

연구논문

시화 갯벌식생범위의 시-공간적 변이 분석

정 종 철

남서울대학교 GIS공학과

(2011년 3월 26일 접수, 2011년 6월 10일 승인)

The Analysis of Temporal and Spatial Variation on the Vegetation Area of the Sihwa Tidal Flat

JEONG, Jong-Chul*

Associate Professor, Dept. of Geoinformatics, Namseoul University

(Manuscript received 26 March 2011; accepted 10 June 2011)

Abstract

This research is aim to analyze of changing landscape and according to phenological cycle from image information of coastal environment obtained by multi-media were analyzed by camera and satellite image. The digital camera and satellite image were used for tidal flat vegetation monitoring during the construction of Sihwa lake. The vegetation type and phenological cycle of Sihwa tidal flat have been changed with the Sihwa lake ecosystem. The environment changes of Sihwa tidal flat area and ecological change were analyzed by field work digital camera images and satellite images. The airborne, UAV and satellite images were classified with the changed elements of coastal ecological environment and tidal flat vegetation monitoring carried out the changed area and shape of vegetation distribution with time series images.

Keywords : Phenological cycle, photographic information, Halophyte, Sihwa lake, Tidal flat

1. 서론

자연 생태계는 반복적이고 예측 가능한 순환적 성장 주기를 가지고 있는데, 인류는 다양한 형태의 간섭행위로 반복적이고, 확산적인 공간범위의 단계로 지형과 경관을 변형시킨다. 이러한 지형과 경관

의 변형은 자연생태계의 구조와 기능적 측면에서 예측 불가능한 다양한 환경변화를 유발하게 되는데 시화호방조제, 새만금방조제와 같은 연안갯벌의 매립과 댐과 저수지의 건설 등은 다양한 인간의 간섭과 함께 지형경관을 비롯한 식물상의 변화를 일으킨다(Clark, J.,1980;KEI, 2002; KEI:2008). 자

연계의 식물상은 이러한 변화요인에 대해 식물의 성장 주기와 적응력으로 종종 형상학적 주기 혹은 생물계절주기(phenological cycles)에 의해 이러한 변화를 수용하는 것으로 알려져 있다.

연안국토의 효율적인 관리와 개발을 위한 연안 매립은 서해연안 많은 지역의 갯벌 환경을 급격히 변화시켜왔다. 또한 갯벌에 분포하고 있는 염생식생은 이러한 개발행위에 대해 식생의 공간적 변화가 나타나고 식생천이와 같은 식물상의 환경적 변화가 나타나는데, 식생은 비교적 예측 가능한 월별, 계절별, 그리고 연도별 생물계절학적 주기를 가지고 있어서 지역적인 환경변화에 중요한 인자로 구조적, 기능적 역할을 수행하며 변화하는 경향을 나타내게 된다(염기철, 2006; 이원갑, 1999; 조동오, 2001)

염생식물에 대한 정의는 학자마다 다르지만 일반적으로는 염분 생육지에 생육하는 육상 고등 식물을 광의의 염생식물로 지칭하며 염분 생육지란 포장용수로 토양이온을 추출하였을 때 NaCl의 농도가 최소 100 meq(milliequivalent)이며 pH가 8.5 이하인 곳을 의미한다(Clark, *et al*, 1980). 우리나라에 생육하는 염생식물은 총 16과 40여종이 보고되었으며, 특히 서남해안 갯벌의 상부 지역에 그 군락이 잘 발달하여 있다. 염습지에서 염생식물 군락을 형성하는 식물 종들은 그 생육의 특징에 알맞은 입지 조건에서 자생한다. 이토질(泥土質)의 염생식물 군락에는 통통마디, 해홍나물, 나문재, 칠면초, 갯개미취, 강피, 갯는쟁이, 갈대, 천일사초 등이 있는데 순군락이나 혼군락을 이루는 경우가 많으며(안산시, 2001), 매립지와 같은 경우 이들 염생식물은 토양의 육상화를 이루어 갈대와 버드나무 등 다양한 식물의 분포가 발견되고 있다. 이러한 식생의 공간변화와 시간적 변화는 사진 촬영과 위성자료, 현장조사에 의한 기록물의 연구 자료로 수집될 수 있다. 사진정보를 이용하여 농작물의 변화를 조사하려는 경우에는 그 농작물의 파종 혹은 성장과 같은 단일재배 농작물의 관점에서 매년 동일한 시기에 파종되는 재배 작물에 대해 분석하는 것이 일반

