

계절별 위성자료를 이용한 미국 캔자스주 식생 분류*

- 하이브리드 접근방식의 적용 -

박선엽** · Stephen Egbert** · Dana Peterson** · Aimee Stewart*** · Chris Lauver**** ·
Kevin Price** · Clayton Blodgett***** · Jack Cully, Jr.***** · Glennis Kaufman*****

Kansas Vegetation Mapping Using Multi-Temporal Remote Sensing Data: A Hybrid Approach*

Sunyurp Park**, Stephen Egbert**, Dana Peterson**, Aimee Stewart***, Chris Lauver****,
Kevin Price**, Clayton Blodgett*****, Jack Cully, Jr.*****, and Glennis Kaufman*****

요약 : 미국 캔자스주 정부와 연방정부가 필요로 하는 상세한 지표피복 수치지도제작을 위해, Landsat Thematic Mapper 자료를 이용하여 캔자스주 전체를 대상으로 43가지로 분류된 식생군단(vegetation alliance) 수준의 자연식생지도를 제작하였다. 지도제작 방법으로는 봄, 여름, 가을의 계절별 위성자료를 이용하여 두 단계 분류절차를 거치는 이른바 ‘하이브리드(hybrid)’ 방식을 채택하였다. 이 접근 방법은 첫 단계로 unsupervised classification을 이용, 자연녹지를 농경지로부터 분리해 낸 다음, 두 번째 단계에서 supervised classification, 현장확인조사, 그리고 분류 후 다양한 보강자료를 이용하여 최종적으로 자연식생을 구분·분류해 내는 것이다. 정확도 평가는 세 가지 분류 수준에서 실행되었는데, 이는 앤더슨 분류단계 I(Anderson level I), 식생군계(vegetation formation), 그리고 식생군단 수준을 포함한다. 확인결과 전반적인 정확도는 51.7%에서 89.4%에 이르는 것으로 조사되었다.

주요어 : 자연식생지도, 하이브리드, 앤더슨 분류단계, 식생군계, 식생군단.

Abstract : To address the requirements of gap analysis for species protection, as well as the needs of state and federal agencies for detailed digital land cover, a 43-class map at the vegetation alliance level was created for the state of Kansas using multi-temporal Thematic Mapper imagery. The mapping approach included the use of three-date multi-seasonal imagery, a two-stage classification approach that first masked out cropland areas using unsupervised classification and then mapped natural vegetation with supervised classification, visualization techniques utilizing a map of small multiples and field experts, and extensive use of ancillary data in post-hoc processing. Accuracy assessment was conducted at three levels of generalization (Anderson Level I, vegetation formation, and vegetation alliance) and three cross-tabulation approaches. Overall accuracy ranged from 51.7% to 89.4%, depending on level of generalization, while accuracy figures for individual alliance classes varied by area covered and level of sampling.

Key Words : natural vegetation, hybrid, Anderson level I, formation, alliance.

* 본 논문은 미항공우주국(NASA)을 비롯한 미 연방정부 및 캔자스주 정부 산하 연구기관들의 연구비 지원에 따른 연구 결과 내용임. Dr. Stephen Egbert를 책임저자로 하여 영문으로 집필된 원고 내용을 수정·보완하여 국문으로 번역하였다.

** 미국 캔자스대학교 캔자스원격탐사연구소(Kansas Applied Remote Sensing Program), spark@ku.edu

*** 캔자스대학교 자연사박물관(Natural History Museum, University of Kansas)

**** U. S. Forest Service

***** Missouri Resource Assessment Partnership(Columbia, Missouri)

***** 캔자스주립대학교 생물학과(Department of Biology, Kansas State University)

1. 서론

생물다양성 파악을 위한 국가적인 노력의 일환으로 미국 지질조사국(United States Geological Survey) 산하 생물자원과(Biological Resource Division)는 생물다양성의 지표로 삼을 수 있는 인자들의 분포를 조사하기 위해 州단위의 프로젝트를 수행해오고 있다. 이를 위한 노력의 일환인 National Gap Analysis Program(GAP)은 다양한 생물자원정보를 구축하는 데 있어 가장 빠른 진전을 보이고 있는 분야이다. GAP은 지표 상에 분포해 있는 기존의 혹은 아직 파악되지 못한 동식물의 세부적인 종류와 그 변화를 알아내어 생물다양성의 현재상태 및 분포상황을 가늠할 목적으로 시행되고 있는데, 자연식생의 실제 분포는 생물다양성을 반영하는 주된 지표 중 하나로 사용되고 있다(Scott *et al.*, 1993). 이러한 목표를 만족시키기 위하여 GAP에서는 현존식생을 분류학적 기반위에서 지도화하는 작업을 전국규모로는 최초로 시도하였다. 생물자원에 대한 연구, 계획, 그리고 관리를 위한 식생분류에 대해서는 장기간의 논쟁이 있었지만, 최근에 와서야 생태계 및 경관특성을 식생종의 집단(assemblages of species)으로 구분할 수 있는 일반적 분류체계가 마련되었다(Grossman *et al.*, 1998; Jennings, 1993). 이러한 분류학적 구분이 가능해짐에 따라 생물다양성 감소와 같은 문제에 대해 과거 생태학적 접근이 갖던 한계를 극복할 수 있게 되었다.

