안에 대한 연구” 보고서를 발간했다. 그러나, 아직 사구에 대한 연구는 전반적으로 미흡하며 적절한 관리 계획을 수립하기에는 기초자료나 정보가 충

해안사구의 효율적 관리를 위해서는 해안사구의 발달과 성장, 안정화에 매우 중요한 역할을 하는 식물 생태계를 이해해야 한다. 기존의 연구를 검토해 보면 해안사구의 식물 생태계에 대한 연구는 식물종의 분포나 적응 양상에 초점을 맞추고 있거나 식생이 사구의 퇴적과 안정화에서 담당하고 있는 역할을 규명하는 연구가 대부분이다 (Avis, *et al.*, 1996; Kutiel *et al.*, 1999; van der Meulen *et al.*, 1996). 그러나, 이에 비하여 해안사구로 유입되는 영양에 대한 연구는 그다지 활발하게 이루어지지 않고 있다. 해안사구로 유입되는 영양에 대한 연구는 식물 생태계 내의 식생 분포와 밀도 등을 이해하는 데 중요한 정보를 제공할 수 있으므로 사구의 식물 생태계를 이해하려면 사구지대로 유입되는 영양에 대한 연구가 이루어져야 한다.

해안 지역에서 이루어진 영양 유입 혹은 영양 수지를 다룬 기존 연구들은 연안 오염과 관련하여 연안 생태계의 유출입을 살핀 연구((Stapleton *et al.*, 1999), 대기 부유 물질이나 강수, 지하수에 의해 영양공급이 일어나는 과정을 추적한 연구(Simmons *et al.*, 1994; Mats *et al.*, 1996), 대기 중으로 비산된 염수 포말에 의해 영양 공급이 일어나는 과정을 추적한 연구(Whipkey *et al.*, 2000; von Salzen *et al.*, 1999) 등이 있다. 기존의 연구들은 대개 영양수지를 연구하는 지역적 단위가 연안 수역이거나 해안 일반이며 영양의 유출입 통로로서 하천수, 강수, 지하수, 해수, 미립질 대기부유물질 등이 다루어진다. 해안사구의 경우, 위와 같은 유출입 통로 이외에 비사(飛砂, blown sand)가 해안사구로 유입되는 영양의 주요 통로 구실을 할 수 있다. 해변으로부터 사구로 유입되는 비사 표면에는 다양한 양이온이 흡착되어 있어 비사와 함께 유입된다. 비사는 다른 유출입 통로들에 비해 상대적으로 많은 양이 유입되므로, 해안사구의 영양유입을 연구하고자 한다면 비사를 통해 유입되는 영양에 주목할 필요가 있다. 그러나, 아직 해안사구 지대를 대상으로 비사를 통한 영양유입에 대한 연구는 이루어진 바가 없었다.

분하지 않은 실정이다.

이 연구는 비사가 해안사구 지대의 영양공급 통로 역할을 하는 데 주목하여 비사를 통해 사구지대로 공급되는 주요 양이온의 규모와 패턴을 분석하고자 하는 것이다. 2000년 12월 부터 2002년 2월까지 신두리 해안사구지대에서 주기적으로 포집된 비사 시료를 대상으로 ICP-AES 분석법을 이용하여 비사와 동반 유입된 이온 중 식물의 생장에 중요한 역할을 하는 Na, Mg, Ca, K, Sr의 양과 영양유입의 시공간적 패턴을 분석하였다.

1.2. 연구 지역

연구지역인 신두리 해안사구 지대는 서해안 태안 반도의 북서부에 위치한다. 수리적인 범 위는 북위 36°49'~36°52', 동경 126°11'~126°13' 이며 행정구역 상으로는 충청남도 태안 군 원북면 신두리에 속한다. 신두리 해안사구 지대는 의항리와 황촌리 사이로 만입된 지역 에 위치하며, 내륙 쪽은 대략 배후 산지로 경계 지워진다. 해안사구 지대의 범위는 해안을 따라 약 4km에 달하며, 폭은 0.5~2km에 달한다(그림 1).

신두리 해안사구의 중앙부에 있는 수로를 경계로 남쪽 지역은 해수욕장과 군 훈련지 등으 로 사용되고 있다. 특히 해수욕장 지역은 전사구 전면 일부에 해안 옹벽이 설치되어 있으며 콘크리트 건물이 위치하고 있어 사구 경관의 인위적인 변형이 심하다. 반면에 수로를 경계 로 북쪽 지역은 상대적으로 원형에 가까운 상태로 보전되어 있으며, 현재 문화재청에 의해 천연 기념물로 지정되어 있어 인위적인 변형이 제한된 상태이다.² 이 연구는 자연상태의 해 안사구 지대로 비사를 통해 유입되는 영양의 양을 분석하고자 하는 것이므로, 수로 북쪽의 천연 기념물 지정지역을 연구지역으로 삼았다.

². 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.

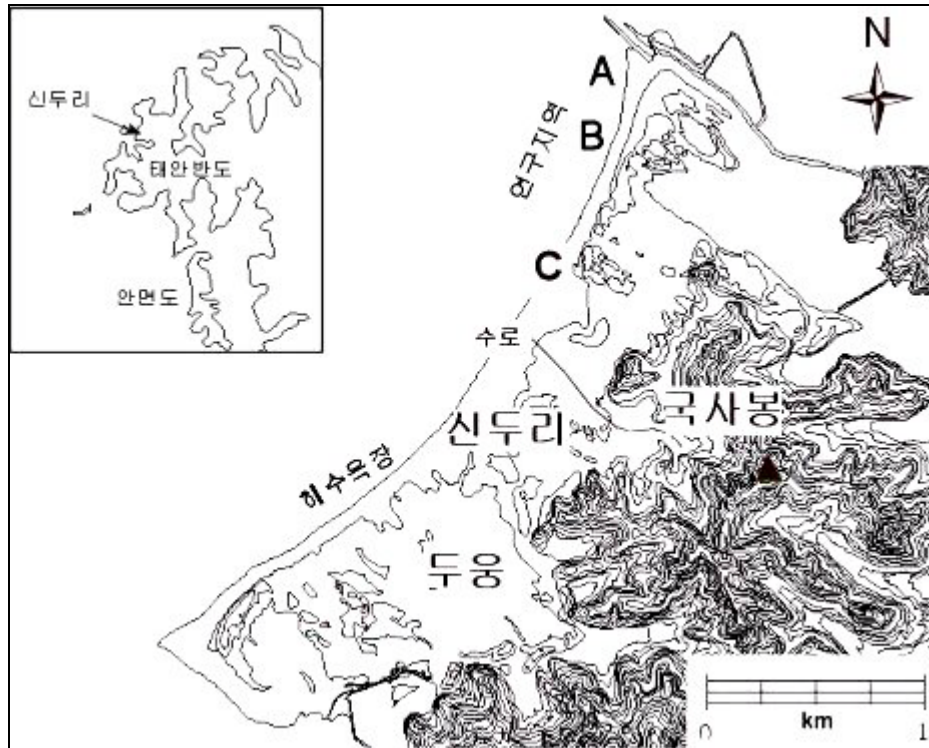


그림 1. 연구 지역도

연구지역은 해빈대비 고도³, 사구열의 방향, 경사, 형태적 특징, 식피 밀도 등을 바탕으로 크게 A, B, C 세 지역으로 구분된다(류호상, 2001). 그 중 사구지대 북부(이하 A) 지역과 사구지대 중부(이하 C) 지역은 해빈대비 고도가 2~3.5m 정도이며 해빈에서 유입된 비사가 사구 정상을 넘어 내륙까지 이동하는 패턴이 관찰되었다. 연구 기간 중 B 지역에서도 비사 포집이 이루어졌으나, 이 연구에서 주된 분석 대상으로 삼은 비사 자료는 A, C 두 지역에서 포집된 자료가 중심을 이룬다.⁴ (그림 2)

³ 해빈대비 고도란 보통 식생으로 경계 지워지는 사구와 해빈의 경계부의 고도를 기준으로 보고 측정된 상대고도를 의미한다.

⁴ 서종철(2001)은 1년동안 A 지역은 평균 46.7 m³/m, C 지역은 8.8m³/m의 모래가 유입되었다고 보고하였다. 그러나, 서종철은 이 값이 침식된 설치 간격 및 측선 간격 등으로 인한 과대 추정치일 수 있음을 지적하고 보다 정밀한 연구가 필요하다고 하였다. 류호상(2001)의 연구 결과에 따르면 2000년 12월 ~ 2001년 3월동안 A 지역은 2.26m³/m, C 지역은 2.48m³/m의 모래가 유입된 것으로 나타났다. 이 값은 서종철의 보고와 비교할 때 매우 적은 양이나 측선의 간격과 침식된 설치 간격이 서종철의 경우에 비해 세밀했던 점을 미루어 볼 때 연간변이에 의한 것으로 보기보다는 과대추정의 정도가 개선된 것으로 보는 것이 더 적당하다고 본다. 관측 결과에 대한 해석이 어떠한가에 A, C 지역은 겨울동안 비사의 유입이 활발하게 일어나는 지역이라고 할 수 있다.

