

연구논문

시화호 연안습지 식생의 공간 분포 분석

정종철 · 조홍래*

남서울대학교 지리정보공학과, 서울대학교 환경대학원*
(2008년 2월 5일 접수, 2008년 4월 11일 승인)

The Spatial Distribution Analysis of Coastal Wetland Vegetation in Sihwa Lake

Jong-chul Jeong · Hong-lae Cho*

Dep. Geoinformatics Eng. Namseoul Univ., Seoul National Univ.*
(Manuscript received 5 February 2008; accepted 11 April 2008)

Abstract

Human activity has been the major threat to wetlands. Agriculture, industrial development, and urban and suburban sprawl have caused the greatest losses of coastal wetlands. In fact, riceland agriculture, because of the flooding that goes with it, provides some additional wetland habitat not otherwise available. The biggest current source of loss for freshwater coastal wetlands is from urban sprawl.

In this study, spatial analysis method such as landscape index were applied to Sihwa area in Ansan city. The SMA (Spectral Mixture Analysis) method using Landsat image showed the change distribution of wetland vegetation from 1996 to 2004. The southern part of Sihwa wetland have been changed with *Suda japonica* of 24% and reed vegetation of 34% on coastal wetland which were covered with tidal flat.

Key words : SMA (Spectral Mixture Analysis), Landscape Index, Wetland

1. 서론

시화호는 방조제 공사가 완료된 이후 연안간석지의 습지환경이 다양한 동식물의 서식처이며 육상의 물리적 환경과 연안의 해양환경이 공존하는 공간이 되었다. 이러한 방조제 내만의 공간적 특성은 공유수면의 매립과 같은 개발행위를 통해 국토의 이용

과 도시개발을 위한 토지 수요에 중요한 공급원으로 인식되고 있다. 따라서 시화방조제와 새만금방조제를 비롯한 서해연안의 많은 연안습지는 이러한 개발과 보전의 문제에 접하고 있어서 이에 대한 공간적 해석을 위한 연구가 필요하다. 그러나 연안습지 환경은 조석의 영향으로 접근이 용이하지 않고 시간적인 연구의 제약을 받게 된다.

인공위성 자료에 의한 시공간적인 분석은 연구지역의 광범위한 공간범위와 방조제 공사 전후의 시간적 흐름을 파악하는데 적합하고 위성 자료를 활용하여 물리적 환경변화의 분석에 적용될 수 있다. 본 연구에서는 방조제 완공 이후 갯벌지역이 육지화되면서 나타나는 식생공간을 Landsat 영상으로부터 식생 점유비율의 관점에서 파악하고, 이를 통해 간석지 내 식생 분포의 시-공간적 변화 특성을 살펴보는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 간석지 내 식생 점유 비율은 분광혼합분석 기법을 이용하여 추정하였으며, 이렇게 추정된 식생비율을 시기별로 구분한 후 식생분포를 구성하는 조각(patch)의 크기, 분포, 패턴 등이 시간적 변화를 통해 나타나는 식생 분포의 공간적 특성을 분석하는데 본 연구의 목적이 있다.

II. 관련이론 고찰

시화호 간석지와 같이 넓은 지역을 대상으로 식생의 시계열적 변화양상을 파악하기 위하여 위성영상을 이용한 토지피복 분류가 유용하게 사용되고 있다. 그러나 그동안 사용된 전통적인 원격탐사 분류방법은 위성영상의 각 화소가 다양한 지표면 요소가 혼합된 혼합화소(mixed pixel)임에도 불구하고 각 화소에 대한 단일한 하나의 토지피복 항목만을 할당하는 단점을 갖고 있다. 예를 들어, 위성영상의 한 화소가 40% 식생과 60% 나대지로 구성된 지표면을 나타낸다고 할 때 전통적인 위성영상 분류 방법에서는 40% 식생은 무시되고 가장 많은 점유비율을 보이는 나대지가 100% 대상지역을 차지하고 있는 것으로 분류되게 된다. 특히 시화호 간석지와 같이 새롭게 식생이 나타나는 지역의 경우 지표면 식생피복 비율이 다른 지표면 구성요소에 비하여 상대적으로 낮은 값을 가지나, 전통적인 위성영상 분류 방법에서는 이를 반영하지 못하게 된다. 최근 들어 이러한 단점을 보완하고자 영상의 각 화소에 대해 관심을 갖는 지표면 구성요소의 점유비율을 산정하기 위하여 분광혼합분석(SMA;

