한국지역지리학회지 제8권 제1호(2002) 98~109

원격탐사와 GIS 기법을 이용한 신두리 해안사구지대의 지형변화 분석*

서 종 철**

Analysis of Geomorphological Changes using RS and GIS techniques in Shinduri coastal dunefield.

Jong-cheol Seo**

요약 : 신두리 사구지대에서 30여년 동안의 항공사진을 분석하여 지표피복상태의 변화와 전사구열과 미피복사구를 중심으로 사구지형의 변화패턴을 분석하였다. 연구결과 삼림사구의 면적은 지속적으로 증가한 반면 미피복사구의 면적은 감소하였다. 또한 전사구열의 위치는 북부에서 방조제 축조 이후에 전진하였으나 사구지대 중앙부에서는 약 80m 후퇴하였다. 2차사구 지대의 미피복사구는 면적 감소와 함께 전면부가 침식되어 육지쪽으로 이동하는 패턴을 나타냈다. 이러한 지표피복변화와 지형변화는 신두리 사구지대가 조림사업이나 해안개발과 같은 인위적인 행위에 의해 영향을 받는 것과 동시에 신두리 사구지대로 유입하는 모래양이 점차 감소하면서 식생에 의해 미피복사구가 정착되는 과정에 있음을 의미한다.

주요어 : 해안사구, 전사구열, 항공사진, 지표피복변화, 식피사구, 미피복사구

Astract : The long term land-cover changes and the pattern of morphological changes in foredune ridges and unvegetated dunes were investigated for about 30 years through analysing aerial photographs in Shinduri coastal dunefield, Korea. As a result, forested dune area increased while unvegetated dune area decreased continuously since 1967. Foredune ridges retreated landward about 80m away from the former coast-line in the middle part while they advanced seaward after construction of dike in the northern part during last 3 decades. Unvegetated dunes in the middle part of the dunefield were eroded at seaward side and moved landward away. These facts mean not only coastal dune area has been affected by man-made effects such as afforestation and coastal developments but also shinduri coastal dune area has been stabilized by plants and has been negative sediment budget.

Key Words : coastal dune, foredune ridge, aerial photographs, land-cover change, vegetated dune, unvegetated dune

1. 서 론

1) 연구의 배경과 필요성

해안사구는 국내 지리학계에서 오랫동안 주목해 왔던 대표적인 해안지형이다. 우리나라에는 동해안과 서해안에 크고 작은 해안사구가 연이어 발달해 있으며, 태안반도의 신두리나 장곡리 등지의 해안사구는 규모는 물론 지형이 다양하여 오래전부터 해안지형에 관심이 있는 지리학자들의 필수적인 답사 대상지였다.

해안사구는 해빈, 간석지 등과 함께 역동적인 해안 퇴적지형의 일부로서 외부 환경변화에 대해 민감하게 반응한다. 해안사구가 위치한 해안지역은 오래전부터 인간활동이 집중되었던 곳으로 인위적인 지형변화 또한 매우 크다. 따라서 해안사구지역에서는 지형이나 식생은 물론 토지이용 자체도 매우 빠르게 변화한다. 해안사구의 이러한 역동적인 특성은 해안선 관리에 중요한 실마리를 제공할 수 있다.

최근 해안지역에서의 해빈 침식이나 해수범람 현상이 빈번히 발생하고 전세계적으로도 기후변화에 따른 해수면상승이 주요한 문제로 인식되고 있어, 종합적이고 체계적인 해안선 관리가 요구되고 있는 상황이다. 이에 따라 전세계적으로 해안사구의 지형형성과정은 물론 사구지역 내에서의 분야

---

* 이 논문은 본인의 박사학위논문의 일부를 수정·가필한 것임

** 국립환경연구원 생물다양성센터 책임연구원(Research Fellow, Bio-diversity center, National Institute of Environment Research)(jcseo@chollian.net)

별 생태계에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 축적된 연구성과를 바탕으로 다양한 해안선 관리방안들이 제시되고 있다.

최근 우리나라에서도 해안사구의 지형과 생태에 대한 관심이 고조되고 있다. 해안사구에 대한 학술적 연구가 각 분야에서 이루어지고 있을 뿐만 아니라, 해안사구의 생태와 기능에 대한 내용들이 방송매체를 통해 집중적으로 보도되었다. 환경운동단체인 '내셔널트러스트운동'에서도 신두리 해안사구지대를 관리후보지로 선정하였고, 문화재청에서는 태안반도의 신두리 해안사구지대의 일부를 천연기념물 보호구역으로 지정하였다(2001년 12월). 또한 환경부는 2000년 12월에 해안사구 관리를 위한 정책을 표명한 바 있어 정부차원에서의 해안사구와 해안지역의 문제에 대한 체계적인 접근이 이루어지기 시작하였다.

하지만 이러한 관심에 비해 실질적인 연구성과는 매우 빈약하다. 신두리 해안사구를 대상으로 발표된 연구성과는 몇 편에 불과하고(박동원 · 유근배, 1979; 박경, 1987), 그나마 지형형성과정에 대한 구체적인 연구는 거의 이루어지지 않았다. 효과적인 해안선 관리를 위해서는 해안지역에서의 지형형성과정이 밝혀져야 하지만, 우리나라에서는 아직 해안사구의 전반적인 분포실태조차 파악되지 않은 상태이며, 다수의 지형조사보고서에서 산발적으로 해안사구지형이 언급되어 있는 상태이다.

2) 연구목적

해안사구의 발달과정은 여타분야에 비해 비교적 단기간에도 쉽게 밝혀질 수 있지만, 해안지역에서의 체계적인 조사가 지속적으로 이루어지지 않은 상황에서는 우선적으로 실측자료보다는 문헌자료에 의존하는 경우가 일반적이다. 외국의 경우 지형도나 항공사진, 그리고 다양한 종류의 인공위성사진 자료 등이 이용되고 있다.

이 연구의 목적은 신두리 해안사구지대의 지형발달과정을 밝히는 것이다. 이를 위해 1967년 이후 30여년 동안 촬영된 여러 세트의 항공사진을 이용하여 장기적인 측면에서 신두리 해안사구 지대의 지표피복 상태 변화와 전사구열과 미피복사구의 변화패턴을 분석하였다.