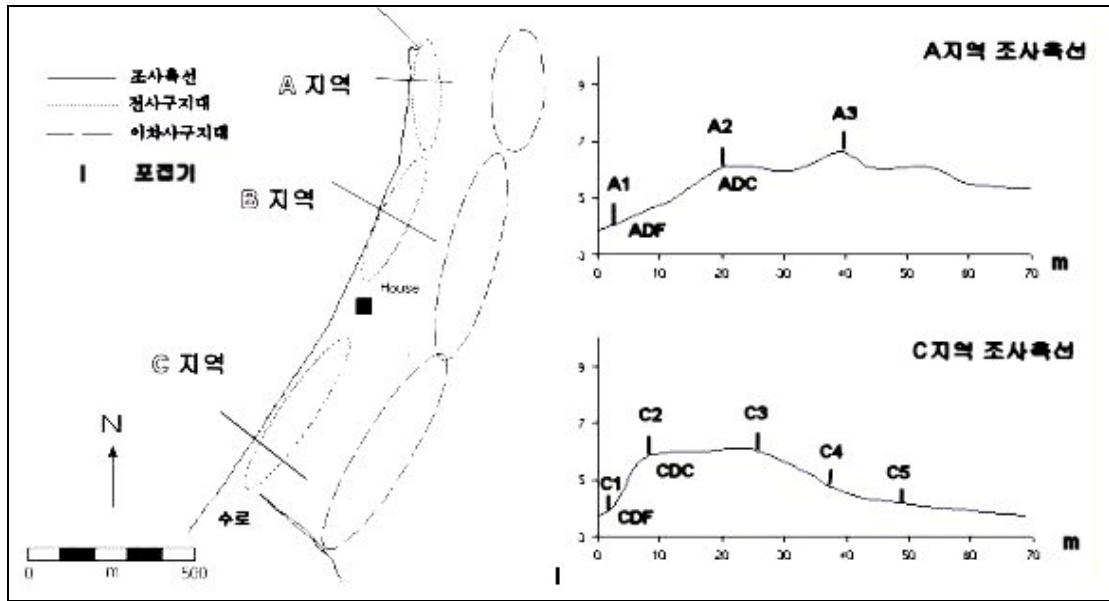


그림 2. 비사 포집 구역과 포집기의 설치

신두리 해안사구 지대에서는 주로 11월말부터 4월초에 이르는 기간동안 바람에 의한 모래이동이 활발하게 일어난다(박동원·유근배, 1979;서종철, 2001, 그림 3). 이 기간은 북서계절풍이 지속적으로 불고, 사구식생을 구성하는 초본식물이 대부분 죽기 때문에 식생에 의한 모래이동의 제한이 효과적으로 일어나지 못한다. 그러나, 그 이외 기간동안은 불규칙한 풍향과 식생의 활발한 성장으로 인하여 바람에 의한 모래이동이 제한된다. 신두리 해안사구의 비사 유입은 주로 겨울철과 이른 봄에 걸쳐 활발하게 일어나므로 비사를 통한 영양유입도 주로 이 기간동안 일어난다고 할 수 있다.

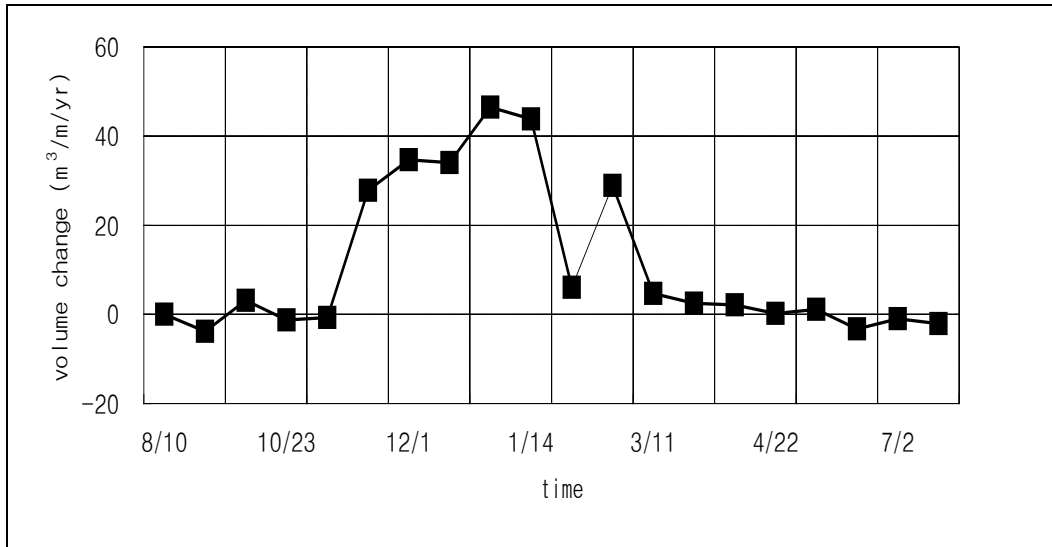


그림 3. 신두리 해안사구 지대의 계절에 따른 비사 이동 패턴 : 전사구⁵

1.3. 연구 방법

1.3.1. 비사 자료의 획득

비사 포집에 사용된 포집기는 Leaderman(1978)과 Rosen(1978)이 제안한 수직 원통형 포집기를 변형한 것이다(그림 4). Leaderman-Rosen 형 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 시공간적 패턴을 상세히 살펴보기 위하여 기존의 위치(해빈-사구 경계부, 사구 정상부) 외에 사구 후면부와 이차 사구에도 포집기를 추가로 설치하였다. 또한 A, C 지역 외에 B 지역의 해빈-사구 경계부와 사구 정상부에 포집기를 설치하였다 (그림 2).

⁵ 서종철(2001)이 논문에서 보고한 결과를 바탕으로 재구성한 것이다.

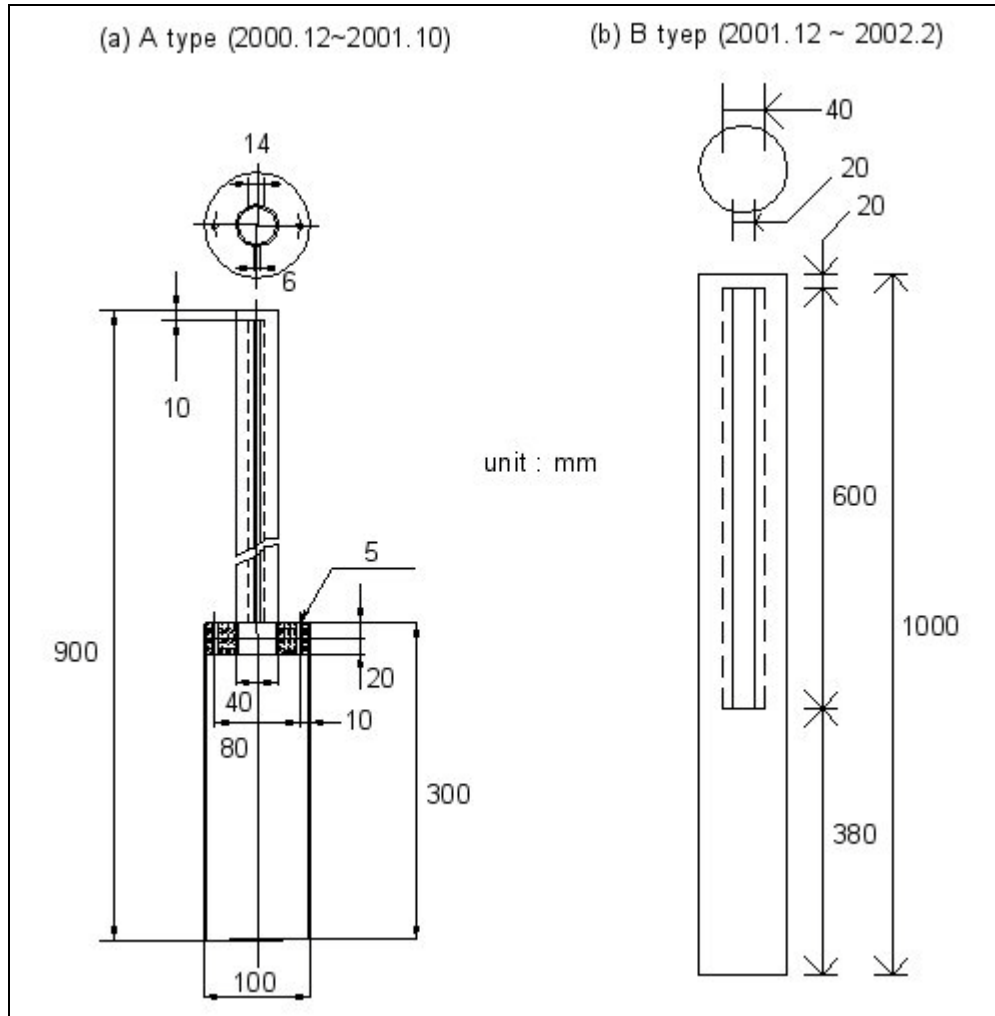


그림 4. 연구에 사용된 Leaderman-Rosen 수직 원통형 포집기

이 연구를 위한 비사 자료는 2000년 12월 ~ 2002년 2월까지 포집되었다 (표 1). 2000년 12월 ~ 2001년 3월의 기간 동안은 대략 1주 간격으로 A 구역과 C 구역의 해빈-사구 경계 부(Dune foot, 이하 DF)와 사구 정상부(Dune crest, 이하 DC)에서 비사를 포집하였다. 2001년 4월 ~ 10월의 기간 동안은 식생의 활발한 생장으로 인해 바람에 의한 모래이동이 제한되어 A구역의 DF에서만 비사가 포집되었다. 또한 8-10월의 경우는 식생 피복이 A구역의 DF까지 영향을 미쳐 비사의 포집이 이루어지지 않았다. 11월은 현장에 설치한 포집기의 파손으로 인해 비사 포집이 이루어지지 않았다. 2001년 12월 13일 포집기를 재설치한 이후로는 2002년 2월까지 1~3주 간격으로 A, B, C 구역과 이차사구 구역에서 비사를 포집

하였다. 포집 위치의 연속성은 <표 2>로 정리한 바와 같다.