적 경향을 분석하는데 적합한 방법으로 알려지고 있으나, 갯벌의 염생식물은 동일한 식물의 경우에도 성장시기와 조건에 따라 자연경관에 있어서 다양한 변화를 나타내기 때문에 생태적 기능의 특성을 다르게 나타낼 수 있고 이는 식생의 발달과 경관의 변화에 중요한 인자가 된다(한국해양수산개발원, 1999)

본 연구에서는 방조제와 연안 매립과 같은 인간의 간섭과 개발행위에 의한 연안지형과 경관변화의 환경요인을 통해 갯벌식생의 변화를 사진영상 정보를 통해 해석하는 방안을 제시하는데 연구의 목적이 있다. 특히 사진자료에 의한 갯벌식생의 공간적 변화와 지형경관의 변화에 따른 갯벌 지표식생의 변화를 장기간의 조사를 통한 사진자료와 위성영상(Landsat, KOMPSAT)을 바탕으로 해석하여 사진 정보에 의한 지형 및 경관의 해석에 필요한 요소를 제시하였다.

2. 연구지역 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 경기도 시흥시, 안산시, 화성시 등 3시에 걸쳐 있는 시화지역이다. 연안에 영흥도와 대부도 등 도서생물지리학의 식생이 분포하고 있고, 시흥시와 화성시에 인접해서 육상과 인접해 있는 시화지구는 갯벌 식생의 시-공간적 변이 특성을 분석하기에 적합한 연구지역이다(정종철 외, 2010). 특히 시흥시의 경우 소래지역을 비롯한 인근 지역이 염전지역으로 발달한 지역이었으나, 염전이 사라진 뒤 자연적으로 염생식물이 발달하여 갯벌생태공원을 조성하고 있다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 시화호의 남측 간석지와 주변 매립지역을 연구대상 지역으로 하였다. 시화방조제 건설 전에는 사리포구와 갯벌로 조석의 주기에 의해 그림 1의 범례19와 같은 연안습지가 조석의 차이에 따라 갯벌지역으로 나타나지만 시화방조제가 완공되어 시화호의 수위가 일정하게 조정되면서 갯벌지역은 육지화되는 과정을 통해 지형과 경관의 변화가 진행되었다. 이는 새만금에서도 동