3) 연구지역 개관

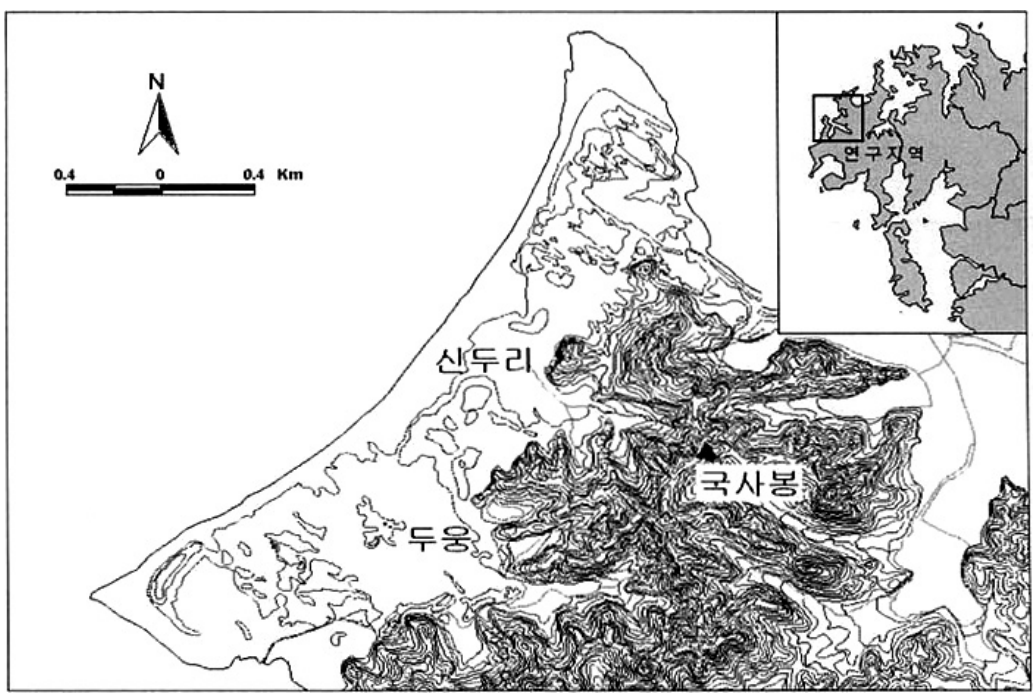

그림 1. 연구지역도 (등고선 간격 5m)

연구지역인 신두리 해안사구 지대는 태안반도의 서북부에 위치해 있다. 해안사구 지대의 범위는 해빈을 따라 좌우 폭이 약 4km이고 해안에서 육지부로는 0.5-2km에 달한다(그림 1).

연구지역인 신두리는 대규모 사구지대가 형성될 수 있는 유리한 조건을 가지고 있다. 신두리를 비롯한 서해안의 해안사구는 대부분 해안선이 북서쪽과 면하고 있는 곳에 형성되어 있는데, 이것은 풍향의 영향을 반영하고 있는 것이다. 지난 30년간 서산지방에서 관측된 겨울철과 봄철의 풍향은 북서풍과 북북서풍으로서 우리 나라의 겨울철 탁월풍으로 알려진 경향과 일치하고 있었다(기상청, 2001). 더욱이 신두리 해안은 지형적으로 북서쪽 방향을 제외하고는 배후산지로 둘러싸여 있기 때문에, 겨울철의 바람이 해안선과 직각으로 유입될 수 있는 조건을 갖추고 있어서 해빈의 퇴적물이 사구지역으로 불려와 사구가 형성되는데 유리하다.

신두리 사구지대의 전면은 평균입경이 2.13Ø인 세립질의 모래해안으로 경사가 2~4° 정도로 완만하고 조차가 큰 대조차 환경에 속하기 때문에(박동원 · 유근배, 1979)[1], 간조시에는 폭이 200m~400m에 이르는 해빈이 넓게 노출되며 최고조시에는 조위가 전사구열 전면의 말단부까지 도달하여 전사구가 침식되는 경우도 있다. 해빈이 넓게 노출되면 바람과 지면의 접촉면적이 넓어져 모래가 운반될 수 있는 가능성이 높아진다.

경사가 완만하면 지상부에서의 모래이동 뿐만 아니라 해저에서의 모래이동 조건 또한 좋아진다. 신두리 일대의 해저 등수심선을 보면, 신두리는 학암포 곶과 천리포 곶 사이의 만입부에서는 등수심선의 간격이 인근 해안지역에 비해 넓은데(그림 2), 이것은 인근 지역의 모래해안에 비해 해저단면의 경사가 매우 완만하다는 사실을 의미한다. 따라서, 파랑이 접근할 때 쇄파대(breaker zone)가 해안에서 멀리 떨어진 곳에서부터 형성될 수 있어 바다로부터 해빈지역으로 퇴적물이 쉽게 운반될 수 있다.

주변지역으로부터 모래가 공급될 수 있는 조건 또한 양호하다. 연구지역이 속한 태안반도 북서해역은 해저가 대체로 모래로 이루어져 있으며 모래층의 두께가 수십 미터에 달하는 곳이 많다. 태안반도의 북서 해역에는 해저에 사퇴(sand bank)라고 불리는 대규모 모래언덕들이 분포하는데, 그 가운데 장안퇴라고 불리는 사퇴는 연구지역과 비교적 가까운 곳에 있다(그림 2). 이 사퇴는 조류가 강한 천해환경에서 형성된 조류성 사퇴로서(최동림 등, 1992), 북동-남서 방향으로 길이가 약 29.9km이고 폭이 약 4.2km로서 폭이 좁고 긴 형태를 띠고 있으며, 모래층의 두께는 40m 이상인 것으로 추정된다(통상산업부, 1995). 수심이 낮은 곳에 형성되어 있는 사퇴의 상부는 강한 폭풍이 불 때 파랑에 의해 침식되어 해안지역으로 운반될 수 있다.

신두리 사구지대 주변의 해안으로 유입하는 하천은 매우 작은 규모로서 길이가 10km를 넘지 않으며, 하계망의 발달도 미약하다. 따라서, 인근지역에서 해안으로 유출되어 해빈으로 유입될 수 있는 토사량은 소량에 불과할 것으로 추측된다.

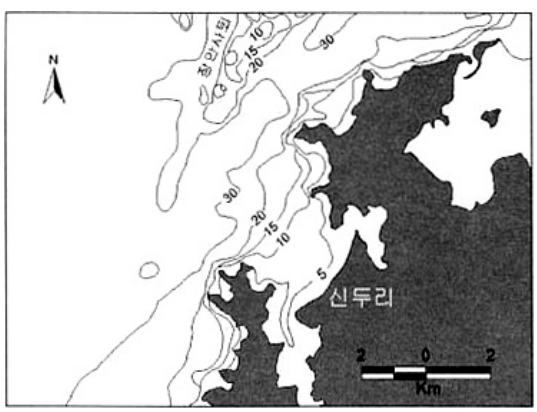

그림 2. 태안반도 일대의 해도(단위 : m)

4) 연구방법

해안사구의 발달과정을 파악하기 위해 널리 사용되는 문헌자료는 고지도와 항공사진, 인공위성사진을 포함한 원격탐사자료 등이다. 우리나라의 경우 지형도는 항공사진이나 인공위성사진에 비해 과거의 정보를 보유하고 있다. 해안사구지대의 지형을 파악할 수 있을 정도의 정확도를 가지고 있는 지도는 일제시대 이후에 발행되었으나, 사구지대의 형태와 분포범위는 파악할 수 있지만, 등고선 간격이 20m로서 대부분의 변화가 센티미터 범위 내에서 일어나는 사구지형의 변화를 파악하기에는 한계를 가지고 있다[2].