Spectral Mixture Analysis)이 활발히 이용되고 있다(김상욱, 2004; 김승태와 이기원, 2004; 이지민과 이규성, 2003; 조홍래와 정종철, 2006; Phinn *et al.*, 2002; Wu and Murray, 2003; Small, C, 2002).

각 화소에서 대상지역의 식생 비율이 산정되면 다음으로는 이를 정량적으로 분석할 수 있어야 한다. 특히 식생 연구에 있어서는 시간에 따른 변화와 함께 공간적 분포 특성에 대한 정량화가 필요하게 되는데, 이를 위하여 최근 경관지수를 이용한 분석이 수행되고 있다(정종철, 1999; 조용현, 2000; 황국웅과 박소윤, 2003; 김정미, 2003; 최원형 등, 2005; 윤은주, 2006).

본 연구에서는 분광혼합분석(SMA; Spectral Mixture Analysis) 기법을 이용하여 시화호 간석지 내의 단위면적별 식생비율을 산정하였으며, 이를 9개의 경관지수에 대입하여 시화호 간석지 내 식생의 연도별 분포 특성을 살펴보았다. 본 연구에서 사용된 분광혼합분석 기법과 경관지수에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

1. 분광혼합분석

분광혼합분석은 여러 객체들의 반사특성이 혼합되어 생성된 혼합화소의 반사값을 다시 지표면 구성 객체의 점유비율로 환원하는 분석기법이다(조홍래와 정종철, 2006). 이때 각 픽셀을 구성하는 최소분해단위인 지표면 구성객체를 엔드멤버(endmember)라 한다. 분광혼합분석 기법은 엔드멤버의 반사값을 조합하는 방법에 따라 선형모델과 비선형모델로 구분할 수 있다. 현실 세계를 정확히 묘사하기 위해서는 비선형 모델을 사용해야 하지만, 많은 경우 다중 지표면 객체의 상호영향은 무시한 선형 모델을 사용할 수 있으며 본 논문에서도 선형모델을 사용하였다. 선형분광혼합모델에서 각 화소가 가지는 반사값은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$R_b = \sum_{i=1}^N f_i R_{i,b} + e_b \quad (1)$$

여기서 R_b 는 각각의 밴드 b에서의 반사값, N은

엔드멤버의 수, f_i 는 i 번째 엔드멤버가 화소에서 차지하고 있는 비율, $R_{i,b}$ 는 밴드 b 에서 i 번째 엔드멤버의 반사값, e_b 는 잔차를 나타낸다. 각 엔드멤버가 픽셀에서 차지하고 있는 비율 f_i 는 최소자승법에 의해 잔차가 최소가 되는 값으로 계산된다. 최소자승법에 의해 식 (1)에서 엔드멤버의 점유비율 f_i 를 계산하는 방법은 제한조건의 부여 방법에 따라 3가지로 구분될 수 있다(김승태와 이기원, 2004). 첫 번째 방법은 식 (1)에서 잔차를 나타내는 e_b 가 최소가 되도록 하는 모든 f_i 를 인정하는 방법으로 제한조건을 부여하지 않는 방법이다. 두 번째 방법은 화소를 구성하는 각 엔드멤버의 점유비율의 총 합이 1이 되도록 하는 것이다. 세 번째 방법은 식 (2)의 제한조건에 추가하여 각 엔드멤버의 비율 f_i 가 0과 1사이의 값을 갖도록 $0 \leq f_i \leq 1$ 의 제한조건을 부여하는 방법이다.