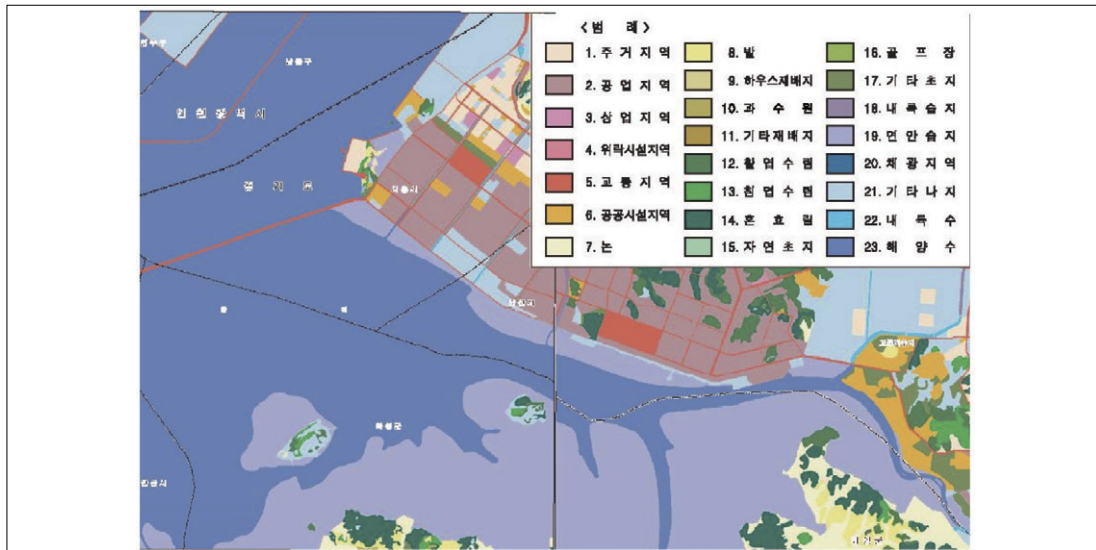


그림 1. 시화호 남측 갯벌식생지와 연구의 공간적 범위(환경부 중분류 토지피복도)

일한 과정이 진행되고 있다. 연안생활환경의 터전이었던 연구지역은 반월공단과 시화공단지역이 매립지에서 공단지역으로 토지이용의 변화가 생기고 염전지역이 매립되어 주택단지로 개발되면서 다양한 지형경관과 생태환경변화가 나타난 지역이다. 시화호 방조제가 1994년 물막이 공사가 완공되고 시화호를 담수호로 만들기 위해 시화호 남측 간척지는 강우에 의한 토양 세척이 이루어지는데 강우기에 빗물에 의해 갯벌의 염분은 토양에서 제거되고 시간적 변화에 따라 갯벌의 토양은 육상 식생 환경 변화를 나타내었다.

정중철(2007)은 조석주기에 따라 바닷물에 잠기거나 공기 중에 노출되는 갯벌의 시-공간적 특성이 수위의 일정한 조절에 의해 24시간 해수의 영향을 받지 않는 상태로 육지화되는 갯벌식생을 관찰하였고 염생식물의 성장에 있어서 태양광 조건에 유리한 생육 및 성장 분포 조건을 조사하였다. 염생식물의 분포는 일반적으로 다음과 같은 생육환경인자에 의하여 결정되는데 본 연구에서는 연구지역의 조사 범위를 다음의 기준에 의해 선정하였다. 첫째, 갯벌의 면적과 노출시간이 일정 규모 이상이어야 한다. 만조선으로부터 해양 방향으로 경사가 가파른 지역에서는 다년생의 단자엽성 식물들만 생육할 수 있

고 일년생의 쌍자엽식물은 적정의 면적이 매우 중요하기 때문이다. 둘째, 해수에 침수되는 시간이 1일 최소 8시간 이내이어야 하는데 시화호만 간척지의 경우 24시간 노출 빈도가 높은 지역을 선정하였다. 이것은 식물이 호흡과 광합성을 원활히 할 수 있는 지역이라는 것을 의미하며, 염생식물이 분포하는 지역은 대부분 이에 해당하는 곳이다. 일반적으로 만조선 근처가 모래인 경우는 갈대, 천일사초, 갯잔디가 소규모의 패취(patch)가 잘 형성되어 나타나는 것을 관찰하였다.

서해 연안 주요 지역의 갯벌 식생은 서남해안의 펄 갯벌을 중심으로 분포하고 있는데 우리나라에는 사빈에 주로 생육하는 4종을 포함하여 약 30여종의 염생식물이 분포하고 있다. 이들 중 관찰빈도가 높고 분포면적이 비교적 넓으며, 서해안에서 해안식생의 주요 구성종으로 간주할 수 있는 것은 거머리말류(*Zostera spp.*), 지채(*Triglochin maritimum*), 갈대(*Phragmites communis*), 갯잔디(*Zoysia sinica*), 천일사초(*Carex scabrifolia*), 칠면조(*Suaeda japonica*), 해홍나물(*Suaedamaritima*), 갯질경, 갯개미취 등이며, 대표적으로 해안식생을 이루는 염생식물인 통통마디는 해수가 직접 영향을 주지 않는 폐염전지나 간척지에 주로 생육하고 있으며, 갯논쟁이는