인공위성 사진분석은 최근에 가장 많이 이용되

는 원격탐사 방법의 하나이지만, 사구지대의 지형 변화를 탐지하기에는 해상도가 떨어지거나 해상도가 높은 경우 비용이 많이 드는 단점이 있어 해안사구를 대상으로 정밀한 분석이 행해진 예는 거의 없다.

항공사진 분석은 하천이나 해안지형과 같이 역동적으로 변화하는 대상을 연구하기 위해 널리 사용되는 방법이다. 특히, 항공사진은 식생의 피복상태 유무와 토지이용패턴, 그리고 인공지물 등을 육안으로 직접 확인할 수 있으며 지상에서는 관측할 수 없는 지형의 패턴이 쉽게 관측할 수 있기 때문에 해안사구 연구에서 널리 사용되고 있다(Pye, 1990; van Zuidam et al., 1998). 그러나, 항공사진은 지형도와는 달리 촬영 당시의 기울기가 보정되어 있지 않기 때문에 정확한 결과를 분석해 내기 위해서는 우선적으로 위치와 기울기 등의 기하학적인 정보를 보정(geometric correction)하여야 하며, 위치보정과정에서 발생할 수 있는 정확도 저하를 해결하는 것이 문제로 남아 있다.

표 1. 지형분석에 이용된 항공사진

구 분	도엽/도폭	제작연도	축 척	제 작 기 관
항공사진	한화서산	1967	1/50,000	국립지리원
	아 산	1977	1/20,000	〃
	홍 성	1984	1/20,000	〃
	홍 성	1991	1/20,000	〃
	예 산	1998	1/20,000	〃

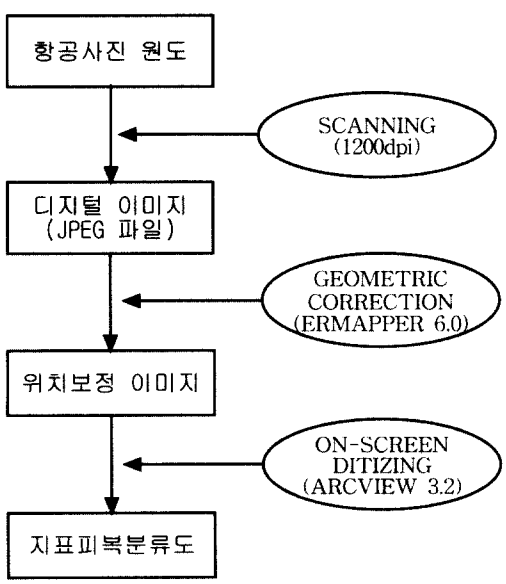

그림 3. 지표피복분류도 작성 절차

이 연구에서는 비교적 획득과 처리가 쉽고 비용이 적게드는 항공사진을 이용하여 조사지역 해안사구의 분포와 지형변화 등을 관찰하고자 하였다. 분석에 이용된 항공사진은 1967년 이후에 촬영된 5세트로서 약 30여년 동안의 지형변화를 관측할 수 있었다(표 1).

항공사진 분석과정은 다음과 같다(그림 3). 우선 국립지리원에서 촬영된 1 : 20,000과 1 : 50,000 항공사진을 1200dpi 해상도로 스캐닝하여 디지털 이미지로 만든다. 그 다음 단계는 이미지에 위치를 부여하는 것인데, 항공사진은 촬영당시 카메라의 기울기로 인해 완전한 수평상태를 유지하지 못하므로 위치와 기울기를 보정하는 기하보정(geometric correction) 과정이 필요하다. 이를 보정하기 위해서 인공위성사진의 위치보정 과정과 동일한 방법으로 사진상에서 GCP를 설정한 후, ERMAPPER 6.0의 RECTIFY 모듈을 이용하여 위치를 보정하였다. 이때 RMS 오차값이 1 이하가 되도록 하였다(표 2).

표 3. RMS 오차표

연도	보정 관계	RMS 범위	GCP 수
1998년	지 형 도* - 미보정항공사진	0.02-0.20	13
1991년	항공사진 - 보 정 항공사진	0.01-0.44	19
1984년	항공사진 - 보 정 항공사진	0.01-0.28	16
1977년	항공사진 - 보 정 항공사진	0.02-0.48	10
1967년	항공사진 - 보 정 항공사진	0.03-0.37	11

* 지형도는 「소원 1 : 25,000」(1996년 수정)

표 2. 항공사진 분석을 통한 지표피복 분류항목과 분류기준

분류 항목	분류 기준	비 고
경작지	논, 밭	인위적인 프로세스
훼손지	주택, 택지, 도로, 채광지, 해수욕장 개발	
미피복사구	이동사구, 취식와지	자연적인 프로세스
초지	초지, 건조슬랙(dry slack)	
삼림	곰솔 군락, 아까시 나무 군락	
사구습지	습지, 습윤슬랙(wet slack)	

위치가 보정된 항공사진 이미지를 ArcView 3.2 프로그램으로 불러들인 후, 화면상에서 사상(feature)을 육안으로 확인하면서 분류항목별(표 3)로 식별

된 내용을 디지타이징(on-screen digitizing)하여 지표피복분류도를 작성하였다. 분류된 내용의 정확성을 파악하기 위해 1998년 사진을 분류한 결과를 가지고 현장을 방문하여 결과를 확인하였다.

2. 연구결과 및 고찰

1) 지표피복 상태의 변화

1967년 이후에 촬영된 5세트의 항공사진을 이용하여 신두리 사구지대의 연도별 피복 상태를 분류하여 작성한 지도는 <그림 4~8>에 제시되어 있다.