표 1. 모니터링 기간과 분석에 사용한 비사 시료

일시	포집기간	A 지역		B 지역		C 지역	
		DF	DC	DF	DC	DF	DC
12/15, 2000	6	○	○	-	-	○	○
12/29	7	○	○	-	-	○	○
01/05, 2001	7	○	○	-	-	○	○
02/01	12	○	○	-	-	○	○
02/17	8	○	○	-	-	○	○
03/02	7	○	○	-	-	○	○
03/09	7	○	○	-	-	○	○
03/30	7	○	○	-	-	○	○
04/26	27	○	-	-	-	-	-
06/05	40	○	-	-	-	-	-
07/11	36	○	-	-	-	-	-
12/22	9	○	○	○	○	○	○
01/05, 2002	14	○	○	○	○	○	○
01/11	6	○	○	○	○	○	○
01/25	14	○	○	○	○	○	○
02/14	20	○	○	○	○	○	○

표 2. 비사 포집 위치의 구분

위치		2000.12 ~ 2001.11	2001.11 ~ 2002. 2
A	해빈-사구 경계부	ADF	A1
	사구 정상부	ADC	A2, A4*
	전사구 후면		A3
B	해빈-사구 경계부		B1
	사구 정상부		B2
C	해빈-사구 경계부	CDF	C1
	사구 정상부	CDC	C2
	전사구 후면		C3,C4,C5
	이차사구		SC1, SC2, SC3

1.3.2. 비사 자료의 분석

토양 내 알칼리 금속이나 알칼리토 금속의 존재 양태는 대략 4가지로 구분된다. 이는 물에 용해될 수 있는 형태, 빠르게 치환될 수 있는 형태, 느리게 치환되는 형태, 토양 입자 자체의 구성물 등이다. 비사의 표면에 흡착되어 동반 이동하는 이온의 형태는 물에 용해될 수 있는 형태이거나 빠르게 치환될 수 있는 형태라고 할 수 있다. 이 두 가지는 식물에게 직접 공급될 수 있는 영양 형태이기도 하다.

비사와 동반 이동하는 주요 양이온을 분석하기 위해 암모늄 아세테이트(NH_4OAc)을 이용하였다. 암모늄 아세테이트 추출법은 물에 용해될 수 있는 형태이거나 빠르게 치환될 수 있는 형태로 토양 내에 존재하는 알칼리 혹은 알칼리토 금속의 함량을 측정하는데 널리 사용되는 방법이다 (Simard, 1993) 암모늄 아세테이트 추출법은 중성의 1M 암모늄 아세테이트 용액을 이용하여 비사 표면에 흡착되어 있는 양이온을 NH_4^+ 이온으로 치환, 추출하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 비사와 함께 유입되는 K, Mg, Ca, Na, Li, Ba, Sr 의 양을 측정할 수 있다. 이렇게 얻어진 값 중 K, Mg, Ca 의 양은 식물이 이용할 수 있는 K, Ma, Ca 의 양으로 해석 가능하다. 이 연구에서는 식물 생장에 영향을 미치는 양이온 Mg, K, Ca 과 Na, Sr 등을 분석 대상으로 삼았다.

구체적인 분석 절차는 다음과 같다.

-1Φ(2mm)체를 통과한 음건시료 6g에 희석율을 5: 1 (추출액: 시료)로 하여 1M 암모늄 아세테이트 용액($\text{CH}_3\text{COOHNH}_4$) 30ml를 가한다. 시료의 양이 적을 경우 희석율 10: 1을 적용시키기도 하였다. 30분간 동안 진탕한 후 여과지(Whatmann No.44)로 추출액을 여과한다. 발광분광계(Shimadzu ICP Q-1000)를 이용하여 추출액으로부터 치환성 양이온(Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+)의 농도를 측정한다.⁶ 추출액으로부터 얻어진 ppm 단위의 농도를 유입비사 1kg당

⁶ ICP-AES (inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry)란 원자 방출 분광법(Atomic Emission Spectrometry, AES)은 중성원자에 열에너지를 가해 최외각 전자를 들뜨게 하고, 이로부터 방출되는 복사선을 분광시켜 화학분석에 이용하는 방법이다. 스펙트럼 선들의 위치로부터 정성분석을 하고 스펙트럼 선들의 세기로

동반 유입되는 양(mg)으로 바꾸기 위해서 다음과 같이 계산한다.

$$Q_{cation} = D \cdot C$$

Q_{cation} 유입비사 1kg 당 동반 유입되는 양이온의 양 (mg/kg)

D 회석율. $5 ml/g = 5 l/kg$ 혹은 $10 ml/g = 10 l/kg$

C 양이온 농도 $ppm = mg/l$

Q_{cation} 을 ‘동반 유입율’ 이라고 정의하고, 분석 대상으로 삼은 각각의 양이온에 대해 동반 유입율을 계산하였다. 이렇게 얻어진 동반 유입율로부터 비사에 동반 유입되는 영양의 유입 규모와 시공간적 유입 패턴을 분석 정리하였다.

부터 정량분석을 한다. 유도 결합 플라즈마 분광법은 라디오 주파수의 전류가 흐르는 코일에 의해 유도된 전자장이 결합된 플라즈마를 광원으로 사용하는 원자 방출 분광법의 하나이다.

2. 본 론

2.1 주요 영양소 간의 상관 관계

비사를 통해 해빈에서 유입된 주요 영양소 간의 상관 관계를 살펴보기 위하여 인자 분석을 행하였다. Na, Mg, Ca, K, Sr 등 5개 양이온의 동반 유입율을 설명할 수 있는 두 개의 인자를 상정하고 각각의 양이온이 두 개의 인자에 의해 어떻게 설명될 수 있는지를 살펴보았다. 분석 대상은 2000년 12월 ~ 2001년 7월의 ADF, CDF 자료⁷와 2001년 12월 ~ 2002년 2월의 A1, B1, C1 자료로 해빈에서 사구지대로 유입된 비사이다. 총 33개의 자료 중 2000년 12월 ~ 2001년 7월 자료가 19개, 2001년 12월 ~ 2002년 2월 자료가 14개이다.

총 5개 변수(Na, Mg, Ca, K, Sr)에 대하여 상정할 수 있는 최대 인자수는 2개이다.⁸ 각각의 인자를 F1, F2 로 두고 인자 분석을 행한 결과는 다음과 같다 (표 3). 이에 따르면 인자 F1, F2에 의해 총분산의 75 퍼센트가 설명될 수 있음을 알 수 있다. 양이온의 유입율이 인자 F1, F2 에 대하여 가지는 적재량(loadings)을 살펴보면 F1는 Na, Mg 를, F2는 Ca, Sr 을 잘 설명하고 있음을 알 수 있다. K의 경우는 F1, F2를 이용한 설명이 잘 들어맞지는 않는다. (그림 5, 그림 6).

인자 분석 결과는 사구지대로 유입되는 5개의 양이온이 Na, Mg와 Ca, Sr, 그리고 K 로 구분될 수 있음을 보여준다. 각 집단의 양이온들은 서로 다른 요인의 지배를 받는 것으로 해석 가능하다. 두 인자 F1, F2는 각 양이온의 주요 공급원과 관련이 있을 것으로 사료된다.

⁷. 2000.12 ~ 2001.11 자료는 8-11월의 포집이 이루어지지 않았으므로 (8-10월은 식생에 의해, 11월은 포집기의 파손으로 인해 포집이 이루어지지 않았다) 사실상 2000.12 ~ 2001. 7 자료와 동일하다.

⁸. 인자 분석이 성립되려면 자유도 s 가 0보다 커야 한다. 자유도 s 는 다음과 같이 정의된다.

$$s = \frac{1}{2}(p-k)^2 - \frac{1}{2}(p+k) \quad (\text{단, } p \text{는 변수의 수, } k \text{는 인자의 수})$$

따라서, $p=5$ 일 때, $s>0$ 이려면, $k=1$ or 2 이어야 한다. $p=5$ 일 때는 최대 2개의 인자를 상정할 수 있다.