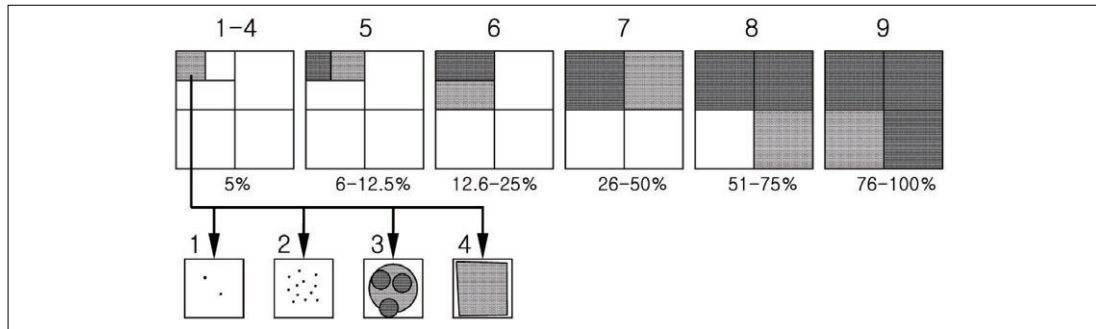


그림 2. 갯벌식생지의 식생 공간분석 방법과 위성영상 적용 방법

주로 만조선 상부의 사빈에 분포하는 염생식물이지만 해수가 침수되지 않는 시화 남측 간석지 갯벌의 주요 갯벌식생이다(안산시, 2001).

본 연구의 시화방조제 내만 갯벌지역은 만조선에 도달한 지역으로 산지로부터 유입되는 담수의 양은 적으나 모래가 퇴적되어 있는 갯벌은 편평하여 소규모의 갯골이 분포하고 펄의 비율이 높은 지역이다. 본 연구에서는 갯벌의 벌 지역과 해안선이 육상과 접한 지형적 특성을 현장사진정보를 바탕으로 해석하고, 경관지역으로 나타나는 식생의 생태적 특성의 시-공간적인 환경변화를 갯벌 식생의 공간변화 분석을 통해 해석하였다. 특히 서해연안은 조석주기에 의해 드러나는 갯벌의 개발이 용이하여 일제시대 이후 다양한 개발이 이루어졌는데, 염전, 포구, 농지의 개발 등으로 토지이용의 변화가 연안의 해안선과 연안식생환경을 변화시켜서 식생의 공간분포에도 주변 환경의 영향에 의한 다양한 차이가 나타나고 있다.

식물상의 생태계조사는 갯벌식물상의 조사범위와 방형구 위치로 분석하였다. 갯벌 식물상 및 식생조사방법에서 식물상은 식생형의 분류, 방형구의 설정 등 식생조사의 지침 수행에 의해 이루어지고 식생조사시 표고, 사면 방향, 경사도, 출현종수를 기록하며, 다층구조를 나타내는 갯벌식생은 층별로 구분하여 피도를 판정하였다. 위성영상은 광범위한 공간범위의 자료를 해석하는데 도움을 주는데 반드시 현장조사 시점과 동일한 시기의 위성사진 영상 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 유용한 식생의 변화정보를 최대한 얻기 위해 생물계절 주기를 이용하여 필요한 현장 사진자료가 수집되도록 조사 시기를 정하였고, 그룹 10 % 미만인 시화지역 Landsat(116-34)과 IKONOS 자료를 분석하였다. 연구의 시간적 범위는 2000년부터 3월, 5월, 8월, 9월, 10월 일정 주기를 가지고 현장조사를 실시하였고, 위성자료는 시화방조제 공사완료시점과 2010년까지의 자료를 해석하였다. 본 연구에서는 연안생태계의 식생, 토양, 물 성분의 특성과 갯벌식생의 생물계절주기를 분석하기 위해 연구지역의 인간에 의한 개발과 관련된 공간적 범위도 평가하였다. 그림 2와 같이 해안지형의 공간적 변화를 위성사진 자료를 통해 시계열적으로 분석하고 이에 따른 지형적 변화와 식생환경의 변화를 현장조사 자료에 의해 위성사진 자료와 분류 정확도를 검증하고 식생지역 공간을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 1996년부터 2010년까지 21개 Landsat 영상을 이용하여 식생지역을 식생지수(NDVI)와 위성영상(Landsat 4, 3, 2밴드 합성)에 의해 식생지역을 탐지하고 이를 식생이 점유하는 비율의 구분으로 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 매립과 방조제 공사에 의한 연안지형의 변화특성, 이용형태 등의 측면에서 보편적으로 분포하는 자연해안지형과 인공지형이 연안환경변화에 미치는 인자를 해석하는 것으로 사진자료