그림 4. 신두리 사구지대의 지표피복분류(1967)

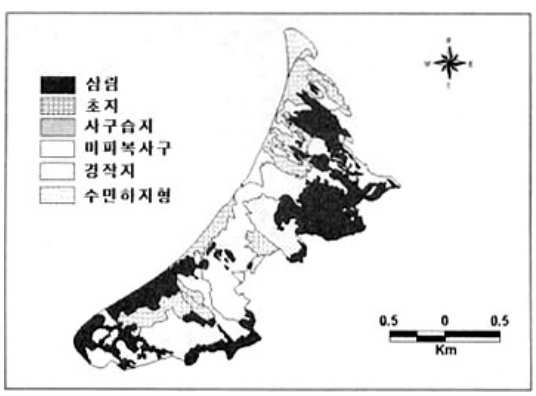

그림 5. 신두리 사구지대의 지표피복분류(1977)

지표상에 모래가 존재 여부와 배후산지의 지형을 고려하여 결정한 신두리 사구지대의 전체 면적은 대략 2.7㎢ 정도였으나, 1991년 이후에는 간척사업으로 인해 면적이 2.9㎢ 정도로 증가하였다.

그림 6. 신두리 사구지대의 지표피복분류(1984)

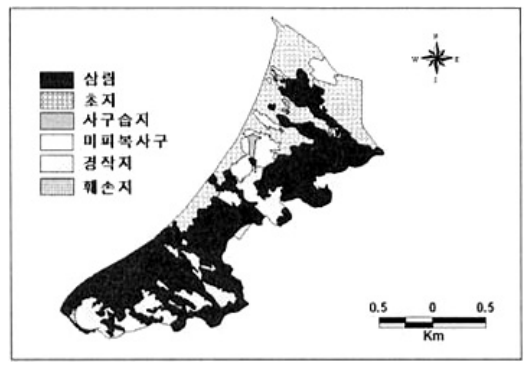

그림 7. 신두리 사구지대의 지표피복분류(1991)

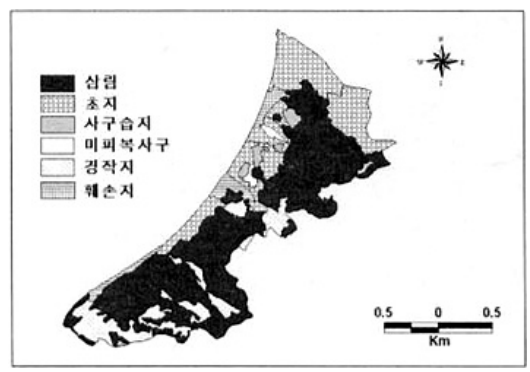

그림 8. 신두리 사구지대의 지표피복분류(1998)

지표피복 분류항목 상의 삼림은 곰솔림과 아까시나무림이 대부분이며, 해당화 관목림은 규모가 너무 작아 초지에 포함시켰다. 삼림의 면적은 1967년에 20%에 불과하던 것이 이후 꾸준히 증가하여 1998년에는 전체 사구지대의 57%를 점유하고 있다(표 4, 5; 그림 9).

기간별로는 1984년에서 1991년 사이에 면적이 크게 증가하였는데, 이는 1980년대 중반 이후에 실시된 대규모 조림사업의 영향이 큰 것으로 판단된다(표 6). 그러나 1991년 이후에는 조림이 행해지지 않았음에도 불구하고 자연적인 삼림의 형성 등으로 인해 삼림의 면적이 다소 증가하였다.

미피복사구는 식생으로 피복되어 있지 않은 부분으로, 모래가 빠르게 유입되어 퇴적이 활발히 일어나고 있는 부분이나 반대로 강한 바람에 의해 침식이 일어나 식생이 정착할 수 없는 곳이 포함된다. 전사구 부분의 취식와지와 전사구 후면의 이동사구가 이에 해당된다. 1967년 당시에는 33%에 이를 정도로 미피복사구의 면적이 넓고 사구지대 전 지역에서 고루 관찰되었으나, 점차 감소하여 1998년에는 2%에 불과할 정도로 축소되었고 출현 지역도 사구지대 중앙부로 국한되었다. 다만 1984년 사진에서는 이 부분의 면적이 증가하였는데, 이것은 촬영 시기가 대부분의 초본류가 시든 늦가을이어서 초지 부분과 미피복사구 부분을 명확하게 구분하기 어려웠기 때문이다.

분석에 의하면 1980년대까지 활발하게 이동하던 미피복사구가 1984년과 1991년 사이에 조림사업에 의해 대부분 안정화되어 분포면적이 급격하게 감소되었으며, 1991년 이후에 남아 있던 중앙부의 이동사구는 초본류의 정착이 진행되면서 현재는 거의 안정단계에 이르렀다. 다만, 사구의 중앙부에서는 계절적인 모래이동이 일어나고 있음이 측량결과 확인되었다(서종철, 2001).

표 4. 연도별 지표피복 변화(단위 : ㎡)

연도	삼림	초지	사구습지	미피복사구	경작지	훼손지	전체
1967	539,691	820,680	22,516	898,566	480,645	0	2,762,098
1977	997,114	553,499	204	677,654	555,334	0	2,783,806
1984	1,119,360	187,479	94,199	797,075	487,767	0	2,685,880
1991	1,595,409	680,760	20,678	182,424	378,634	4,825	2,862,730
1998	1,668,011	692,018	50,316	50,086	311,086	129,581	2,901,099

표 5. 연도별 지표피복 구성(단위 : %)

연도	삼림	초지	사구습지	미피복사구	경작지	훼손지	전체
1967	20	30	1	33	17	0	100
1977	36	20	0	24	20	0	100
1984	42	7	4	30	18	0	100
1991	56	24	1	6	13	0	100
1998	57	24	2	2	11	4	100

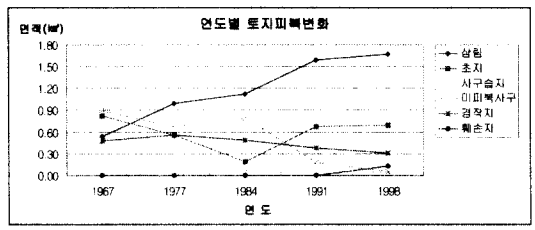

그림 9. 연도별 지표피복 변화

초지의 구성비는 1984년 사진을 제외하면 다른 분류항목에 비해 면적상으로는 비교적 안정적인 면을 보인다. 하지만, 시기별 분포패턴은 변화가 크다. 즉, 1967년 항공사진에서는 사구지대 남부와 북부에 초지가 넓게 형성되어 있었으나, 1998년 사진에서는 남부지역의 초지는 대부분 사라지고 사구지대 중앙부의 전면부와 사구지대 북부에 집중적으로 나타난다. 이와 같이 분포 패턴이 변함에도 면적의 증감이 두드러지게 나타나지 않는 이유는 삼림지역의 증가로 사라지는 부분만큼 미피복사구지역으로 초지가 확대되었기 때문인 것으로 보인다.