$$\sum_{i=1}^N f_i = 1 \quad (2)$$

분광혼합분석 기법의 정확성은 분석에 사용될 엔드멤버에 의존하게 된다. 이때 사용될 엔드멤버의 개수와 종류는 대상지역과 연구목적에 따라 다르게 되나, 너무 많은 수의 엔드멤버 선정은 결과의 정확성을 떨어뜨리는 요인이 된다(Wu and Murray, 2003). 엔드멤버를 선정하는 방법은 ① 실험실에서 측정된 분광 라이브러리(spectral library)를 이용하는 방법, ② 이동식 분광측정기(spectrometer)를 이용하여 직접 현장에서 대상 지표면의 분광반사값을 측정 후 이를 엔드멤버로 사용하는 방법, ③ 영상 자체에서 엔드멤버를 선정하는 방법으로 구분된다. 본 연구에서는 영상 자체에서 엔드멤버를 선정하는 방법을 이용하였다.

2. 경관지수

경관을 구성하는 다양한 요소들의 공간적 분포 패턴과 상호관계를 정량적으로 분석하기 위하여 다양한 경관지수가 개발되어 사용되고 있다. 경관구조 및 변화특성을 정량적으로 해석하기 위한 노력은 1950년대 후반부터 기하학적 이론에 기초하여

제기되어 왔으며, 최근에는 원격탐사, GIS, 정보이론, 프랙탈 이론에 근거한 지표가 도입되어 사용되고 있다(김경탁과 김주훈, 2005). 최근에는 넓은 면적을 대상으로 복잡한 경관지수를 자동적으로 계산할 수 있는 경관분석 소프트웨어가 개발되어 경관요소들의 공간 패턴과 변화양상을 규명하는데 효과적으로 이용되고 있다. McGariga(2002)는 주어진 경관에 대하여 조각(patch), 클래스(class), 전체 경관(landscape)의 3가지 수준으로 구분하고 각 수준에 대해 여러 가지 지수를 산출할 수 있는 프로그램인 Fragstats를 제시하였다. 여기서 조각은 경관을 구성하는 최소 공간단위를 일컬으며, 클래스는 경관을 구성하는 최소 공간단위인 조각의 다양한 속성 중 특정 속성이 동일한 조각들의 집단을 지칭하고, 경관은 이들 조각과 클래스를 포괄하는 전체를 지칭한다(조용현, 2000). FRAGSTATS에는 분석 내용에 따라 경관지수를 ① area/density/edge 지수, ② shape 지수, ③ core area 지수, ④ isolation/proximity 지수, ⑤ contrast 지수, ⑥ contagion/interspersion 지수, ⑦ connectivity 지수, ⑧ diversity 지수 등으로 구분하여 총 100 여개의 지수를 포함하고 있다. 표 1은 FRAGSTATS에 포함된 경관지수 중 본 연구에 사용된 지수를 보여준다.

표 1. 연구에 사용된 경관지수

경관 지수	설 명
TA	total area
NP	number of patches
LPI	largest patch index
MPS	mean patch size
PSSD	patch size standard deviation
PCSV	patch size coefficient of variation
nLSI	normalize landscape shape index
PAFRAC	perimeter-area fractal dimension
ED	edge density

III. 연구방법 및 자료

본 연구는 시화호 내 간석지를 대상지역으로 한다. 그림 1은 시화호 유역을 나타내고 있으며 그림 1에서 시화호 호수의 영역과 간석지 영역, 산림과 시

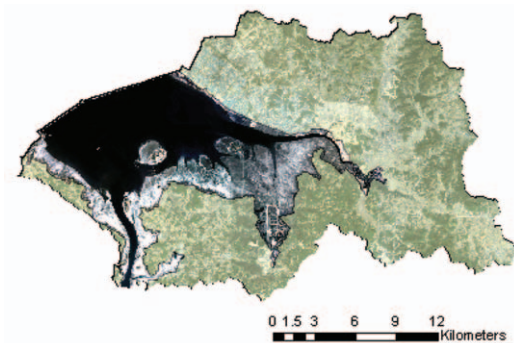


그림 1. 연구지역인 시화유역과 갯벌

흥시, 안산시 지역의 시화호 유역권역을 구분하여 파악할 수 있다. 본 연구는 이러한 공간범위에서 시화호 방조제가 완공된 이후 새롭게 갯벌이 육지화된 지역을 대상으로 하며 이 지역은 방조제 완공 이후 시간적으로 육상식생의 공간적 분포가 확대되고 간석지의 특성이 사라지는 토양환경을 나타내고 있다. 특히 간석지에서 식생의 시공간적 분포는 급격히 이루어지고 육상 동물과 조류의 서식처 특성을 나타내고 있다.