표 3. 인자 (F1, F2)의 설명력

	F1	F2
제공합 적재량	2.03	1.73
Proportion Va.	0.41	0.35
Cumulative Va.	0.41	0.75

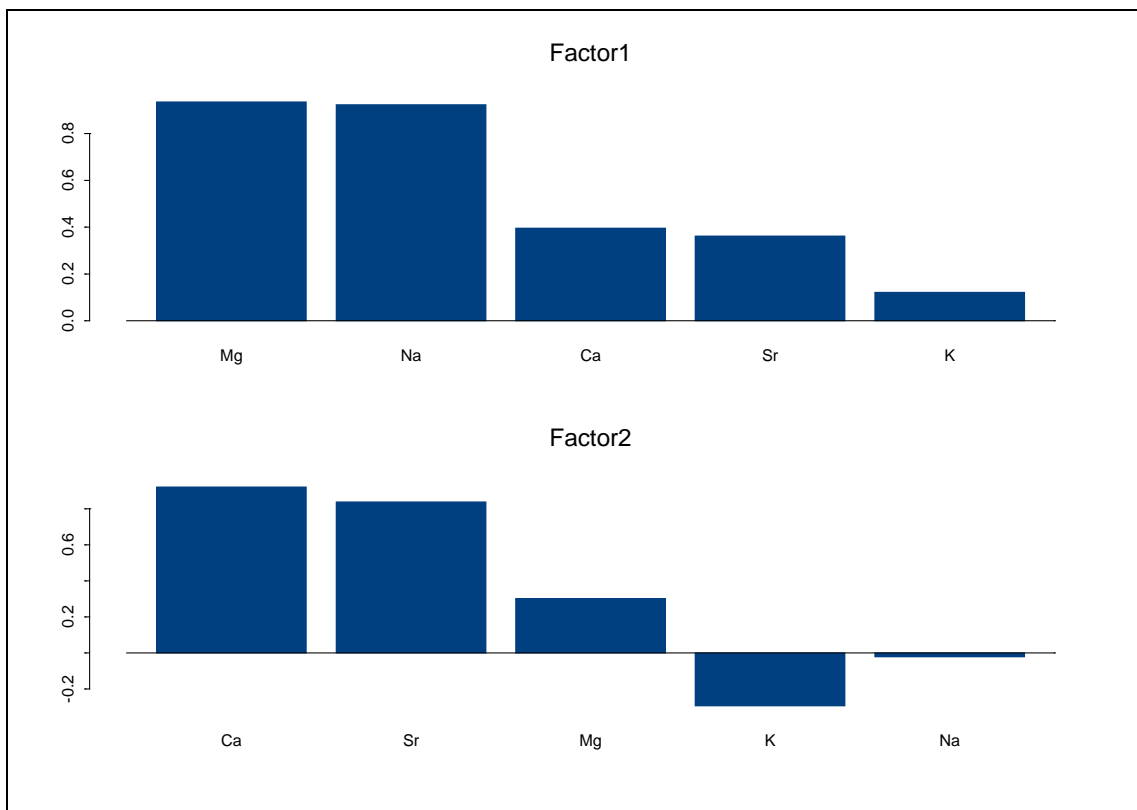


그림 5. 주요 양이온 Na, Mg, K, Ca, Sr 의 인자 부하량

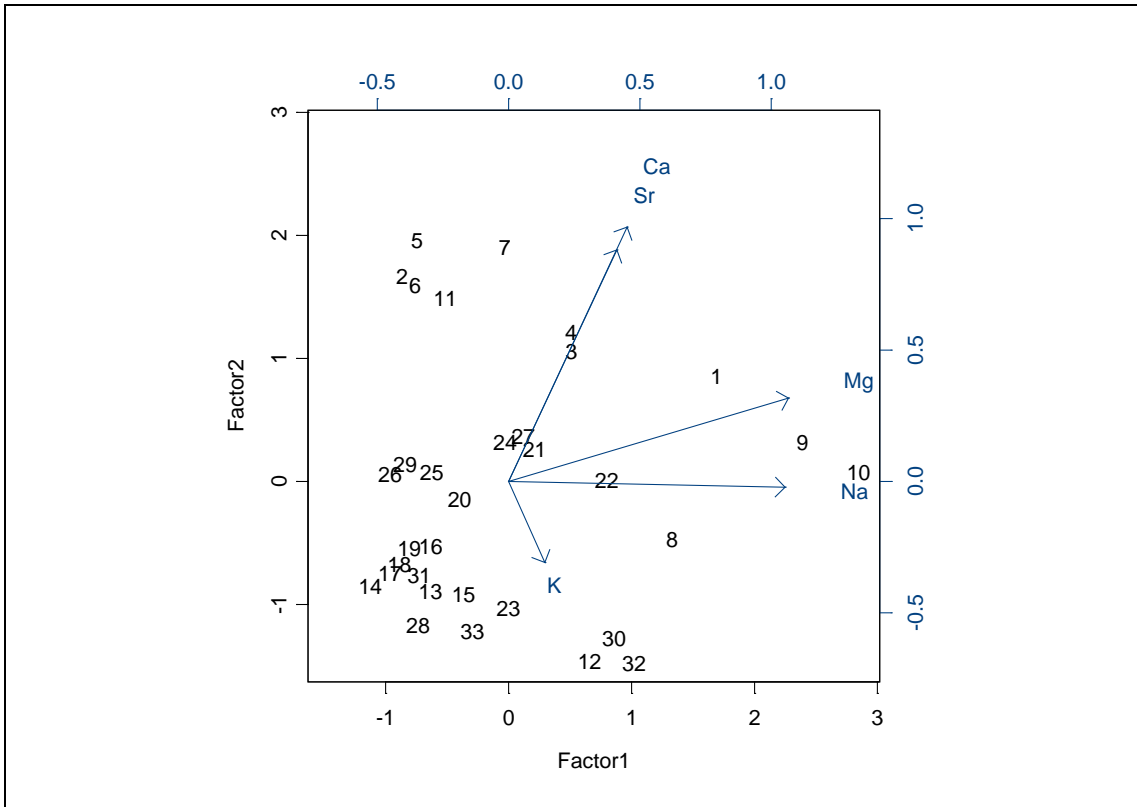


그림 6. 주요 양이온 Na, Mg, K, Ca, Sr 에 대한 Biplot

2.2. 영양소의 유입 규모

앞서 분석한 동일한 자료에 대하여 각각의 양이온의 유입 규모를 분석하였다. 평균과 표준 편차를 이용하여 자료의 대표값과 산포도를 조사하였다. 또한 2000년 12월 ~ 2001년 7월의 자료와 2001년 12월과 2002년 2월의 자료를 구분한 뒤 연간 변이를 비교하였다. 주요 양이온 Na, Mg, Ca, K, Sr 의 유입규모는 <표 4>와 같다.

표 4. 주요 양이온 Na, Mg, Ca, K, Sr 의 유입 규모 (단위: mg/kg)

	Na	Mg	K	Ca	Sr
전체 기간	335.30±230.52	119.70±29.71	118.10±24.56	858.20±613.77	4.271±2.056

주요 양이온 중 유입 규모가 가장 큰 것은 Ca 로 연구 기간동안 평균 858.20 mg/kg 의 동반 유입율을 보였다. Na 가 335.30 mg/kg 으로 그 다음을 차지하였다. Mg, K 이 각각 119.70 mg/kg , 118.10 mg/kg 으로 유사한 동반 유입율을 보였으며, Sr 이 4.271 mg/kg 로 가장 작은 값을 보였다. 표준편차/평균(변이계수)를 살펴 볼 때, Na, Ca, Sr 등은 비교적 큰 값을 가지는 반면에 Mg, K 는 작은 값을 가진다. 다시 말해 Na, Ca, Sr 등은 평균에 비해 산포도가 크게 나타나나, Mg, K는 평균에 비해 산포도가 작게 나타난다.

비사 포집기를 A기와 B기로 나누어 연간 변이를 분석해 보았다. A기는 2000. 12 ~ 2001. 11 의 포집 기간을, B기는 2001. 12 ~ 2002. 2 의 포집 기간을 지칭하는 것이다. 상자 그림을 이용하여 두 기간을 비교하였다 (그림 7). 일반적으로 A기의 동반 유입율의 산포가 B 기보다는 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 특히 Ca, Sr 의 경우에 매우 현저하게 나타난다. 중앙값을 비교하면 Na, K 는 B기의 값이, Mg, Ca, Sr 의 값은 A기의 값이 더 큰 값을 보인다. 그러나, 전체적인 분포를 고려해 볼 때, K 를 제외하고는 A 기의 값이 B 값보다 크게 나타난다고 간주할 수 있다. K는 A기보다 B기의 유입율이 더 큰 것으로 나타난다. 현저한 패턴이 관찰되지는 않지만, 위의 점을 고려할 때 연간 변이의 패턴은 Na, Mg / K / Ca, Sr 로 분류할 수 있는 것으로 보인다. 이것은 인자 분석을 통해 얻어진 분류군과 일치한다.

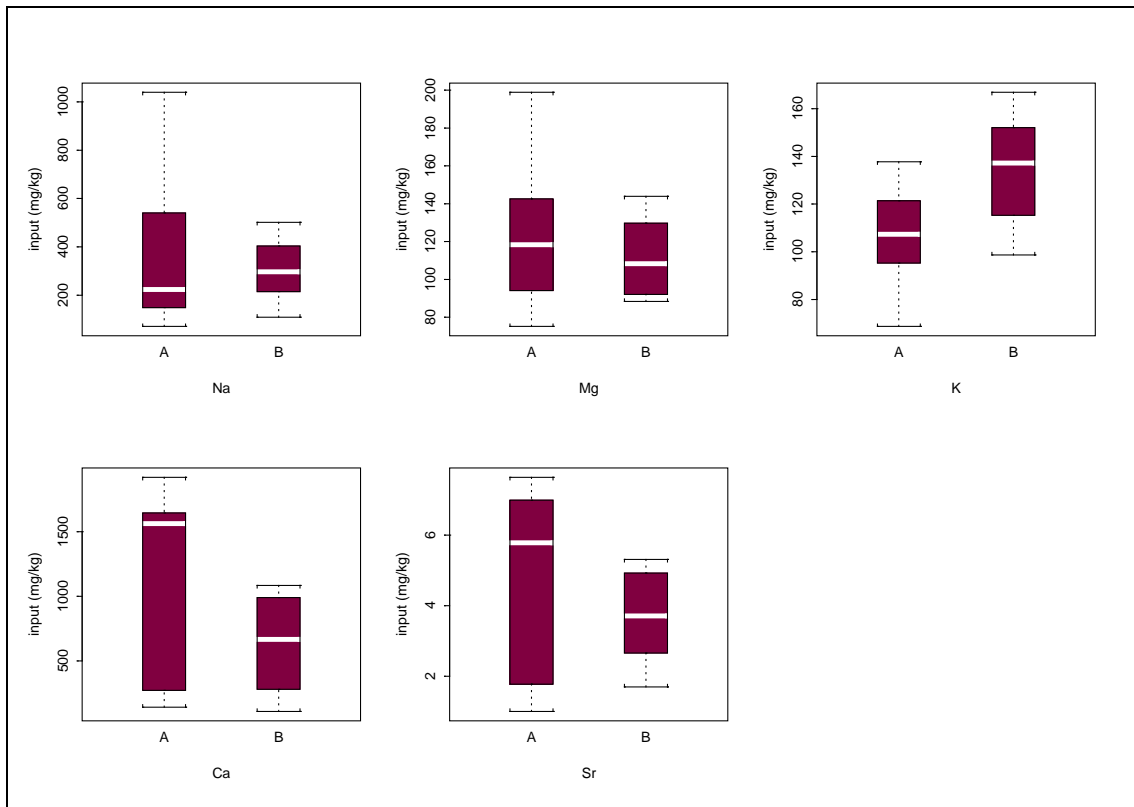


그림 7. 주요 양이온 동반 유입율의 연간 변이

2.3. 유입 규모의 시공간적 특성

앞 절에서는 전사구 지대에 유입되는 주요 양이온의 동반 유입율의 규모와 유입 패턴을 조사하였다. 전사구 지대에 유입된 주요 양이온은 계속 진행되는 모래 이동 과정을 통해 내륙으로 이동되게 된다. 따라서, 전사구에 유입된 주요 양이온의 규모 이외에 전사구 지대 내에서 일어나는 영양 이동의 패턴을 함께 분석할 필요가 있다. 이를 위해 비사에 동반하여 유입된 Na, Mg, K, Ca, Sr의 유입규모가 지형적 요인에 의해 어떤 변이를 보이는지 조사하였다. 분석 자료는 2000년 12월 ~ 2001년 7월의 ADF, ADC, CDF, CDC 자료(35개)와 2001년 12월부터 2002년 2월의 A1, A2, A3, A4, B1, B2, C1, C2 자료(40개)이다 (그림 2, 표 2 참조). 첫째, 해빈-사구 경계부(DF)와 사구 정상부(DC) 간의 변이를 살펴보고, 둘째,

사구지대 내의 위치(A, B, C)에 따른 변이를 살펴보았다. 마지막으로 전사구와 이차사구 간의 차이를 살펴 보았다.