다만 전술한 바와 같이 1984년 항공사진은 식생이 시든 후인 10월에 촬영된 것이어서 미피복사구와 초지를 엄밀하게 구분하기 힘들었다. 따라서 이에 대한 분류는 추후 엄밀한 분석을 통해 보완해야 할 과제이다.

표 6. 신두리 사구지대의 조림사업 현황

연도	면적(ha)	대상지역(면적)	수종
1984	20	산305-8(1.32), 산305-94(6.60), 산305-95(8.74), 산305-97(3.34)	곰솔, 아까시나무
1985	24	산305-2(7.0), 산305-3(8.6), 산305-94(5.3), 산305-95(3.1)	
1986	15	산263-1(1.8), 산305-1(11.5), 산305-2(0.7), 산305-3(1.0)	
합계	59		

자료 : 태안군 농림과, 1984, 1985, 1986「조림대장」

사구습지는 주로 지하수면이 지표와 가까운 곳에 있는 2차사구의 스웨일 부분에서 형성되는데, 전사구열 후면의 스웨일에서 보편적으로 잘 관찰된다. 신두리 지역에서는 사구습지가 스웨일에서 뿐만 아니라 사구지대 중앙부의 넓은 초지의 저지

대에서도 비교적 큰 규모로 발달한다. 사구습지의 면적은 시기에 따라 변화 정도가 큰데, 이것은 사구습지의 수문주기(hydroperiod)[3]가 해당시기의 강수량과 촬영당시의 조건에 따라 크게 다르기 때문이다.

경작지의 면적은 1984년 항공사진까지는 일정한 점유율을 차지하고 있었으나, 그 이후로 점차 감소하는 추세에 있다. 이동사구 후면에 있던 일부 경작지는 사구의 침입으로 사라지게 된 곳도 있으나, 대부분은 휴경에 의해 경작지가 초지로 전환되어 면적이 감소하는 것으로 나타났다.

훼손지는 1991년 항공사진까지는 거의 나타나지 않았으나 1998년 항공사진에서는 사구지대 전체 면적의 4%에 달할 정도로 급격하게 확대되었다. 신두리 해안사구지대는 1990년대 초반까지 군사지역으로 출입이 엄격하게 제한되어 있었기 때문에 경작지를 제외한 인위적인 개발이 거의 허용되지 않았다. 그러나, 군사지역에서 해제되고 1994년에 신두리 해수욕장이 개장된 이후 해수욕장 부대시설이나 전원주택 부지를 조성하기 위해 대규모 토목공사가 이루어져 많은 부분이 훼손되었다. 1998년 사진에서는 훼손지가 남부지역의 전면부, 사구지대 중앙부, 그리고 사구지대 북부의 전사구지대에 국한되어 있었으나, 최근에는 남부지대의 삼림지대 대부분이 훼손되어 전체 면적의 1/3 이상이 훼손 또는 교란되었다. 또한 규사채광에 의해 훼손된 부분도 있으며, 아직도 간헐적으로 채광작업이 이루어지고 있다.

2) 사구지대의 지형변화와 이동

항공사진을 통하여 지표피복 상태의 변화와 함께 신두리 사구지대의 지형변화와 사구의 이동율을 통해 사구지대의 발달과정을 파악하고자 하였다. 이를 위해 해안선과 접해 형성되어 있는 전사구열의 위치이동과 전사구열 후면에 형성되어 있는 미피복사구(unvegetated dune)의 이동과 변화양상에 주목하였다.

사구지대에서의 지형변화는 사구지대 중앙부와 북부를 중심으로 설정된 조사단면에서 집중적으로 분석하였으며, 남부지역은 1990년대 초반부터 인위적인 훼손이 광범위하게 일어나고 있어 제외하였다(그림 9).

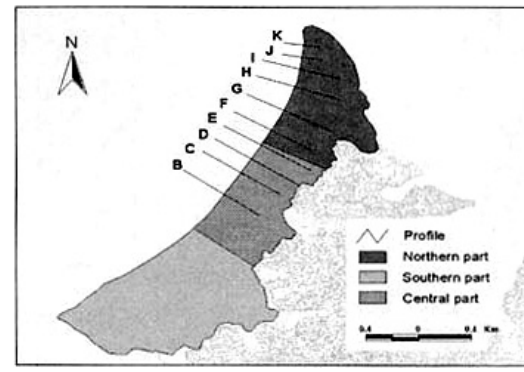

그림 10. 연구지역의 조사단면

(1) 전사구열의 위치 변화

해안과 접하는 사구지대 전면부는 전사구열에 의해 보호되고 있으며 대체로 갯그령이나 갯쇠보리와 같은 사구식생으로 피복되어 있다. 전사구열의 위치변화는 사구지대의 확장과 수축이라는 중장기적인 지형변화라는 의미와 함께 해수면상승에 따른 해안침식 문제와 결부되어 매우 중요하다.

온대지방의 전사구열은 식생으로 피복되어 있기 때문에 항공사진에서 육안으로도 쉽게 구분된다. 따라서 항공사진상에서 식생이 있는 부분을 전사구열의 말단부로 판독하였다. 분석결과 사구지대 전체적으로는 1967년 이후 약 30년 동안 전사구열의 위치가 사구지대 남부와 중앙부에서는 육지방향으로 후퇴하였고, 반대로 사구지대 북부에서는 해안방향으로 전진한 것으로 나타났다(그림 11).

단면 B에서 단면 E에 이르는 중앙부에서는 30여년 동안 전사구열의 위치가 40m에서 최대 90m 가까이 후퇴한 것으로 나타났다. 특히 단면 C지점에서는 1967년에서 1977년 사이에 63.7m가 후퇴하여 연평균 5m 이상이 침식되었음을 보여준다. 하지만 이후에는 후퇴율이 감소하고 있으며, 오히려 1991년에서 1998년 사이에는 단면 B 부분을 제외하면 해안방향으로 전진하는 것으로 나타났다(표 7).

사구지대 중앙부에서의 이와 같은 결과는 1980년대 말까지는 전체적으로 침식이 우세한 환경이었으나 1990년대 들어서면서 다시 퇴적이 우세한 환경으로 바뀌어 가는 결과로 해석되나 단면 B에

서 볼 수 있는 것처럼 침식이 꾸준히 일어나는 곳도 있어 남부와 북부의 결과와 종합하여 고찰할 필요가 있음을 보여준다.