시화호 간석지 내 식생변화 분석을 위하여 본 연구에서는 96년부터 2004년까지 시화지역이 관측된 16개의 Landsat 영상을 분석하고 이중 5년 간격으로 1996년, 2000년, 2004년 Landsat 영상을 통해 식생변화를 분석하였다. 사용된 영상의 특성은 표 2와 같다.

1:25,000 수치지도를 이용하여 기하보정 후 영상 내에서 기존 육지부와 물을 마스킹하여 간석지를 추출하였다. 기존 육지부와 물을 마스킹하기 위해 4번 밴드에 의한 수역구분 방법을 이용하였다. 그러나 각 영상에 대해 기존 육지부와 물을 마스킹하였으나, 영상 촬영일자에 따라 시화호 수위에 차이가 있음에 따라 각 영상에 포함된 간석지의 면적이 다

표 2. 사용된 영상의 특성

Year	Day	Sensor
1996	4.13	TM
2000	9.04	ETM+
2004	6.03	ETM+

르게 된다. 본 연구의 목적은 시화호 간석지 내에서 식생분포의 변화를 분석하는 것으로 이를 명확히 하기 위해서는 각 영상에서 대상 지역의 공간적 범위를 일치시킬 필요가 있다. 이를 위하여 1996년, 2000년, 2004년 3개의 영상을 중첩하여 공통적으로 포함된 영역만을 선정하여 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 엔드멤버를 위성영상으로부터 직접 추출하였다. 엔드멤버는 대상지역의 지표를 구성하는 최소 단위로 본 연구 대상지역인 시화호 간석지 내에는 인공적 지물이 없는 것을 감안하여 식생, 습윤토양(wet soil), 건조토양(dry soil)을 엔드멤버로 정의하고 분광혼합분석 기법을 적용하였다. 그림 2는 적색 밴드와 근적외선인 밴드를 나타낸 산포도에서 습윤토양과 건조토양의 위치와 식생이 성장하면서 산포도 내에서 이동하는 모습을 보여주는데, 본 연구에서는 이에 기초하여 Landsat 3번 밴드와 4번 밴드에 대한 산포도를 작성하고 각 산포도의 최외곽 지점에 기초하여 엔드멤버를 선정하였다. 그림 3은 각 연도별 영상에서의 3, 4번 밴드의 산포도와 이 때 지정된 엔드멤버의 위치를 보여준다.

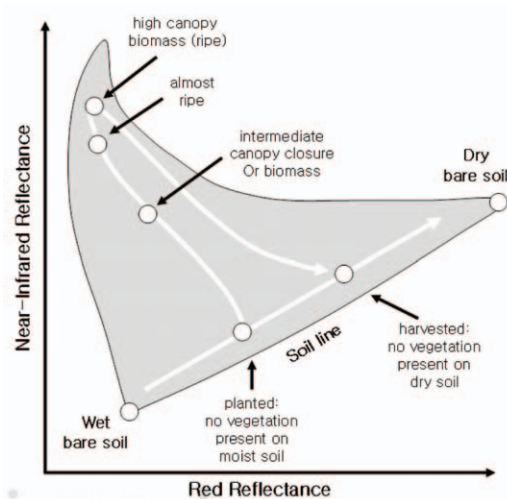


그림 2. 적색과 근적외선 밴드 산포도에서 토양과 식생의 분포 (Jensen, 2000).