2.3.1. 해빈-사구 경계부와 사구 정상부

해빈-사구 경계부(DF)와 사구 정상부(DC)의 유입규모는 살펴보면, Na, Mg, K, Ca, Sr 등 모든 영양소에 대해 해빈-사구 경계부에서 포집된 비사에서 얻은 유입율의 중앙값이 사구 정상부에서 포집된 비사에서 얻은 유입율의 중앙값보다 크게 나타났다 (그림 8). 각각의 포집 기간에 대한 유입량을 살펴보면 영양소마다 차이는 있으나 대체로 사구 지대 북단(A)의 경우 해빈-사구 경계부의 유입량이 사구 정상부의 유입량보다 크고, 사구 지대 중부(C)의 경우 그 차이가 현저하지 않은 것으로 나타난다 (그림 9-13). 따라서, 전체 자료의 분석에서 얻어진 경향은 주로 사구지대 북단의 자료에서 기인한 것으로 보인다.

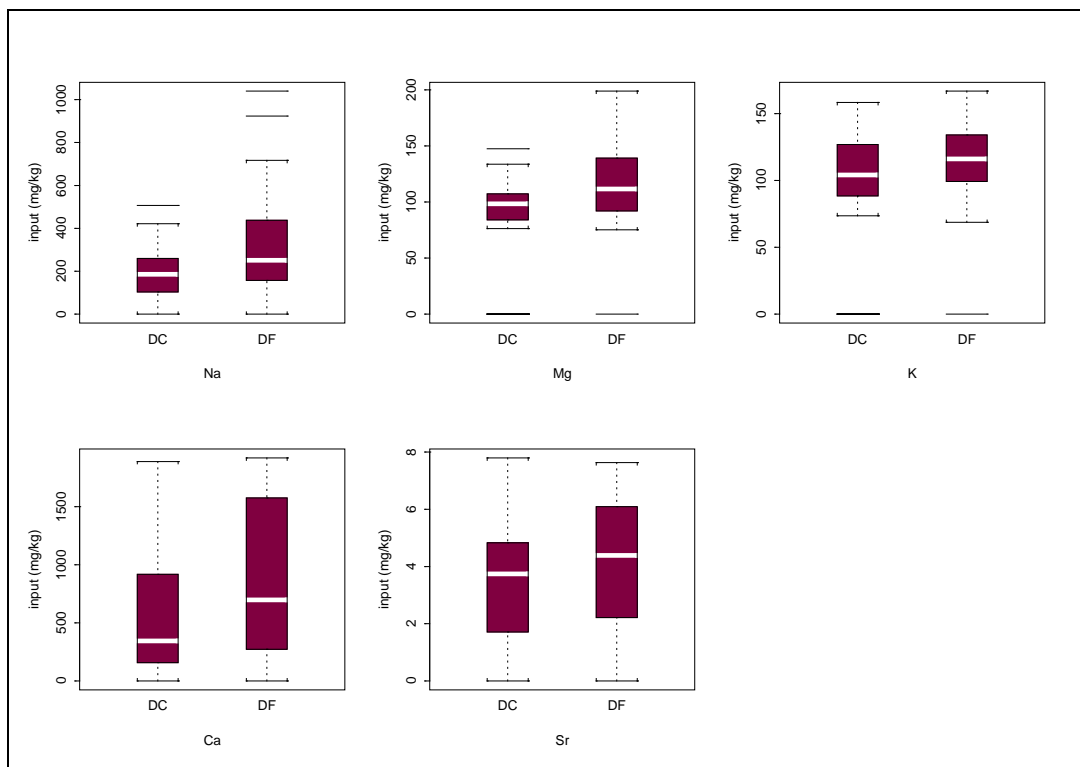


그림 8. 해빈-사구 경계부(DF)와 사구 정상부(DC)의 영양 유입 규모

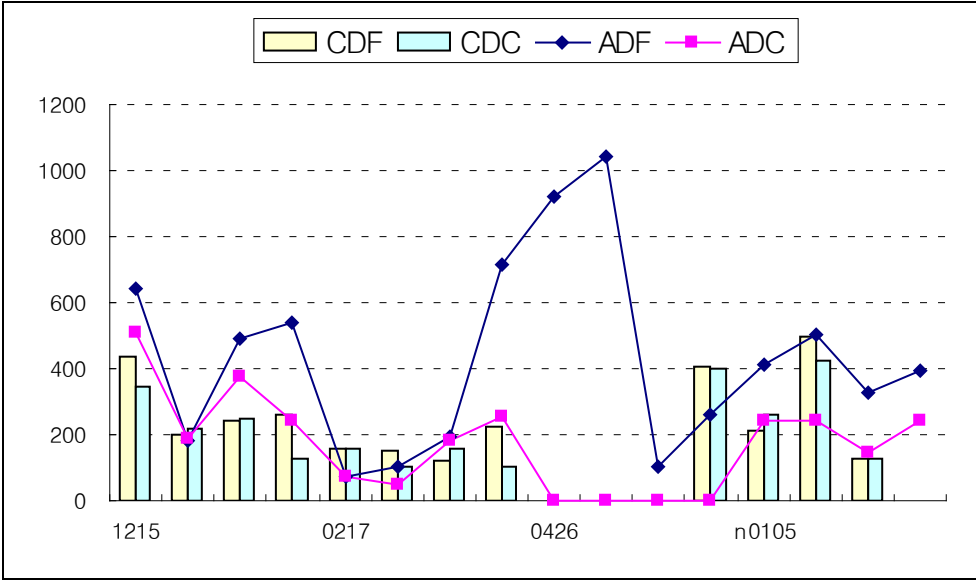


그림 9. Na 유입율의 변화

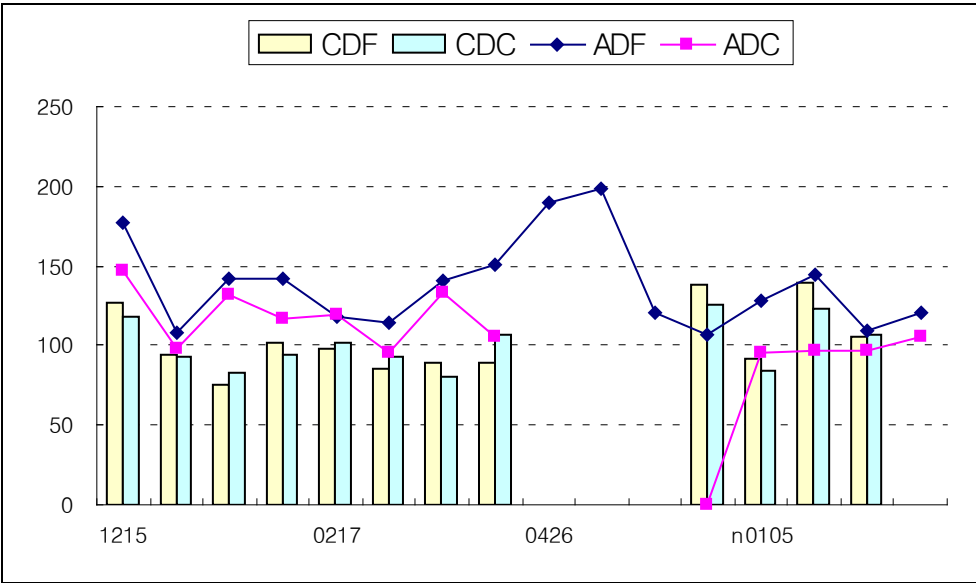


그림 10. Mg 유입율의 변화

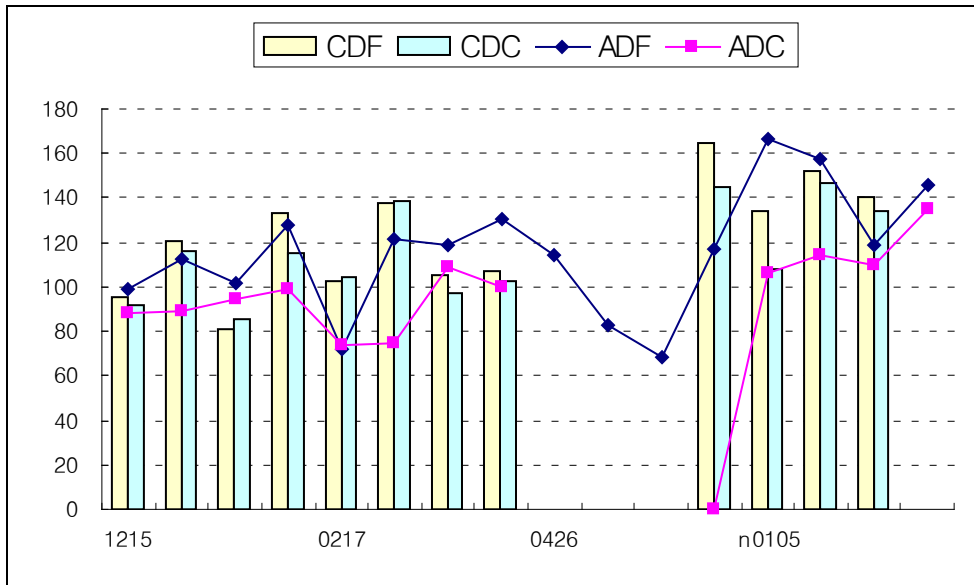


그림 11. K 유입율의 변화

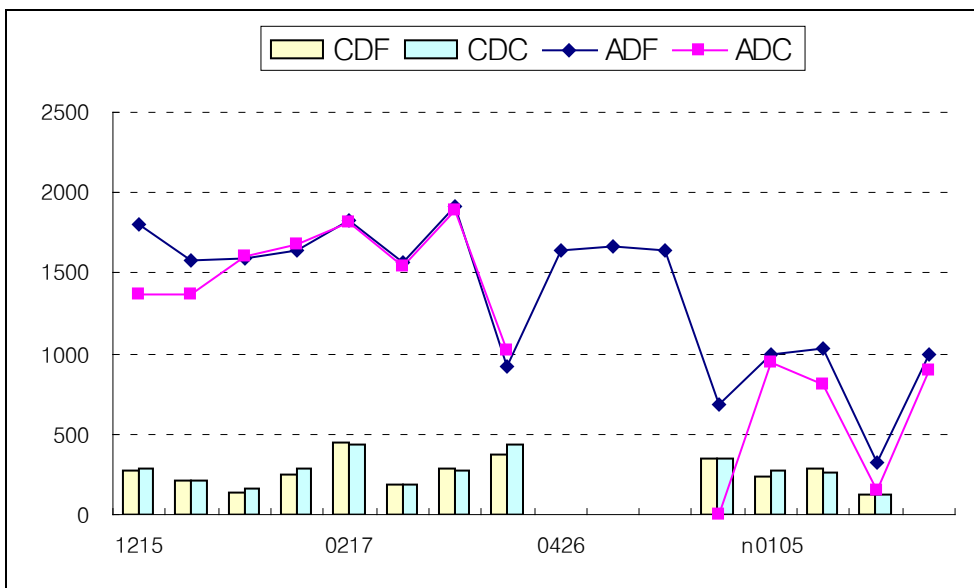


그림 12. Ca 유입율의 변화

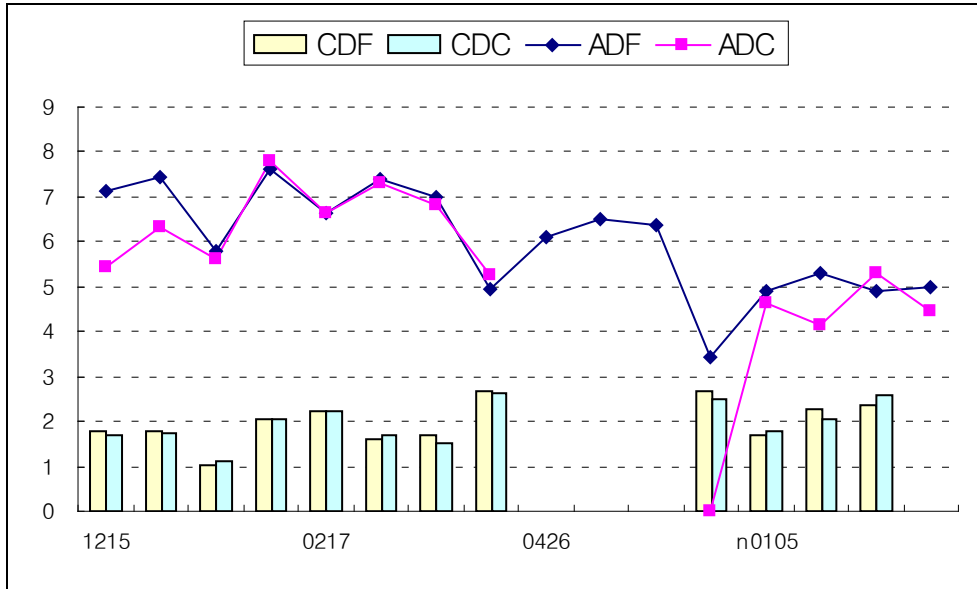