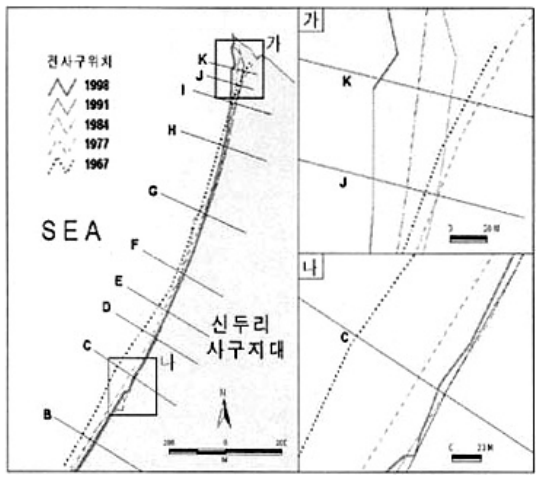

그림 11. 전사구열의 위치변화

표 7. 전사구의 위치 변화(단위 : m)

단면	'67-'77	'77-'84	'84-'91	'91-'98	'67-'98
B	32.0	4.9	14.4	7.2	58.5
C	63.7	26.8	2.5	-4.6	88.3
D	49.9	20.0	-3.0	-6.7	60.3
E	28.8	18.7	-0.7	-6.0	40.7
F	17.7	-0.6	13.9	-1.8	29.2
G	17.8	-24.0	36.4	-6.6	23.6
H	19.3	11.2	2.3	-14.6	18.2
I	11.7	-7.7	14.1	-28.6	-10.4
J	8.9	-21.4	20.5	-44.2	-36.2
K	7.7	-41.7	22.4	-49.0	-60.6

+ : 육지방향, - : 해안방향
전사구의 위치는 1967년 항공사진에서 육안으로 판독한 전사구의 말단부임

단면 B 부분에서 나타난 경향은 남부지대에서의 경향과 일치한다. <그림 11>에서는 나타나 있지 않지만 남부지대의 전사구열은 같은 기간에도 지속적으로 후퇴하였으며, 그 결과 전사구열은 심한 침식을 받아 급경사면이나 수직에 가까운 사구애(dune cliff)와 슬러프터(slufter)[4]가 곳곳에 형성되어 있다(그림 12).

사구지역 북부에 속하는 단면 I, J, K에서는 전사구열의 위치가 전진과 후퇴를 반복하는 양상을 나타내고 있다. 시기별로 살펴보면 1967년에서 1977년 사이에는 중앙부와 마찬가지로 육지방향으로 후퇴하였으나, 이후 1984년까지는 반대로 해안방향으로 전진하였고, 1984년과 1991년 사이에는 다시 후퇴하였다가 이후 1998년까지는 다시 전진하였다.

사구애 좌측의 틈새가 침식으로 인해 형성된 슬러프터임

그림 12. 단면 B 부근의 전사구

1977년에 이르는 기간은 사구지대 전체에 걸쳐 후퇴가 일어나던 시기로서 북부지역 또한 예외를 보여주지 않았으나, 1984년 항공사진에서는 최대 40m에 이를 정도로 해안선이 전진하였다. 이것은 1967년과 1977년 사진에서 수면하지형(tidal bar)으로 분류되었던 사취상의 지형이 성장하여 사구지대 전면에 부가되어 해안선이 전진하는 결과인데, 사취지형의 정확한 성장 원인에 대해서는 밝혀진 바가 없으나 사구지대 중앙부에서 침식된 모래가 연안류의 작용으로 이동되어 이곳에 퇴적된 것으로 추론할 수 있다.

1986년에 사구지역 북쪽의 만입부를 간척하면서 제방을 축조하였는데, 이 과정에서 사구지대 북단 부근의 외형이 크게 교란되었고, 조수로(潮水路)가 차단되면서 그에 따른 퇴적환경의 변화가 일어났을 것으로 예상된다. 따라서 1991년 사진에 나타나 있는 전사구열의 후퇴는 간척에 따른 일시적인 교란현상을 반영하는 것으로 사료된다.

그러나 1991년 이후에는 단면 I에서 단면 J를 중심으로 사구지역 북단지역에서 전사구가 해안방향으로 빠르게 전진하고 있으며, 특히 간척제방과 가까운 북단에 이를수록(단면 J의 경우) 그 속도가

빠름을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 간척제방이 축조로 인하여 해수의 유입이 차단되면서 연안류를 따라 운반되던 퇴적물 또한 만 내부로 유입되지 못하고 사구지역 북단에 퇴적되고 있기 때문인 것으로 판단되지만 정확한 원인을 밝히기 위해서는 사구지대 뿐만 아니라 해빈을 포함한 사구지대 전면부 연안지역에서의 종합적인 수문역학적 조사가 선행되어야 한다. 다만, 현재 이 일대에서는 전사구열이 비교적 빠르게 성장하고 있을 뿐만 아니라 사구지역 전면의 해빈지역 또한 성장하고 있으며(서종철, 2001), 신두리 사구지대 전면에서 측정된 연안류의 흐름과 퇴적물의 이동방향도 창조류와 낙조류 시에 모두 이 일대로 집중되고 있어(환경부, 2001) 이러한 현상을 조심스럽게 추론하는 것이다.

(2) 미피복사구의 위치 변화

항공사진 분석에서 나타난 또 다른 특징은 미피복사구의 변화에서 찾을 수 있다. 미피복사구는 초본식생이나 목본식생이 자라고 있지 않은 사구로서 순수하게 모래로만 이루어져 있으므로 이동성이 매우 높아 이동사구(mobile dune)로 불리기도 한다.

미피복사구는 분석단계 초기에는 사구지대 중앙부에서부터 북부에 이르도록 넓게 분포하고 있었으나, 시간이 지나면서 그 분포 범위가 줄어들어 1998년 사진에는 사구지대 중앙부에만 나타난다(그림 4~8). 따라서, 미피복사구가 존재하는 단면 B와 단면 C 일대에서 이러한 미피복사구의 변화와 이동패턴을 잘 관찰한 후 신두리 사구지대의 지형변화과정을 파악하고자 하였다.

분석결과 전술한 미피복사구의 면적감소와 함께 육지쪽으로의 지속적인 위치이동이 가장 두드러진 특징으로 나타났다(그림 13). 단면 B와 단면 C에서 전사구 전면부는 각각 133.8m와 208.5m씩 육지쪽으로 이동하였는데, 이는 연간이동율로 환산할 때 4.3m와 6.7m로서 대단히 빠르게 이동하고 있음을 보여주는 것이다(표 8).