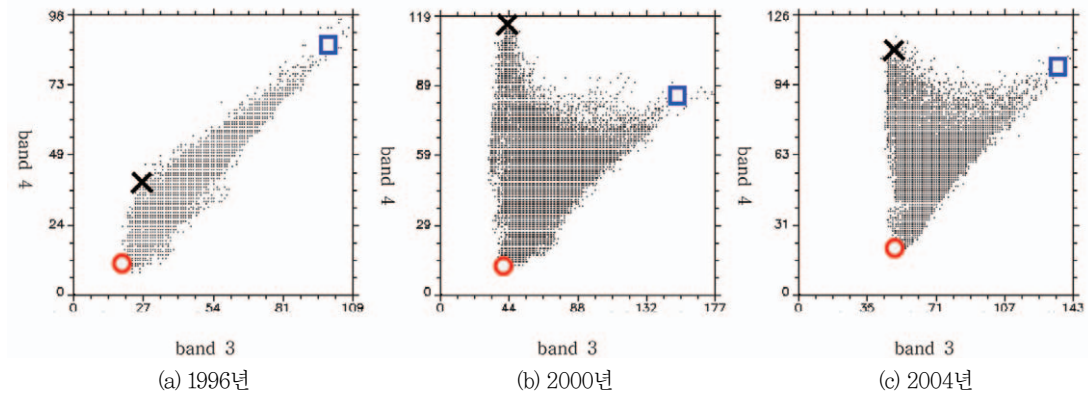


그림 3. Landsat 3, 4번 밴드 산포도를 이용한 엔드멤버의 선정
(○: wet soil, □: dry soil, X: vegetation)

IV. 결과 및 고찰

1. 식생비율의 변화

분광혼합분석기법을 이용하여 시화호 간석지 내 연도별 지표면 식생 점유비율을 산정한 결과는 표 3, 그림 4와 같다. 분석결과 시화호 간석지에서 1996년 식생분포가 10.7%이었던 것이 2000년 15.5% 증가하여 26.2%를 보여주었으며, 2004년의 경우 2000년과 큰 차이가 없는 27.1%의 지표면 점유비율을 보여주었다. 2000년 영상의 경우 다른 연도에 비해 습윤토양의 점유비율이 53%로 크게 나

표 3. 분광혼합분석기법 적용 결과 (%)

연도	선행무강우일수	wet soil	dry soil	soil*	vegetation
1996	6일	38.3	51.0	89.3	10.7
2000	2일	53.0	20.8	73.8	26.2
2004	5일	36.5	36.4	72.9	27.1

* soil = wet soil + dry soil

온 것을 볼 수 있는데 이는 선행무강우일수가 2일로 다른 영상에 비해 상대적으로 토양 내 수분이 많았기 때문인 것으로 사료된다. 공간적 변화 양상을 살펴보면 그림 4와 같다. 그림 5(a)는 2000년도 식생