를 분석하였다(조동오, 2001). 조석은 해안 지역에 변화탐지를 수행할 때 중요한 요소가 된다. 이상적으로 변화탐지를 위한 다중 시기의 영상조건에서 조석 조건은 동일하여야 한다. 본 연구에서는 위성 영상의 획득이 어려운 기상학적 제한과 시간해상력 등의 문제를 극복하기 위해 또한 해안지역의 변화 탐지 연구를 위해 현장조사기법의 식생조사기법을 위한 사진자료의 활용 연구를 병행하였다. 이때 식생의 공간적 분포 변화와 식생 종의 공간변화의 정확한 변화량을 평가하기 위해서는 평균조면(Mean Low Tide : MLT)에서 수집된 영상들을 사용하여 오차를 최소화하였다.

연안의 갯벌 식생은 각각 독특한 생물계절주기를 가지고 있다. 지형경관으로서의 시화연구지역은 갯벌의 이용 가능지역으로 원형이 유지되어 왔으나, 연안매립과 방조제 공사는 훼손된 지형과 연안식생의 다양한 변화로 나타났다(엄기철, 2006; 정종철 외, 2006). 현장조사를 기반으로 한 15년 동안의 사진자료와 공간해상력과 시간해상력에 대한 위성자료의 해석은 다양한 갯벌 환경인자의 변화를 기록하고 이를 시-공간적으로 해석하는데 중요한 연구 결과를 제시하여 주었다.

시화 갯벌식생의 특성으로 우점종은 칠면초이며 초장은 10 ~ 25cm, 밀도는 25 ~ 70개체/m², 현존량은 50~100g · dw/m²으로 나타났고, 만조선을 따라 소규모의 갈대군락이 분포하고 있으며, 폭은 2~5m, 길이 50m 정도로 작은 지역이 전체 55% 이상을 차지하고 있다. 갈대군락의 초장은 110cm로 낮으나 천일사초와 갯잔디가 소규모의 군락을 형성하고 있으며, 모래가 퇴적된 지역에는 갯질경, 비쭈, 갯개미취, 방석나물 등이 분포하여 나타났다. 갯잔디 군락 내 혹은 주변에는 다양한 경관요소를 포함한 식물상이 생육하고 있다. 이들 군락의 전체길이는 70m이내이며, 계절적인 변화보다는 연도별 공간 범위의 구분과 차이가 명확하게 나타나고 있다.

그림 3은 KOMPSAT -1 EOC센서에 의한 위성 사진으로 아리랑 1호에서 2000년에 관측된 자료이다. 아리랑 1호는 6.6m의 공간해상력을 가진 흑백

위성영상사진을 제공하는데 EOC 영상 자료 위에 2000년 5월부터 현장조사한 야장 및 방형구 조사 결과와 안산시(2001) 조사자료를 바탕으로 2003년까지 식생의 발생과 확산 범위를 지도로 제시하였다. 그림 3은 그림 2의 조사기법에 의한 현장 관측 결과와 2000년 9월 Landsat NDVI의 결과를 바탕으로 갯벌의 염생식물이 성장하고 식생종의 천이가 일어나는 분포 경향을 공간적으로 제시한 것이다. 그림 4는 북측간석지의 식생 밀도를 가시채널과 적외선 필터를 이용하여 식생활력도를 현장 측정하여 시화호 방조제 완공 이후 2008년 현장관측에 의한 식생 조밀도 분석 결과를 제시하였다.