원격탐사 자료를 이용한 종전의 식생분류는 많은 경우 단일계절 자료에 근거하여 제작되었다. 이는, 매우 높은 인공위성 자료 가격과 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 자료 처리 능력의 한계에 기인하였다. 전국규모의 식생분류도로는 미국 지질조사국이 제작한 전국지표피복구분도(National Land Cover Data, 이하 NLCD)를 들 수 있다. 이 지도는 미국 전체에 대한 공간적으로 연속적이며 일관된 지표피복구분을 제공하기 위해 제작되었는데, 입력자료로는 1990년대 초반에 취득된, 봄 혹은 가을철에 해당하는 Landsat Thematic Mapper(이하 Landsat TM) 단일계절자료가 사용되었다. 또한, NLCD의 식생분류 기준으로는 앤더슨 분류단계 II¹⁾가 적용되었으며, 분류기법으로는 unsupervised

및 supervised classification²⁾을 혼용한 하이브리드(hybrid) 방식³⁾이 채택되었다(Vogelmann *et al.*, 1998). 이러한 특성으로 해서, NLCD는 주단위 또는 여러 주에 걸친 지역적 단위의 자연환경 연구 자료로 유용한 장점을 지니고 있다. 그러나, 이것은 23개의 일반화한 분류구분에 바탕을 두고 있기 때문에, 보다 상세한 수준의 분류기준을 요하는 연구의 기초자료로는 부적합하다. 캔자스주의 경우, 최초로 수치화된 식생구분도가 1993년에 제작되었는데, 이 지도는 Landsat TM 단일계절 자료를 이용하여, 앤더슨 1단계 구분법에 의거하여 제작되었다(Whistler *et al.*, 1995; Whistler *et al.*, 1997). 앤더슨 1단계 구분법에 따른 분류는 식생의 형태적인 종류(초지, 삼림, 임지, 관목 등)를 단순하게 표현할 뿐, 식생의 분류학적 구분과는 거리가 있는 것이어서, 생태학적 연구를 위한 기초도구로 이용할 세밀한 식생분류도의 제작이 시급해졌다. 최근의 원격탐사 및 컴퓨터 기술의 발전, 그리고 인공위성 자료 가격의 상대적 하락으로 다계절, 대용량의 자료처리를 통한 식생분류가 효과적인 방법으로 대두되었다(Fuller and Parsell, 1990; Mauser, 1989).

계절별 위성탐사자료를 이용한 분류방법은 분류 정확도와 분류의 세밀도를 높이는 데에 효과적인 것으로 알려져 있다(Buttner and Csillag, 1989; Mauser, 1989; Fuller and Parsell, 1990; Fuller *et al.*, 1994). 캔자스주 남서부 Finney 카운티를 대상으로 수행된 90년대 중반의 연구결과는, 경작지로부터 초지를 분류해 내고, 경작지 중 작물종류를 구분하는데 있어 계절별 자료를 사용한 분류법이 매우 성공적인 기법으로 평가되었다(Egbert *et al.*, 1995; Price *et al.*, 1997). 이러한 계절별 자료를 사용한 주된 이유는, 식물생장의 계절별 특성이 식생종에 따라 다르다는 사실에 근거하여, 계절별 자료를 분석함으로써 식생종 간의 성장 차별성을 최대한 탐지할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 옥수수나 귀리와 같은 출파종작물들은 7월 위성자료 상에서 수변 식생이나 습지식생 종류(부들 늪지 cattail marsh, 큰골풀 늪지 bulrush marsh)와 흔히 유사한 반사 스펙트럼 특성을 갖는다. 그러나, 봄철의 위성자료를 추가하여 분석할 경우, 이들 혼동가능성이 있는 식생들 간의 차별성이 확연히 나타난다. 이는 봄철의 경우, 옥수수와 귀리 재배지는 봄철에 아직 성

장이 충분치 않아 토양이 드러나 보이기 때문이다.