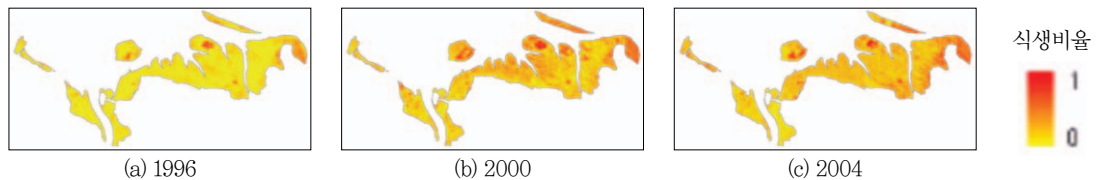


그림 4. 연도별 지표면 식생비율의 분포 모습

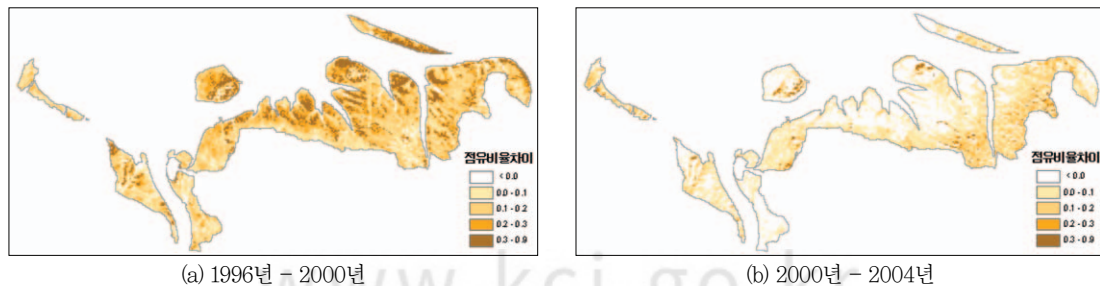


그림 5. 시간변화에 따른 지표면 식생비율의 변화

비율에서 1996년 식생비율 뺀 결과로 전체 대상지
역에서 고르게 식생비율이 증가하였으며, 특히 기
존 육지부보다 시화호 쪽에서 식생비율이 크게 증
가하였음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 2004년도 식생
비율에서 2000년 식생비율 뺀 결과로 기존 육지부
와 가까운 지역에서 식생 비율이 증가하였으나 그
림 5(a)와 비교하여 식생비율이 공간적으로 크게 변
동하지는 않았음을 확인할 수 있다.

2. 경관지수를 이용한 식생 조각의 변동특성 분석

분광혼합분석 기법을 이용하여 선정된 지표면 식
생비율을 10개 클래스로 구분한 후 각 클래스에 대
해 표 1에서 제시한 경관지수를 적용하여 식생비율
의 시공간적 변동 특성을 분석하였다. 경관지수를
적용한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서 10개 클
래스는 0에서 100% 사이의 지표면 식생비율을 등
간격으로 구분한 것으로, 예를 들어 클래스 10은 식

생의 지표면 점유비율이 90%~100% 사이의 조각
을 나타낸다. 그림 6(a)는 클래스별 총면적을 보여
준다. 1996년의 경우 식생비율이 10% 이하인 클래
스 1이 가장 많은 영역을 점유하였음에 비하여
2000년의 경우 식생비율 10%~20%인 클래스 2,
2004년의 경우 식생비율 20%~30%인 클래스 3이
가능 큰 면적을 보여 전체적으로 시간이 지남에 따
라 지표면 식생비율이 증가하였음을 알 수 있다. 그
림 6(b)는 조각의 평균면적(MPS)을 보여주는데,
1996년엔 클래스 1, 2000년엔 클래스 2, 2004년엔
클래스 3에서 조각 평균면적이 가장 큰 것으로 나타
나 연도가 지남에 따라 식생 점유비율이 증가함과
동시에 이들이 서로 뭉쳐 무리를 지었음을 알 수 있
다. 그림 6(c)와 (d)는 조각 크기의 표준편차(PSSD)
와 변동계수(PSCV)를 보여주는데, 모든 연도에 대
해 그림 6(a)에서 점유 면적이 가장 큰 클래스에서
분산도가 큼을 알 수 있다. 그림 6(e) 각 클래스를