미피복사구의 이동패턴을 시기별로 보면, 단면 B에서는 1967년에서 1977년 사이에 가장 크게 전면부가 후퇴하였으며, 이동율이 점차 낮아지다 1984년을 기점으로 큰 변화는 거의 정지되고 부분

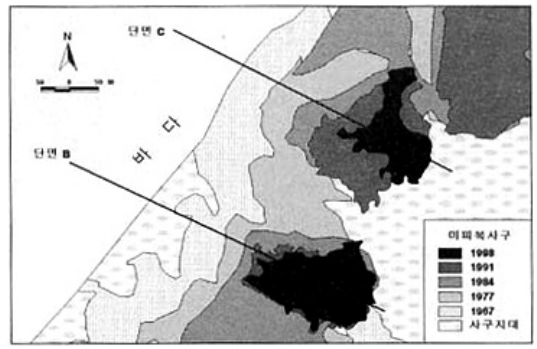

그림 13. 미피복사구 면적 변화와 이동

표 8. 미피복사구 전면부의 내륙방향 이동

구 분		'67-'77	'77-'84	'84-'91	'91-'98	합계 ('67-'98)
단면 B	이동거리(m)*	69.9	36.2	15.8	11.9	133.8
	연간이동율 (m/y)	7.0	5.2	2.3	1.7	4.3
단면 C	이동거리(m)	66.1	58.0	45.2	39.2	208.5
	연간이동율 (m/y)	6.6	8.3	6.5	5.6	6.7

* 이동거리는 <그림 13>에서 각 연도별로 해안쪽 경계 간의 거리임

적인 변화가 일어나고 있다. 이 시기에는 전면부의 이동율 저하와 함께 후면부의 위치도 거의 고정되고 있다.

단면 C의 경우는 단면 B와는 달리 1977년에서 1984년 사이에 변화가 가장 크게 일어났으며, 1984년 이후에도 전면부의 이동이 꾸준히 진행되고 있다. 후면부의 위치도 계속해서 배후산지 쪽으로 이동되고 있지만, 전면부와 마찬가지로 1991년 이후에는 이동율이 점차 감소하고 있다.

단면 B와 단면 C에서 일어나는 미피복사구 전면부와 후면부의 이동패턴은 미피복사구의 이동이 모래의 추가공급에 의한 것이 아니라 전면부에서 침식된 모래가 후면부에 퇴적되고 있음을 시사한다.

이러한 미피복사구의 면적감소와 이동패턴은 다음과 같은 사실을 시사한다. 신두리 사구지대에서는 여러 차례의 사방사업이 이루어졌고, 이에 따라 미피복사구의 면적은 그때마다 격변적으로 감소하였다. 그러나 항공사진 분석에 따르면 사방사업이 시행되지 않은 곳에서도 미피복사구가 점차 삼림사구로 대체되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 자연스러운 식생의 천이과정, 특히 번식력이 강한 아까

시나무림의 확산에 의한 것으로 파악되었다. 즉, 인위적인 요인과 자연적인 요인으로 삼림면적이 증가하자 사구지대의 전체적인 마찰력이 커지고 모래의 이동력은 약화되었으며, 이에 따라 식생이 정착하기에 유리한 환경이 조성된 것으로 판단된다.

미피복사구가 감소하는 또 다른 원인으로는 해빈지역에서 사구지대로 공급되는 모래 유입량의 감소를 들 수 있다. 일반적으로 사구지대에서 자라는 사초류는 사구지대의 변화가 큰 퇴적환경에 적응하기 위해 잘 발달된 뿌리체계와 번식전략을 가지고 있다. 대부분의 사초류는 지하경을 가지고 있으며 생장점이 지하경의 끝 부분에 있기 때문에 일정 한도 이상[5]의 모래가 집적되지 않는다면 쌓인 모래를 뚫고 새싹을 틔울 수 있다(Ranwell, 1972). 따라서 미피복사구에 식생이 정착하기 시작한다는 것은 모래의 유입량이 식생의 정착을 제어할 수 있을 정도로 충분하지 못하다는 사실을 시사할 수 있다.

모래의 유입량이 감소한다는 사실은 식생과 지형의 상호작용뿐만 아니라 순수하게 지형적인 증거에서도 찾을 수 있다. 또한 미피복사구의 해안쪽 위치는 전술한 바와 같이 30여년 사이에 육지쪽으로 크게 이동하였는데(표 8), 이동하면서 생긴 전사구와 미피복사구 사이의 공간은 기복이 거의 없는 사구평지(dune plain)가 형성되어 있다. 또한 단면 B에서 단면 C의 방향으로 사구평지가 점차 확대되어 나가는 것을 볼 수 있는데, 이것은 모래유입량이 부족하여 일어나는 현상으로 볼 수 있다.

해빈에서의 퇴적물 수지와 전사구에서의 퇴적물 수지가 모두 음(-)인 경우에 전사구에서 취식와지가 형성되며 사구의 규모가 축소되는 것으로 알려져 있다(Psuty, 1990). 정밀측량을 통해 작성한 지도를 분석하면 사구지대 하부와 중앙부에서는 해빈의 폭이 감소하였고 상부에서는 해빈의 폭이 증가한 것으로 나타났는데(서종철, 2001), 이것은 사구지대 중앙부의 전면 해빈에서는 퇴적물 수지가 음(-)인 반면 상부지역에서는 양(+)인 것을 의미한다.

결과적으로 미피복사구의 면적감소와 사구평지의 확대는 이차사구의 성장이 일어나지 않는다는 것을 의미하고, 미피복사구인 이차사구(secondary dune)의 반복적인 이동패턴은 퇴적물수지(sediment budget)가 음(-)인 곳에서 나타나는 전형적인 현상이므로(Psuty, 1990), 해빈으로부터의 모래유입량 감소가 신두리사구지대의 변화를 일으키는 주요 원인일 것으로 생각할 수 있다.

3. 결 론

항공사진을 이용하여 토지피복 상태를 분석한 결과 1967년 이후 현재까지 삼림의 면적 증가와 미피복사구의 면적 감소가 지속적으로 일어나는 것으로 나타났다. 해안선과 인접해 있는 전사구열의 위치는 사구지대 중앙부에서 31년 사이에 최대 80m 이상 후퇴한 것으로 나타났으며, 사구지대 상부에서는 간척제방이 축조된 후 해안선이 전진하는 것으로 나타났다. 한편 사구지대 중앙부에서는 미피복사구의 면적이 줄어드는 것과 함께 해안쪽 전면부가 침식되어 육지쪽 후면부로 이동되어 가는 재이동과정(relocation process)을 겪고 있는 것으로 나타났는데, 이와 같은 현상은 곰솔림 식재를 통한 사방사업과 모래유입량의 감소가 주원인일 것으로 판단하였다.

이상과 같은 사실을 종합하여 추론한 1967년 이후부터 현재까지 진행되고 있는 신두리 사구지대의 지형형성과정과 변화는 다음과 같다.