그림 13. Sr 유입율의 변화

2.3.2. 사구지대 내의 위치 : 사구지대 북부(A)와 중부(C)

사구지대 내의 위치에 따른 영양 유입 규모의 비교는 동일한 기간동안 포집이 이루어졌던 사구지대 북부(A 지역)와 북중부(B 지역), 사구지대 중부(C 지역)의 자료를 중심으로 수행되었다(그림 1 참조). 영양소의 유입규모가 A, B, C 지역에서 어떤 차이를 보이는지 조사하였다(그림 10). Na, Mg, K의 경우, 두 지역의 차이가 현저하지 않으나 Ca, Sr의 경우 사구 북단부와 중부의 차이가 뚜렷이 나타난다. 이것은 포집 기간별 유입율의 변화에서도 동일하게 드러나는 경향이다(그림 14). 즉, Na, Mg, K의 유입은 사구지대 전체에 걸쳐 비교적 균일하게 일어나는데 반하여 Ca, Sr의 유입은 사구지대 북단부에 집중되어 일어난다.

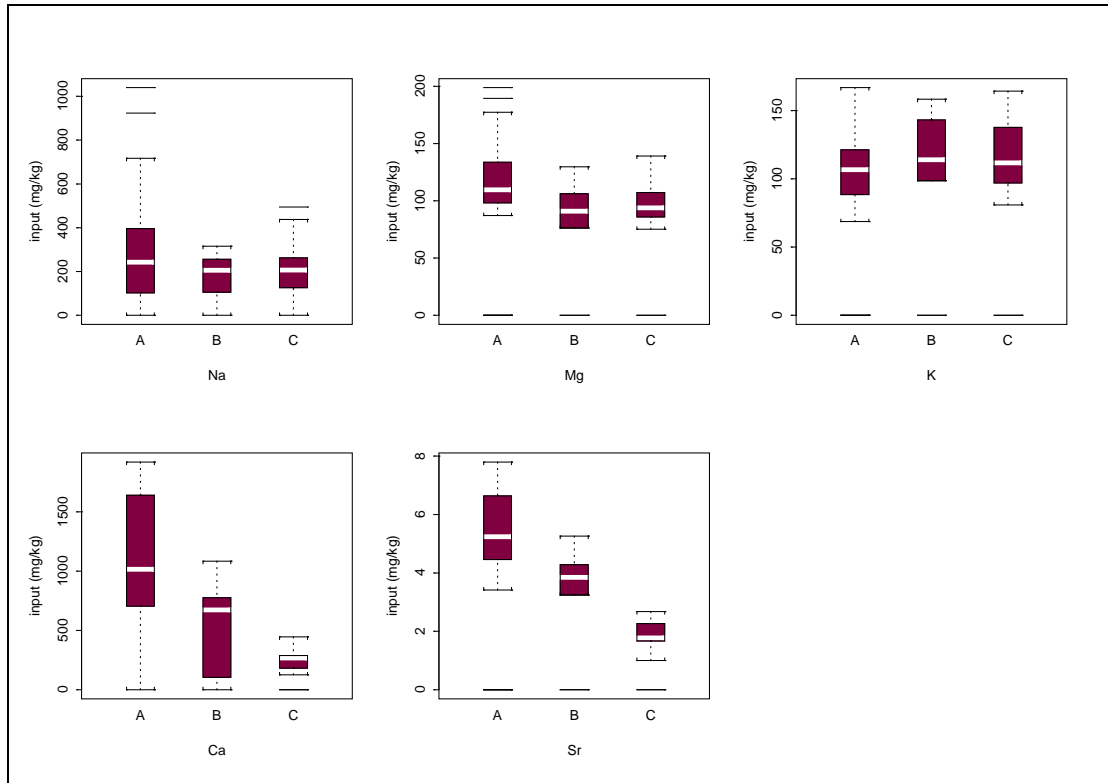


그림 14. 사구 지대의 위치(A, B, C)에 따른 영양유입 규모 비교

2.3.3. 전사구와 이차사구

전사구에서 포집된 비사와 이차사구에서 포집된 비사를 분석하였다. 전사구에서 얻어진 영양소의 양이 이차사구에서 얻어진 영양소의 양보다 크게 나타났다 (그림 15). 다시 말해 내륙으로 들어갈수록 영양소의 규모가 작아지는 경향을 보인다. 이러한 결과는 사구지대로 유입되는 영양이 주로 바다에서 기인함을 반영하는 것이며 비사를 통해 해빈으로부터 공급되는 영양이 사구지대로 유입되는 주요한 영양 공급원임을 드러내는 결과로 사료된다.