캔자스주 GAP 프로젝트(이하 캔자스 GAP)의 일환으로 수행된 본 식생분류 연구는 농경지를 제외한 자연식생을 대상으로 하였다. 다계절 위성자료를 이용하여 90% 이상의 정확도를 갖는 Egbert *et al.*(1995)와 Price *et al.*(1997)의 식생분류 연구결과에 근거하여, 본 연구에서도 유사한 접근방법을 사용하여 자연식생을 분류하였다. 보다 상세한 식생분류를 위해, 본 연구에서는 자연식생을 군단(alliance)⁴⁾ 수준에서 분류했는데, 이는 한 가지 또는 두 가지의 우점종에 의해 대표되는 식물군집들의 집합을 의미한다(Lauver *et al.*, 1999; Stewart *et al.*, 2000). 식생군단 수준의 캔자스 GAP 식생지도는 단일계절 자료의 한계를 극복한 계절별 혹은 다계절(mutiseasonal) 자료를 이용하여 생물계절학적 특성(phenological characteristics)을 고려했다는 데에 큰 차이가 있으며, 자연식생과 농경지간의 분류오류를 최소화하기 위해 unsupervised 및 supervised classification 방식을 모두 사용한 하이브리드 방식을 적용하였다(Egbert *et al.*, 2001).

1) 연구지역 자연환경

미대륙 중앙에 위치한 캔자스주(그림 1)는 강수량이나 기온의 월별, 계절별, 연도별 변이가 상대적으로 큰 특징을 가지고 있다. 강수량은 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 증가하는 패턴을 보이며, 기온의 경우 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 증가한다. 75% 이상

의 강수가 식물생장기(4-9월)에 걸쳐 발생하나, 강수의 86% 이상이 증발산으로 가기 때문에 강수량이 적은 서부지역의 경우 가뭄에 취약한 조건을 가지고 있다. 이러한 여름철의 강수는 멕시코만으로부터 불어오는 계절풍에 많은 영향을 받고 있다. 지형적으로는 대체로 완만한 경사를 보이는데, 서쪽으로 갈수록 해발 고도가 높아져 콜로라도주 경계에 이르면 최고 1,231m에 달한다(Sophocleous, 1998).

캔자스주의 자연식생은 대부분 초지에 의해 대표된다. 캔자스 서부의 경우, 상대적으로 적은 강수량으로 인해 건조성 단초프래리(arid shortgrass prairies)가 우세하게 분포하고 있으며, 중부지역으로 갈수록 강수량이 증가함에 따라 식생분포도 장초와 단초프래리의 혼합지역(mixed-grass prairies)으로 접이한다. 연평균 강수량이 현저하게 높은 동부지역의 경우, 굴참-호두나무림과 같은 활엽성 삼림과 혼재하는 장초프래리가 우점종을 차지하고 있다. 이를 제외한 캔자스주의 서부 2/3 이상의 나머지 대부분 초지는 경작된 적이 없거나 주로 가축을 방목하는 용도로 이용되고 있다. 장초프래리 지역의 경우 역시 방목이 우세하나, 많은 면적에 걸쳐 목초지가 분포하고 있다. 캔자스는 또한 넓은 면적이 과거 경작지에서 지금의 토착종 또는 외래종 초지로 전환된 지역을 포함하고 있는데, 이는 미농무성에 의해 토양유실억제를 위해 1980년대 중반부터 시행되고 있는 농지보전 프로그램(Conservation Reserve Program, 이하 CRP)⁵⁾ 시행의 결과이다.

2) 연구목적

캔자스 생물연구소(Kansas Biological Survey)는 캔자스 생물군락의 보호와 생태적 관리를 위해 임시적인 식생분류도를 1989년에 제작한 바 있는데, 이 지도는 지질, 토양, 지형 등에 기반한 Küchler (1974)의 잠재자연식생도를 기준으로 한 것이었다. 캔자스 GAP 식생도의 분류체계는, 주정부, 연방정부, 학계의 협력자들과의 연계를 통해, 이러한 1989년의 시스템을 변환하여 만든 국가식생분류체계(National Vegetation Classification System)에 기반하고 있다(Anderson *et al.*, 1998; Grossman *et al.*, 1998). 이 새로운 분류체계는 삼림, 관목, 초본식물 등에 속하는 40 여가지의 식생군단을 포함하고 있