그림 5는 방조제 완공이후 육지화된 시화호 남측간석지이고 2005년3월11일과 2005년 5월24일에 촬영된 사진자료를 비교하여 제시한 것이다. 사진에서도 초본 식생과 갈대의 경우 전 년도 식생의 분포와 색상이 새롭게 성장하는 식생과 구분되어 나

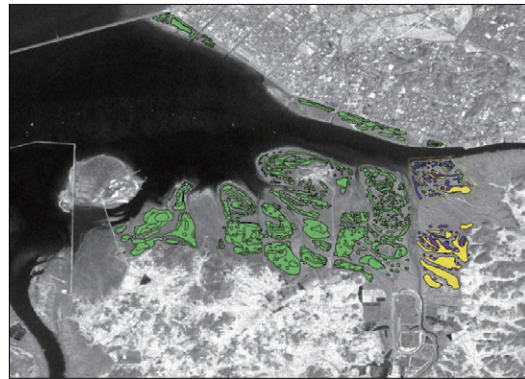


그림 3. 시화방조제 공사 이후의 시화호 지역 갯벌 식생의 공간적 분포 변화(2000년부터 2003년)

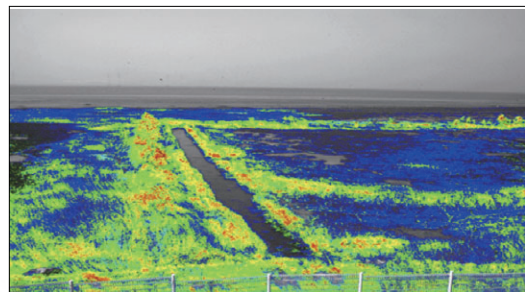


그림 4. 시화호 방조제 완공 이후 2008년 4월 현장관측에 의한 식생 조밀도 분석



그림 5. 현장조사에 의한 식생변화와 공간적 변화 사진(2005년3월11일과 2005년 5월24일)



그림 6. 시화호 북측간석지 2006년 4월22일과 2006년 8월3일 식생 분포



그림 7. 시화호 간석지 2007년 5월19일과 2006년 8월 1일(지상 20m 타워 촬영)

타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 시-공간적 특성은 그림 6의 시화호 북측간석지 2006년 4월22일과 2006년 8월3일 식생 분포에서도 구분되어 나타

나는데 길이 30-70cm의 칠면초, 나문재(그림 6의 왼쪽) 등이 성장하여 충분한 공간적 우점을 나타내는 과정에서 토양의 염분과 산성도가 봄 강우와 초

기 염생식물의 작용으로 급격히 변화하는 경향을 나타내고 있다. 그림 7은 시화호 간석지 2007년 5월 19일과 2006년 8월 1일에 지상 20 m 타워 촬영으로 식생의 공간 밀도와 분포적 특성을 나타낸 것이다. 봄과 여름시기의 성장에 따른 염생식물의 공간분포와 밀도의 변화는 시화호 만조선의 수준이 일정해지는 2005년부터 간석지의 식생분포에 확산 경향을 뚜렷하게 나타내고 있다.