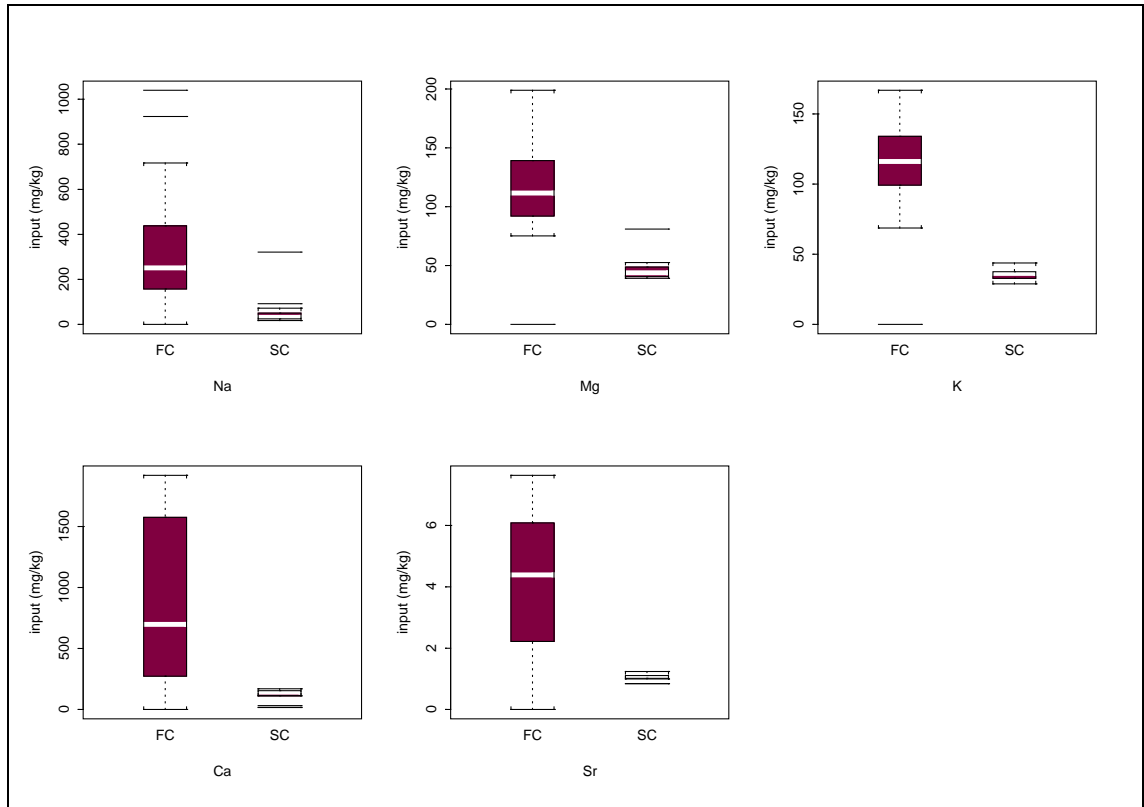


그림 15. 전사구와 이차사구의 영양유입 규모 비교

3. 논 의

3.1. 주요 영양소의 연간 유입 규모 추정

신두리 해안사구 지대의 전사구로 유입되는 비사량에 대해서는 선행연구에서 보고된 바가 있다 (서종철, 2001; 류호상, 2001). 유입 비사량에 대한 기존의 연구 결과와 이 연구의 영양소 유입율을 결합시키면 신두리 해안사구지대로 유입되는 주요 영양소의 연간 유입 규모를 추정해 볼 수 있다. 그러나, 이를 위해서는 몇 가지 가정에 입각한 처리가 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 서종철과 같은 방법을 사용하되 좀더 세밀한 관측망을 이용하여 2000년 12월부터 2001년 3월까지 4개월 간 부피변화를 측정하여 유입 비사량을 측정하였다. 그러므로, 이 두 값을 이용하여 신두리 해안사구 지대로 매년 유입되는 비사량을 추정하기 위해서는 먼저 류호상(2001)의 값을 연간 유입량으로 변환시켜야 한다. 이 문제는 전사구 부피변화 패턴을 이용하여 해결할 수 있다. 서종철(2001)이 조사한 1년 동안의 전사구 부피변화 패턴에 따르면 12월부터 3월까지 4개월동안 일어나는 부피증가량은 전체 부피증가량의 85% 를 차지하는 것으로 나타난다 (그림 3 참조). 전사구 부피변화 패턴이 매 년 큰 변화를 보이지 않는다고 가정하면 류호상(2001)의 관측값에 보정 계수 $1/0.85=1.18$ 을 곱하여 보정값을 얻을 수 있다.

둘째, 해변 1m 당 유입된 비사의 부피로 측정된 비사 유입량을 질량으로 변환시켜 주어야 한다. 영양소의 유입율은 비사 1kg당 동반 유입되는 영양소의 양을 측정한 값이기 때문이다. 이를 위해서는 신두리 해안사구지대 전사구의 용적밀도(bulk density)를 알아야 한다. 신두리 해안사구 지대 전사구의 용적밀도는 측정된 바 없으나, 일반적인 사질 토양이 가지

는 용적밀도 $1.4\sim 1.5\text{ g/cm}^3$ 와 크게 다르지 않을 것이라고 가정해도 무리가 없으리라 생각된다⁹. 이렇게 가정한다면 부피로 측정된 해빈 1m 당 유입된 비사 유입량은 용적밀도를 곱하여 질량값으로 변환시킬 수 있다.

<표 5>는 위에서 언급한 바와 같이 류호상(2001)의 관측값을 연간값으로 보정하는 보정계수를 1.18 로 두고 용적밀도(ρ_b)를 $1.5\text{ g/cm}^3 = 1500\text{kg/m}^3$ 로 두어 비사의 유입량과 이에 따른 주요 영양소의 유입량을 표현한 것이다.

표 5. 주요 영양소 Na, Mg, K, Ca, Sr 의 연간 유입 규모

지역	비사 유입량 ($\times 10^3\text{kg/m/yr}$)			주요 영양소 (kg/m/yr)				
	서 (2001)	류 (2001)	평균	Na	K	Mg	Ca	Sr
A	70	4	37	12.4	4.43	4.37	31.8	0.16
B	12.2	13	12.6	4.22	1.51	1.49	10.8	0.05
C	13.2	4.3	8.8	2.95	1.05	1.04	7.55	0.04
전체	34.8	5.5	20.2	6.77	2.42	2.39	17.3	0.09

일러두기

1. 서종철(2001)의 결과는 연구자 자신의 지적대로 과대 추정되었을 가능성이 있다. 따라서, 위의 결과로부터 비사 유입의 연간 변이가 크다고 해석하는 것은 무리가 있다.
2. <표 4> 를 이용하여 주요 영양소의 유입량을 계산하였다.

3.2. 주요 영양소의 유입 패턴

유입 비사를 분석한 결과 나타난 주요 영양소의 유입 패턴은 크게 네 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 영양 유입율의 상관 관계로부터 주요 영양소가 Na, Mg와 K, Ca, Sr의 세 집단으로 구분된다는 점이다. 둘째는 Na, Mg, K 에 비해 Ca, Sr 의 유입은 국지적 집중 현상이 두드러진다는 점이다. 셋째는 Na, Mg, K 은 전사구로 유입되는 비율과 사구지대 내륙으

⁹. Donahue, R.L., Miller, R.W. and Shickluna, J.C., 1983, *Soils : an introduction to soils and plant growth*. Prentice-Hall, p. 58 의 table 2-4 참조.

로 유출되는 비율이 차이를 보이는 데 반해 Ca, Sr 는 이와 같은 차이가 상대적으로 적게 나타난다는 점이다. 넷째는 유입된 영양소의 대부분이 전사구에 저장된다는 점이다.

이와 같은 주요 영양소의 유입 패턴을 통해 Na, Mg, K 와 Ca, Sr 이 서로 구별되는 집단이라는 사실이 드러난다.¹⁰ 이것은 앞서 분석 결과에서 언급한 바와 같이 각각의 영양소 집단이 서로 다른 기원을 가지고 있음을 시사하는 것으로 볼 수 있다. 본 연구의 범위에서는 그 기원을 명확히 밝혀낼 수는 없으나, 위의 패턴으로부터 몇 가지 사실을 추론해 낼 수는 있다.

이 연구에서 분석 대상으로 삼은 비사는 해빈으로부터 유입된 것이므로, 해수와 비사의 접촉을 통해 주요 영양소가 비사 표면에 흡착된 뒤 유입된 것으로 추정하는 것은 자연스러운 해석이라고 할 수 있다. 그러나, 이러한 해석으로는 Ca, Sr 은 Na, Mg, K 에 비해 사구 지대 북부 지대에 집중적으로 유입되는 패턴을 보인 것을 설명할 수 없다. 이는 Ca, Sr 이 Na, Mg, K 와는 달리 국지적인 기원을 지니고 있음을 강하게 시사하는 것이다. 즉, Na, Mg, K 등은 해수에서 기인한 것으로 추정할 수 있으나, Ca, Sr 은 해수가 아니라 국지적인 공급원에서 공급되는 것으로 보아야 한다.

한편, 해빈-사구 경계부와 사구 정상부의 유입율 차이에서 Na, Mg, K 와 Ca, Sr 이 서로 다른 패턴을 보이는 것은 또다른 실마리를 제공한다. 우선 이 문제를 거론하기에 앞서 해빈-사구 경계부와 사구 정상부의 유입율 차이가 가지는 의미를 이해할 필요가 있다.

해빈-사구 경계부와 사구 정상부의 유입율 차이는 해빈으로부터 비사와 함께 유입된 영양소가 전사구열을 넘어 내륙으로 공급되는 과정을 설명하는 데 중요한 정보라고 할 수 있다. 해빈으로부터 유입된 비사의 대부분은 전사구에 퇴적된다. 전사구를 넘어 사구지대로 유입되는 것은 이 중 일부에 불과하다. 따라서 비사와 함께 유입되는 영양소의 총량이 감소

¹⁰ 유입율에 대한 인자분석 결과는 Na, Mg / K / Ca, Sr 의 세 집단이 서로 구별되는 것으로 나타나지만, 다른 분석 결과와 함께 종합적으로 고찰해 볼 때 Na, Mg, K 와 Ca, Sr 의 두 집단으로 구분하는 것이 가능하다고 본다.

하는 것은 당연한 현상이다. 그러나, 이 논문에서 분석한 것은 단위 비사량 당 동반 유입되는 영양소의 양이다. 해빈-사구 경계부의 유입율과 사구 정상부의 유입율의 차이는 두 지점을 통과하는 비사량의 차이로 설명될 수 없다. 이것은 비사가 이동되는 양식 - 셀테이션 - 을 통해 설명할 수 있다¹¹.