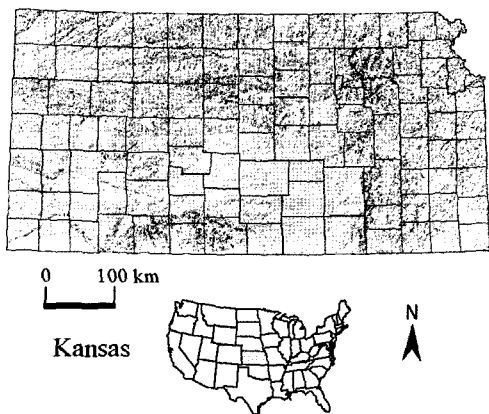


그림 1. 연구지역. 음영기복상을 중첩하여 표현하였다. 연구지역내 경계선은 각 카운티를 나타낸다

표 1. 캔자스 GAP 식생분류도에 나타난 식생 군단들의 국문명 및 학명(Lauver, et al., 1999)

식생군단 국문명	식생군단 학명
삼림 군단	
단풍-참피나무림	<i>Acer saccharum</i> - <i>Tilia americana</i> -(<i>Quercus rubra</i>) Forest Alliance
굴참-(북미산)호두나무림	<i>Quercus alba</i> -(<i>Quercus rubra</i> , <i>Carya</i> spp.) Forest Alliance
Post 굴참-(북미)참나무림	<i>Quercus stellata</i> - <i>Quercus marilandica</i> Forest Alliance
범람원 (북미) 호두나무림	<i>Carya illinoensis</i> -(<i>Celtis laevigata</i>) Temporarily Flooded Forest Alliance
범람원 물푸레-느릅-팽나무림	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> - <i>Ulmus americana</i> - <i>Celtis (occidentalis, laevigata)</i> Temporarily Flooded Forest Alliance
범람원 혼합 굴참나무림	<i>Quercus macrocarpa</i> - <i>Quercus bicolor</i> -(<i>Carya laciniata</i>) Temporarily Flooded Forest Alliance
낙엽삼림-채굴지	Dominants: <i>Populus deltoides</i> , <i>Salix</i> , <i>Ulmus rubra</i>
범람원 단풍나무림	Dominants: <i>Acer saccharum</i> , <i>Betula nigra</i>
상록삼림-교란지	Dominants: <i>Juniperus virginiana</i>
범람원 미루나무림	<i>Populus deltoides</i> Temporarily Flooded Forest Alliance
임지 군단	
범람원 (미중부)굴참나무림	<i>Quercus macrocarpa</i> Woodland Alliance
Post 굴참-(북미)참나무림	<i>Quercus stellata</i> - <i>Quercus marilandica</i> Woodland Alliance
혼합 굴참나무림(곡지)	<i>Quercus muehlenbergii</i> Woodland Alliance
낙엽수림	Moninants: <i>Maclura pomifera</i> , <i>Gleditsia triacanthos</i>
범람원 미루나무림	<i>Populus deltoides</i> Temporarily Flooded Alliance
관목 군단	
산쭉 관목	<i>Artemisia filifolia</i> Shrubland Alliance
버드나무 관목	<i>Salix exigua</i> Temporarily Flooded Shrubland
덤불형 늪지 관목	<i>Cephalanthus occidentalis</i> Semipermanently Flooded Shrubland Alliance
염생 삼나무 또는 위성류 관목	Dominants: <i>Tamarix</i> spp.
사면고지, 프레리 군단	
장초프레리	<i>Andropogon gerardii</i> -(<i>Sorghastrum nutans</i>) Herbaceous Alliance
샌드프레리	<i>Andropogon hallii</i> Herbaceous Alliance
서부산 개밀프레리	<i>Pascopyrum (Agropyron) smithii</i> Herbaceous Alliance
사암질 늪지/프레리	<i>Schizachyrium scoparium</i> - <i>Sorghastrum nutans</i> Herbaceous Alliance
혼합프레리	<i>Schizachyrium scoparium</i> - <i>Bouteloua curtipendula</i> Herbaceous Alliance
남서부 건조용 알칼리 프레리	<i>Sporobolus airoides</i> Herbaceous Alliance
혼합 프레리-교란지	Dominants: <i>Sporobolus</i> spp.
단초프레리	<i>Bouteloua gracilis</i> Herbaceous Alliance
잡초성 사면고지	Dominants: <i>Ambrosia artemisiifolia</i>
유입종 군단	
비토착종 초지	Dominants: <i>Bromus inermis</i> , <i>Festuca arundinacea</i> , <i>Andropogon bladhii</i>
CRP	Dominants: <i>Andropogon gerardii</i> , <i>Schizachyrium scoparium</i> , <i>Sorghastrum nutans</i> , <i>Panicum virgatum</i> , etc.
습지형 군단	
초지 플라야	<i>Pascopyrum smithii</i> Intermittently Flooded Herbaceous Alliance
염생 늪지/프레리	<i>Distichlis spicata</i> -(<i>Hordeum jubatum</i>) Temporarily Flooded Herbaceous Alliance
골풀 플라야	<i>Eleocharis macrostachya</i> Temporarily Flooded Herbaceous Alliance
플라야	<i>Polygonum</i> spp.- <i>Echinochloa</i> spp. Temporarily Flooded Herbaceous Alliance
저지 또는 습지 프레리	<i>Spartina pectinata</i> Temporarily Flooded Herbaceous Alliance
민물 늪지	<i>Typha</i> spp.-(<i>Scirpus</i> spp., <i>Juncus</i> spp.) Seasonally Flooded Herbaceous Alliance
큰골풀 늪지	<i>Scirpus pungens</i> Semipermnatly Flooded Herbaceous Alliance
부들 늪지	<i>Typha (angustifolia, latifolia)</i> -(<i>Scirpus</i> spp.) Semipermnatly Flooded Herbaceous Alliance
광엽초본 플라야	<i>Heteranthera limosa</i> Permanently Flooded Herbaceous Alliance
잡초성 늪지	Dominants: <i>Typha</i> spp., <i>Scirpus</i> spp., <i>Ambrosia</i> spp., <i>Rumex</i> spp.