현장조사기법에 의해서 시화방조제 내만의 갯벌 식생을 구분하는 것은 광범위한 공간 영역의 변화 경향을 구분하기 어려운 한계가 있다. 따라서 본 연

구에서는 위성영상에 의한 시계열 분석연구를 적용하기 위해 위성사진에 의해 광범위한 영역의 시-공간적인 변화를 관측하였다. 그림 8은 1996년부터 2003년까지 21개 Landsat 영상을 이용하여 연구 지역의 식생지역을 식생지수(NDVI)와 위색영상(Landsat 4, 3, 2밴드 합성)에 의해 식생지역을 구분하고 SAM(Spectral Angle Mapper) 분류기법에 의해 분석된 결과를 식생이 점유하는 비율로 제시하였다. 2003년부터 2010년까지의 식생공간 점유비율은 2003년 분포범위와 식생점유비율의 일정한 정도를 공간적 유지하고 있으며, 각 시기별 식생

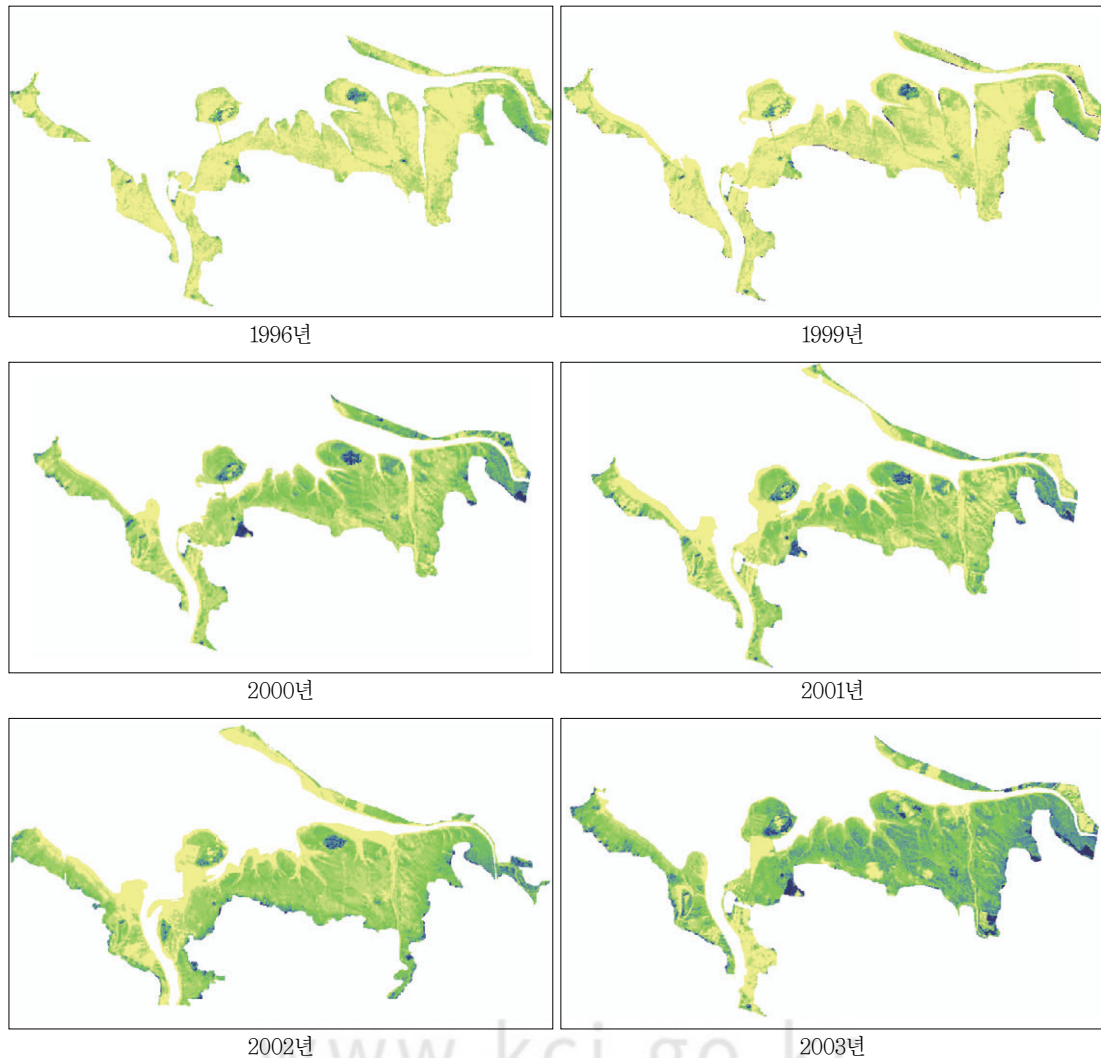


그림 8. 1996년부터 2003년까지 21개 Landsat 영상을 이용한 식생지역의 식생점유 비율 구분

공간 분포의 비율과 분포지역에 대한 공간분석을 수행한 위성자료의 분석결과는 현장 관측 자료에 의해 검증하였다. 그림 8의 결과와 같이 2000년 이후 식생의 분포지역과 분포 비율의 공간적 분포가 크게 증가하여 나타나고 있으며, 남측간석지의 식생밀도가 증가하는 경향이 가장 크게 나타났다(그림 8).

4. 결 론

장기적인 생태변화를 연구하는데 있어서 현장관측은 매우 중요하다. 또한 위성사진 자료 분석은 광범위한 공간 규모에서 자연경관의 해석과 공간적 변화를 관찰하는데 있어서 좋은 연구 자료가 되고 있다. 시화호, 남양만, 새만금, 대호 방조제 등 서해 연안의 다양한 연안매립과 개발은 연안지형과 연안 식생 경관의 변화를 초래하는데 갯벌식생의 연중 변화와 대규모 방조제 건설 등에 따른 식생의 공간적 변화와 기능적 역할을 해석하고 이해하는데 있어서 본 연구의 결과는 중요한 기초 자료가 될 것이다. 기후변화와 지역적인 장기간의 환경변화는 생물계절의 차이에 대해 동일한 지역에 대해서도 식생의 성장으로 발생할 수 있는 다양한 식생공간과 경관변화가 나타날 수 있다.