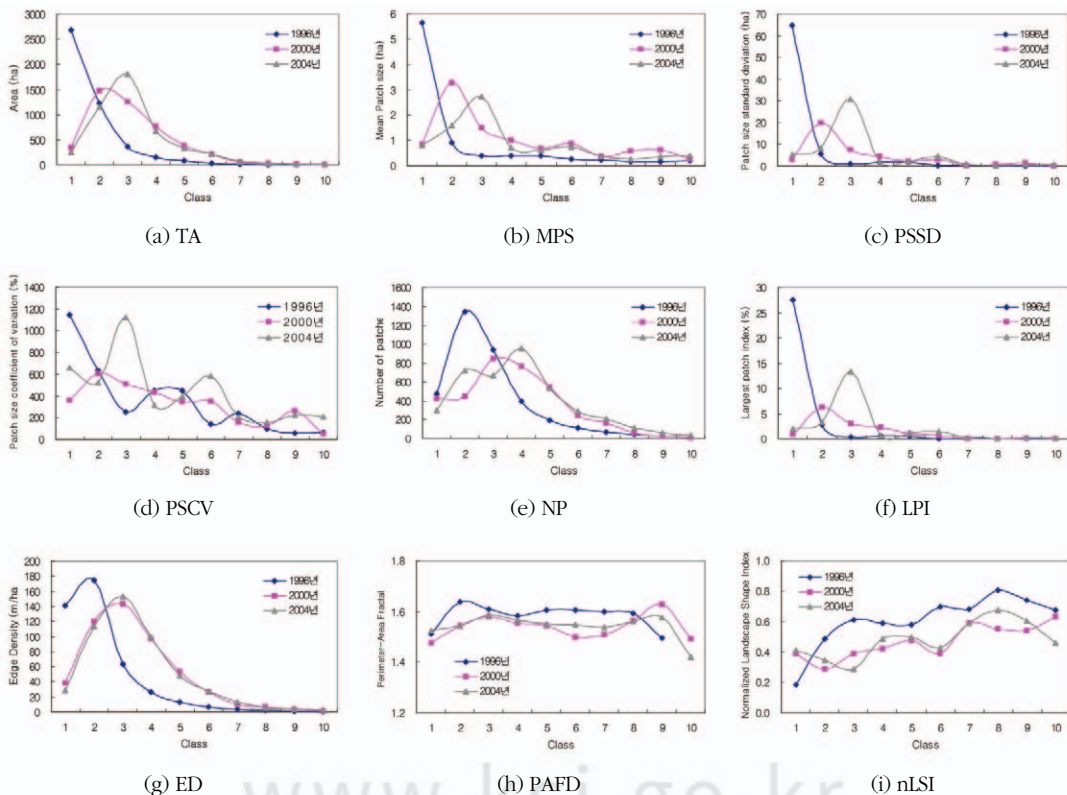


그림 6. 연도별 경관지수의 변화

구성하는 조각 개수를 나타낸다. 조각 수의 경우에도 1996년엔 클래스 2, 2000년엔 클래스 3, 2004년엔 클래스 4가 가장 많은 수의 조각을 가진 것으로 나타나 이 또한 면적과 비슷한 모습으로 변동된 것을 알 수 있다. 그러나 그림 6(a)에서 가장 많은 면적을 점유한 클래스의 경우 모든 연도에서 조각의 개수는 주변 클래스에 비해 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 경관 내에서 많은 면적을 점유하고 있는 클래스의 경우 상대적으로 단편화되지 않고 크게 모여 있음을 보여 준다. 그림 6(f)는 각 클래스에서 가장 큰 조각이 전체면적에서 차지하는 비율을 보여주는데, 그림 6(a)에서 전체 영역에 대해 가장 큰 점유를 보인 클래스가 또한 가장 큰 크기의 조각을 포함하고 있다. 특히 2004년의 경우 식생 점유비율 20~30%에 해당하는 클래스 3에 상대적으로 매우 큰 조각이 포함되어 있음을 알 수 있으며, 이를 그림 6(d)의 변동계수와 비교할 경우 2004년 클래스 3에 포함된 조각들의 면적 크기가 매우 다양함을 확인할 수 있다. 그림 6(g)는 단위면적당 가장자리 밀도(ED)를 보여주는데, 식생비율이 30% 이상인 클래스부터는 2000년, 2004년 공히 1996년에 비하여 가장자리 밀도가 크게 증가한 모습을 보여준다. 가장자리 밀도는 경관이 단편화될 경우 증가하는 모습을 보여주는데, 본 경우에는 그림 6(b)에서 조각의 평균면적과 함께 살펴볼 경우 식생 비율 30% 이상인 클래스에서 1996년에 비하여 평균면적이 증가한 것으로 분석되어 단편화보다는 식생 비율이 증가하여 기존에 존재하지 않던 새로운 조각이 생성된 결과로 판단된다. 그림 6(h)의 경우 둘레길이와 면적을 이용하여 산정한 프랙탈 지수를 보여주는데, 클래스 9를 제외한 모든 클래스에서 1996년에 비하여 2000년, 2004년에 프랙탈 지수가 감소한 모습을 보여준다. 프랙탈 지수는 조각들의 복잡성을 보여주는데, 프랙탈 지수가 감소하였다는 말은 조각의 둘레모습이 단순화되고 있음을 보여준다. 그림 6(i) 정규경관모양지수(nLSD)는 각 클래스별 조각의 둘레길이를 이용하여 군집화(aggregation) 정도를 평가한 것으로 값이 작을 수

로 군집화 정도가 높아진다. 그림 6(i)를 보면 모든 연도에서 클래스 번호가 증가할수록 정규경관모양지수 값이 증가하여 군집화가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 연도별 변화를 평가할 경우 2000년, 2004년 모두 1996년에 비하여 군집화가 증가한 것으로 분석되었다.