다. 외래종의 유입, 농업이나 광산활동으로 인한 식생파괴 등을 포함한 캔자스 실제식생분포를 나타내기 위해, 캔자스 GAP 지도에서는 10가지의 훼손된 식생 및 인위적으로 관리되는 식생을 따로 분류하고자 하였다(표 1). 이러한 분류체계에 따라 본 연구는 계절별 위성자료를 이용하여 기존의 수치화된 캔자스 식생도를 갱신하고, 생태적 관리 목적에 부합하는 상세 식생 분류 프로토콜을 개발하는 데에 목적을 두었다.

2. 연구방법

캔자스 GAP 지도는 계절별로 서로 다른 세 시기에 취득한 Landsat TM 자료를 이용하여 제작되었다. 위성자료 분류의 정확도를 높이기 위해 본 연구에서는 두 가지 분류단계를 거쳤는데, 첫번째는 unsupervised classification을 이용하여 자연식생지역으로부터 경작지를 분리해 내는 작업이었다. 두 번째 단계에서는 현장조사 샘플에 근거한 supervised classification을 이용하여 1차 단계에서 분리된 자연식생을 분류하는 것이다. Supervised classification을 통한 구분이 완료된 후에는, 분류후 단계를 거쳐 최종적으로 지표식생지도를 수정·보완하였다. 지도의 정확도와 신뢰도를 높이기 위해, 분류후 육안대조, 지질도, 잠재식생도 등의 보강자료를 이용하여 보완작업을 추가하였다. 지도의 정확도 평가에는 현장확인, 크로스 태블레이션(cross-tabulation), 그리고 통계적인 지표를 사용하였다.

1) 연구 자료

캔자스 식생지도개발을 위한 주요 자료로는 Landsat TM 위성탐사자료가 사용되었다. 본 연구에 필요한 총 48개 영상의 Landsat TM자료는 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration)으로부터 수합하였다-이는 캔자스주 전체를 위해 필요한 16개 패스/로우(path/row), 그리고 각 패스/로우 별로 계절별 3개 영상을 포함한다. 분류에 사용된 각각의 위성영상자료는 캔자스 식물생장기간에 걸쳐 봄, 여름, 가을에 해당하는 세 날짜를 선정하여 취득하였다. 날짜별 자료를 선정함에 있어서는, 우선적으로 위성탐사자료의