본 연구에서는 시화방조제가 완공된 이후 간석지의 광역적인 분포 범위를 구분하는 것과 식생 단위의 분포가 공간적으로 구분되는 것을 위성영상에 의해 분석된 결과를 10년간의 현장조사 자료를 제시하여 검증하고 공간적 분포를 확인하였다. 다양한 매체에 의해 촬영된 사진 정보를 이용하여 광역적 범위의 공간해상력과 시계열적인 범위의 변화를 공간적으로 구분하여 생태정보의 해석을 통한 연안 환경변화의 요소를 탐지하고 이를 환경영향평가의 요소 인자로 적용하는 것이 가능함을 파악할 수 있었다. 향후 위성정보의 탐지와 공간 분해능에 의한

구분 가능한 인자의 특성을 제시하고 이를 자연환경 조사와 환경영향평가 등 연안환경변화 모니터링을 위한 기초 기술로 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 안산시, 2001, 시화호 간척시 생태계 조사연구, 한국해양연구원.
- 엄기철, 2006, 지속가능한 국토연안축의 통합적 관리 방안, 국토논단, 국토연구원.
- 이원갑, 1999, 연안통합관리계획 수립을 위한 연구, 한국해양수산개발연구원.
- 조동오, 2001, 연안통합관리론, 해양환경·안전협회.
- 정종철 외, 2006, 다중시기 위성영상을 이용한 시화 방조제 내만 식생변화탐지, 한국환경과학회지 15(4), 373-378.
- 정종철, 2007, 다중분광영상에 의한 방조제 내만식생의 구분기술개발, 위성자료공공활용연구보고서, 공공기술연구원.
- 정종철 외, 2010, 다매체 사진정보에 의한 연안환경평가, 한국사진지리학회, 20(2), 41-49.
- 한국환경정책평가연구원, 2002, 자연경관관리정책에 관한 연구.
- 한국환경정책평가연구원, 2008, 국토연안생태네트웍 구축과 계획적 관리방안(I).
- 한국해양수산개발원, 1999, 경기만 권역 연안통합관리계획안.
- Clark, J., Banta, J. and Zim J., 1980, Coastal environmental management : Guidelines for conservation of resources and protection against storm hazard, The Conservation Foundation.