1967년 항공사진에는 사구지역 전체에 방대한 면적의 미피복사구가 분포하고 있으며 대부분이 전사구 지역에 나타나고 있다. 그러나, 이후에는 모래유입량이 점차 감소하고 지속적인 사방사업의 영향을 받아 미피복사구의 면적이 지속적으로 감소하는 동시에 위치가 내륙방향으로 이동하고 있다. 즉, 전사구가 파괴되어 후면으로 이동되고 전사구와 이차사구 사이에 사구평지가 점차 확대되는 과정을 겪는 것으로 판단된다.

이러한 과정은 1980년대 중반까지 지속되어 사구지대 남부에서 중앙부를 거쳐 점차 북부지역까지 영향을 미치게 되었다. 그결과 남부와 중앙부에서는 2차사구와 전사구열 사이에 넓은 사구평지가 형성되었고 곰솔림으로 고정되지 않은 사구지대 중앙부의 2차사구열은 현재까지도 계속해서 육지쪽으로 이동을 일어나고 있다.

그러나 사구지대 북부의 만이 간척에 의해 차단되면서 이전까지와는 다른 과정이 일어났다. 사구지대 중앙부에서는 이전의 지형형성과정이 동일하

게 진행되었던 반면, 사구지대 북부에서는 간척사업이 일어난 후에 중앙부와 달리 1990년대 이후 해안선이 전진하였다. 즉, 간척제방에 의해 만내로 유입되던 연안류와 조류가 차단되어 유속이 약해졌고 이로 인해 제방 전면에는 사구지대 중앙부에서 연안류에 의해 운반되어온 퇴적물이 쌓이게 되었을 것이다. 따라서, 해빈의 퇴적물량이 많아져서 사구지대로 공급될 수 있는 모래의 양이 더 많아졌기 때문에 사구지대 북부지대에서는 전사구가 성장할 수 있을 것이다.

하지만, 이러한 추론은 불과 30년에 걸쳐 파악된 비교적 단기간의 변화를 토대로 한 것이고, 사구지대의 퇴적환경에 영향을 미치는 요인들에 대한 실측이 뒷받침되지 않은 것이기 때문에 많은 제한을 가지고 있다. 따라서, 신두리 해안사구지대에서의 지형형성과정과 퇴적물수지 등에 대한 추후의 지속적인 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

註

1) 신두리 해안에서 가장 가까운 인근의 조석 관측지점인 안흥항의 자료(대조차 7.42m)에 의하면, 신두리 지역의 해안은 일반적인 대조차 환경의 기준인 4m보다 훨씬 큰 7m 내외의 대조차 환경을 보일 것으로 추측된다.
2) 예를 들어, 1 : 50,000 지형도의 등고선 간격은 20m이지만, 신두리 해안사구의 전사구 고도가 대부분 20m를 넘지 않는 경우가 많기 때문에 등고선으로 표현되지 못한다. 더욱이 해안사구지대 내에서의 다양한 지형변화는 지도를 통해서는 파악이 불가능하였다.
3) 수문주기(hydroperiod) : 습지에서의 수분의 침수기간(duration), 빈도(frequency) 및 주기(period)의 개념을 모두 포함함.
4) 슬러프터(slufter) : 해안사구지역에서 전사구열이 폭풍우시에 파괴되어 형성된 틈새. 이곳을 통해 간헐적으로 해수가 사구지대로 범람하기도 한다.
5) Ranwell(1972)은 대개 60cm 정도가 식물생장의 한계일 것으로 추정하였다.

文 獻

박경, 1987, 천리포 사구내의 적황색 퇴적층에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.

박동원, 유근배, 1979, 우리나라 서해안의 사구지형, 지리학논총, 6, 1-10.

서종철, 2001, 서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물수지, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

최동림, 김성렬, 석봉출, 한상준, 1992, 한반도 황해중부 태안반도 근해 사질퇴적물의 이동, 한국해양학회지, 27(1), 66-77.

태안군 농림과, 1984-1986, 조림대장.

통상산업부, 1995, 골재자원부존조사-경상권 하천, 산림골재 및 경기만 남부 해역 바다골재, 제1권.

한국동력자원연구소, 1982, 1 : 50,000 한국지질도-대산 · 이곡 도폭.

한국동력자원연구소, 1982, 1 : 50,000 한국지질도-서산 · 모항 도폭.

한태홍, 1993, 제주도 연안해빈과 사구에 관한 연구, 경희대학교 대학원 박사학위논문.

환경부, 2001, 우리나라 사구실태 파악과 보전 · 관리 방안에 대한 연구.

Arens, S.M. and Wiersma, J., 1993, The Dutch foredunes; inventory and classification, *Journal of Coastal Research*, 10, 189 -202.

Bennett, S.W., 1994, *Eolian processes in a coastal dune environment, Indiana Dunes National Lakeshore*, University of Indiana, Ph.D thesis.

Carter, R.W.G., 1988, *Coastal Environments*, Academic Press, London.

Carter, R.W.G., Curtis, T.G.F. and Sheehy-Skeffington, M.J.(eds.), 1992, *Coastal Dunes: geomorphology, ecology and management for conservation*, Balkema, Rotterdam.

Craig, M.S., 2000. Aeolian sand transport at the Lanphere dunes, Northern California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 239-253.

Davies, J.L., 1973, *Geographical Variation in Coastal Development*, Hafner Publ. Co., New York.

Horikawa, K.(ed.), 1988, *Nearshore Dynamics and Coastal processes*, University of Tokyo press, Tokyo.

Nordstrom, K.F., Psuty, N.P and Carter, R.W.G.,(ed.), 1990, *Coastal dunes: form and process*, Wiley, Chichester.

Psuty, N.P.(ed.), 1988, Dune/beach interaction.

Journal of Coastal Research, Special issue 3, 1-136, CERF, Charlottesville, Virginia.

Psuty, N.P., 1990, Foredune mobility and stability, Fire Island, New York, In: Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. & Carter, B.(Eds.), *Coastal dunes, Form and Process*, Wiley and Sons Ltd., Chichester, 339-359.

Pye, K., 1990. Physical and human influences on coastal dune development between the Ribble and Mersey estuaries, northwest England. In: Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. & Carter, B. (Eds.), *Coastal dunes, Form and Process*, Wiley and Sons Ltd., Chichester,

Ranwell, D.S., 1972, *Ecology of Salt Marshes and Sand Dunes*, Chapman & Hall, London.

Sherman, D.J. and Bauer, B.O., 1993, Dynamics of beach dune systems, *Progress in Physical Geography*, 17(4), 413-447.

Thom, B.G. and Hall, W., 1991, Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods, *E.S.P.L.*, 16, 113-127.

van Zuidam, R.A., Fariftch, J.E.M.A., and Tao, C., 1998, Developements in remote sensing, dynamic modelling and GIS applications for intergrated coastal zone management, *Journal of Coastal Conservation, 4*, 191-202.

(2002년 1월 20일 접수)