해빈-사구 경계부로 유입된 비사는 전사구의 사면을 통과하면서 전사구 사면에 퇴적되어 있던 사구사와 혼합되게 된다. 이미 퇴적되어 있는 비사라고 할 수 있는 사구사는 전사구에 퇴적되어 있는 기간동안 세탈 등을 통해 표면에 흡착되어 있는 영양소를 잃어버리기 때문에 비사에 비해 흡착하고 있는 영양소의 양이 적다. 그러므로, 비사와 사구사가 혼합되면 동반 이동하는 영양소의 양도 감소한다. 식생 피복이 미비하고 전사구 경사면이 길 경우 이와 같은 혼합이 더욱 활발하게 이루어져 사구 정상부에 도달하는 영양소의 유입율은 감소한다. 사구지대 북부(A)의 경우 해빈-사구 경계부와 사구 정상부의 유입율 차이가 잘 드러나지만 사구지대 중부(C)의 경우 이 차이가 미비한 것은 이와 같은 해석의 타당성을 지지해주고 있다.

해빈-사구 경계부의 유입율이 사구 정상부의 유입율보다 항상 크게 나타나는 사구지대 북부(A)의 경우, Na, Mg, K 가 Ca, Sr 보다 더 뚜렷한 유입율의 차이를 보인다. 해빈-사구 경계부와 사구 정상부의 유입율 차이에 대한 위의 해석에 비추어 보면 Ca, Sr 는 Na, Mg, K에 비해 세탈이 덜 용이한 형태로 공급된다고 판단할 수 있다. 이 연구에서 채택한 추출법의 성격을 고려하면, Ca, Sr의 경우는 Na, Mg, K의 경우에 비해 치환에 의해 추출되는 양이 용해에 의해 추출되는 양보다 더 큰 비중을 차지하고 있다고 말할 수 있다.

Ca, Sr이 국지적인 원인을 가지고 있다는 점과 Na, Mg, K에 비하여 세탈이 덜 용이한 형태로 공급된다는 점을 종합하면, 생물학적 요인과 연관이 있을 수 있다는 잠정적인 추정

¹¹. 모래는 바람에 의해 주로 “셀테이션”의 형식을 통해 이동한다. 셀테이션이란 모래가 개별적으로 길게 튀어 이동하는 것을 말한다. 바람에 의해 튀어 오른 모래 알갱이는 일정 거리를 비행한 뒤 다시 지면으로 떨어지는데 이 때 지면에 있는 모래가 충격에 의해 튀어 오른다. 이렇게 튀어 오른 모래가 다시 바람에 의해 이동된다. 비사는 주로 이와 같은 방식으로 이동된다.

이르게 된다. 사구지대 북부의 해빈 일부는 지역 주민들에 의해 굴 양식장으로 사용되는데 여기에서 기인한 모래입자 크기의 패각이 비사와 함께 유입되면서 이 지역의 Ca, Sr 공급 집중을 주도하는 것으로 보인다. 모래입자 크기의 패각, 일종의 패사에 의해 Ca, Sr의 공급 집중이 일어났다는 추정엔 Ca, Sr이 세탈이 덜 용이한 상태로 공급되었다는 결과와도 부합된다. 이렇게 본다면, 비사와 함께 동반 유입된 주요 영양소 중 Na, Mg, K는 주로 해수로부터 기인하였고, Ca, Sr 등은 패사 혹은 패각 등을 통해 유입된 것으로 추정할 수 있다.

그러나, 앞서 언급했던 것처럼 Na, Mg, K와 Ca, Sr의 기원에 대해서는 이 연구에서 명확한 답변을 하기는 어렵다. 이 문제는 위의 추정의 정당성을 평가하는 추후 연구를 통해 해결될 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

이 연구는 신두리 해안사구지대를 대상으로 비사와 함께 동반 유입되는 주요 양이온 Na, Mg, K, Ca, Sr의 유입 규모와 시공간적 변이를 조사한 것이다. 신두리 해안사구지대의 전사구열을 중심으로 북부와 중부에 걸쳐 A, B, C 세 조사지역을 설정하고 비사 포집기를 설치하여 주기적으로 비사를 포집하였다. 조사 기간은 2000.12~2002. 2 이나 실제 비사가 포집된 기간만을 고려하면 2000.12~2001.7 과 2001.12~2002.2 의 크게 두 기간으로 구분될 수 있다. 토양의 치환양이온 조사에 쓰이는 암모늄 아세테이트 추출법을 이용하여 비사와 동반 유입된 양이온을 추출한 뒤 그 양을 ICP-AES 를 이용하여 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 인자 분석을 이용하여 주요 양이온의 유입을 간의 상관 관계를 분석한 결과 상정할 수 있는 2개의 인자 F1, F2 에 대하여 Na, Mg는 주로 F1에 의해, Ca, Sr 은 F2에 의해 설명되는 것으로 나타났다. K 는 F1, F2 어느 인자와도 큰 관련성을 보이지 않았다. 이와 같은 결과로부터 주요 양이온은 크게 Na, Mg / K / Ca, Sr 로 구분될 수 있다고 사료된다.

둘째, 주요 양이온의 유입 규모를 조사한 결과 Ca의 유입율은 평균 858.20 mg/kg으로 가장 크게 나타났고, Na는 335.30 mg/kg, Mg는 119.70 mg/kg, K는 118.10 mg/kg, Sr은 4.271 mg/kg로 나타났다. 분산을 고려할 때, Ca, Na는 유입율의 산포도가 큰 반면, Mg, K는 유입율의 산포도가 작게 나타났다. 2000.12~2001.7, 2001.12~2002.2의 두 기간으로 나누어 연간 변이를 살펴보면 앞의 기간동안 유입 규모가 전반적으로 크게 나타나는 경향을 보였으며 유사한 패턴으로 구분하면 Na, Mg / K / Ca, Sr로 인자 분석의 결과 얻어진 결과와 동일하게 나타났다.

셋째, 주요 양이온의 시공간적 유입 규모를 조사한 결과 전사구-해빈 경계부를 통과하여 전사구로 유입되는 규모가 사구 정상부를 넘어 내륙으로 넘어가는 경우보다 크게 나타났다. 지역적으로 사구지대 북부(A) 지역에 대해, 주요 양이온 중 Na, Mg, K에 대해 이러한 경향이 뚜렷이 나타났다. 또한 Na, Mg, K의 유입율은 유입 위치에 따른 변이를 거의 보이지 않은 반면, Ca, Sr의 유입은 사구지대 북부(A)로 유입되는 율이 가장 커서 국지적인 집중 현상을 보였다. 이렇게 유입된 주요 양이온은 대부분 전사구에 저장되어 전사구와 이차사구에서 포집된 비사에서 얻어진 양이온 규모는 현저한 차이를 나타내었다.

이와 같은 조사 결과를 바탕으로 신두리 해안사구지대로 유입되는 주요 양이온의 연간 유입규모와 주요 양이온의 기원을 추정하였다. 주요 양이온의 연간 유입 규모는 Na, Ca의 경우 해빈 1m 당 연간 수십 kg에 달하는 것으로 나타났고, Mg, K는 수 kg, Sr은 수십~수백 g에 달하는 것으로 나타났다. 이 연구에서 얻어진 결과만으로는 주요 양이온의 기원을 세밀하게 추정하기는 어려우나 유입율의 시공간적 특성으로부터 Na, Mg, K는 주로 해수에서 기원한 것으로, Ca, Sr 등은 폐각 등에 의해 공급된 것으로 추정하였다.

참고 문헌

- 박동원·유근배, 1979, “우리나라 서해안의 사구지형”, 『지리학논총』 제 6 호, pp.1-10
- 서종철, 2001, 『서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물 수지』, 서울대학교 지리학과 박사학위논문.
- 류호상, 2001, 『겨울철 모래이동과 전사구의 지형변화』, 서울대학교 지리학과 석사학위논문.
- Avis, A.M., Lubke, R. A., 1996, Dynamics and succession of coastal dune vegetation in the Eastern Cape, South Africa, *Landscape and Urban Planning*, 34(3-4), pp.237-254.
- Carter, R.W.G., 1988, *Coastal Environments*, Academic Press.
- Kutiel, P., Zhevelev, H., Harrison, R., 1999, The effect of recreational impacts on soil and vegetation of stabilised Coastal Dunes in the Sharon Park, Israel, *Ocean & Coastal Management*, 42(12), pp.1041-1060.
- Leaderman, S.P. 1978, A new aeolian sand trap design, *Sedimentology* 25, 303-306.
- Mats, E. R., Gustafsson, and Lars, G. Franzen, 1996, Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden, *Atmospheric Environment*, 30(6), pp.977-989.
- Rosen, P.S.,1978, An efficient, low cost, aeolian sampling system, *Current Research Part A : Geol. Surv. Canada*. 78-1A, 531-532.
- Simmons, J. A. K., Lyons, W. B., 1994, Ground water flux of nitrogen and phosphorus to Bermuda's coastal waters, *Water Resources Bulletin*, 30(6), pp.983-991.

- Simard, R.R., 1993, Ammonium Acetate-Extractable Elements, *In* Carter, Martin R., *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Lewis, 39-42.
- Stapleton, Carl M., Kay, D., Jackson, Gerry F. and Wyer, Mark D., 1999, *Estimated inorganic nutrient inputs to the coastal waters of Jersey from catchment and waste water sources*, *Wat. Res.* Vol. 34, No.3, pp.787-796.
- van der Meulen, F., Salman, A. H. P. M., 1996, Management of Mediterranean coastal dunes, *Ocean & Coastal Management*, 30(2-3), pp.177-195.
- von Salzen, K., Schlunzen, K.H., 1999, Simulation of the dynamics and composition of secondary and marine inorganic aerosols in the coastal atmosphere, *Journal of Geophysical Research : Atmosphere*, 104(23) pp.30, 201-30, 217.
- 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), pp.37-48.