V. 결론

본 연구에서는 시화호 방조제 내에 위치한 간석지를 대상으로 1996년, 2000년, 2004년 위성영상을 분석하여 식생의 공간적 분포 변화를 살펴보았다. 분광혼합분석기법을 이용하여 지표면 식생비율을 산정한 결과 1996년 10.7%이던 식생 점유비율이 2000년 26.2%로 증가한 것으로 분석되었다. 이에 반하여 2004년의 경우 지표면 식생 점유비율이 27.1%로 2000년 26.2%와 비교하여 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다. 지표면 식생 비율을 10개 등급으로 구분한 후 경관지수를 적용하여 각 등급별 공간적 변동 특성을 분석하였다. 경관지수 분석결과 1996년 10% 이하의 식생비율이 전체영역에서 가장 많이 차지하던 것이 2000년 10~20%, 2004년 20~30%의 식생비율이 가장 많은 점유를 보임과 동시에 조각의 크기가 커지고 있는 것으로 나타났다. 또한 연도가 지남에 따라 식생비율이 높은 조각의 수와 가장자리 밀도가 증가하였으며, 각 클래스를 구성하는 조각들이 서로 가깝게 위치하여 군집화되는 것으로 분석되었다.

이상의 분석으로부터 위성영상과 경관지수를 이용한 분석이 간석지 내 식생의 시공간적 분포 특성을 파악함에 유용한 도구로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 향후 본 연구에서 제시한 식생의 시공간적 변화와 현장에서 조사한 식생 종류 및 야생동물의 분포 등을 함께 분석할 경우 간석지 생태 연구에 좋은 자료로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 김경탁, 김주훈, 2005, 경안천 유역 수변구역 경관 구조 변화 분석, 한국지리정보학회지, 8(3), 74-83.
- 김상욱, 2004, Identification of palustrine wetlands in paldang reservoir using spectral mixture analysis of multi-temporal landsat imagery, 서울대학교 박사학위 논문.
- 김승태, 이기원, 2004, Landsat 7 ETM+와 ASTER 영상정보를 이용한 선형분광혼합분석 기법의 지질주제도 작성 응용, 대한원격탐사학회지, 20(6), 369-382.
- 이지민, 이규성, 2003, 분광혼합분석 기법에 의한 산림피복 정보의 특성 분석, 대한원격탐사학회지, 19(6), 411-419.
- 정성관, 박경훈, 오정학, 2002, 낙동강 유역의 선형 개발사업이 산림 단편화에 미치는 영향, 환경영향평가, 11(3), 117-127.
- 정종철, 1999, 식생지수에 의한 경관파편화의 해석 기법, 한국지리정보학회지, 2(3), 16-22.
- 조용현, 2002, 경관지수를 이용한 지역생태계 평가 - 용인시를 대상으로, 환경영향평가학회지, 9(4), 349-362.
- 조홍래, 정종철, 2005, 분광혼합분석 기법을 이용한 탄천유역 불투수율 평가, Korean Journal of Remote Sensing, 21(6), 361-368.
- 최원영, 정성관, 박경훈, 오정학, 유주한, 김경태, 2005, 대구광역도시권의 시·공간적 경관 구조 변화패턴 분석. 한국지리정보학회지, 8(2), 175-185.
- 황국웅, 박소윤, 2003, 지속가능한 토지이용을 위한 경관규모 생태계평가기법 연구, 한국지리정보학회지, 6(1), 78-84.
- Jensen, J. R., 2000, Remote sensing of Environment, Prentice-Hall.
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C. and E. Ene. 2002, FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html.
- Phinn, S., Stanford, M., Scarth, P., Murray, A. T., and Shyy, P. T., 2002, Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques, *International Journal of Remote Sensing*, 23(20), 4131-4153.
- Small, C., 2002, Multitemporal analysis of urban reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 81, 1305-1334.
- Wu, C. and Murray, A. T., 2003, Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis, *Remote Sensing of Environment*, 84, 493-505.