표 2. 각 패스/로우의 계절별 Landsat TM 자료 취득 시기

패스/로우	봄철 이미지	여름철 이미지	가을철 이미지
26/34	3/23/92	6/27/92	8/14/92
27/32	5/01/92	8/18/92	8/21/92
27/33	5/23/94	7/10/94	9/28/94
27/34	4/10/96	7/13/95	9/28/94
28/32	5/30/94	7/30/93	9/16/93
28/33	4/09/93	7/30/93	9/16/93
28/34	4/22/92	7/30/93	9/16/93
29/32	4/16/93	6/30/97	9/13/95
29/33	4/03/94	6/26/92	8/19/92
29/34	6/14/91	7/18/92	8/19/92
30/32	5/28/94	8/16/94	9/17/94
30/33	5/06/92	7/25/92	9/27/92
30/34	5/06/92	7/25/92	9/27/92
31/32	4/01/94	8/07/94	9/08/94
31/33	4/01/94	7/22/94	9/08/94
31/34	4/27/92	8/01/92	9/02/92

표 3. 식생분류를 위해 사용된 보강자료

보강 자료	출처
잠재자연식생도	Küchler(1974)
지표수문관리 자료	Kansas Department of Health and Environment
SSURGO	USDA/Natural Resources Conservation Service
캔자스 지표피복도	Kansas Applied Remote Sensing Program(Whistler et al., 1995)
토지조사체계	Kansas Geological Survey
지형·지질지역 구분도	Kansas Geological Survey

유무를 파악한 후, 구름에 의한 자료손실이 가장 적은 시기를 택하였다. 대부분의 경우(16개 패스/로우 중 10개), 같은 연도의 계절별 자료취득이 가능하였다. 나머지 패스/로우에 대해서는 2개 연도 혹은 3개 연도에 걸친 계절별 자료를 사용하였다(표 2). 위성탐사자료 이외에 사용된 자료로는 잠재식생지도를 비롯한 6가지의 보강자료가 있는데, 이들을 표 3에 제시하였다. 이들 자료들은 반사스펙트럼 특성을 이용한 통계적 분류과정과 분류후 수정작업을 위해 사용되었다. 분류체계의 측면에서 볼 때, 분류지도는 식생군단 수준의 총 43개 분류

클래스를 갖게 디자인하였으며, 최종결과물은 Arc/Info의 Grid 포맷으로 하였다.

2) 자연식생지도의 제작

위성탐사자료가 확보된 후에는, 각 영상에 대한 자료전처리(preprocessing)를 행하였는데, 이에에는 자료의 질 평가, 자료량의 축소, 복사보정(radimetric correction), 기하보정(rectification), 자료적출(subsetting), 자료마스킹(masking) 등을 포함하였다. 일련의 자료전처리가 완성된 다음에는 두 단계에 걸친 자료분류과정을 거쳤으며, 최종적으로 분류후 수정작업(post-classification refinement)을 수행하였다. 일련의 자료처리 절차를 그림 2에 나타내었다.

(1) 자료전처리(data preprocessing)

총 7개의 스펙트럼 밴드를 가진 Landsat TM 자

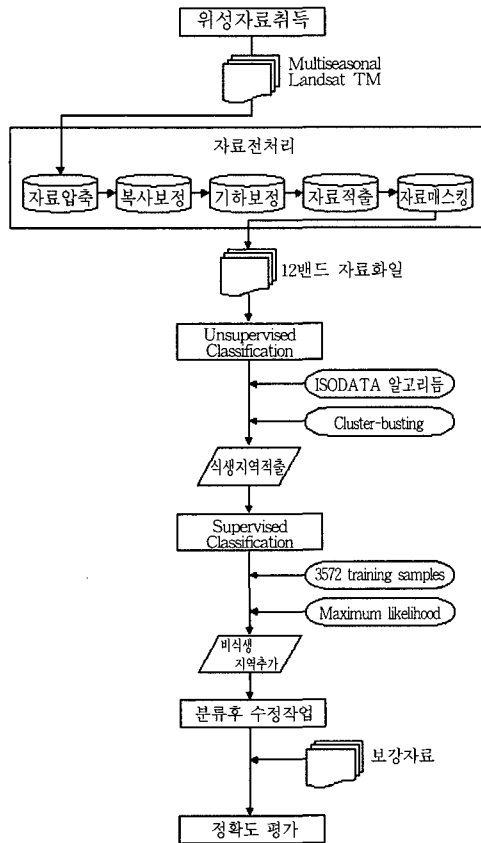


그림 2. 연구 자료 처리 과정도

료의 양을 축소하기 위해 분류의 최적화를 위한 밴드 선별을 시도하였다. TM 자료의 6개 밴드(열적외선 밴드 TM6 제외) 중, 밴드 상호 상관관계를 최소화하면서 밴드들의 설명력을 최대화하기 위한 방법으로 Optimal Index Factor(OIF)를 사용하였다. 이는, 유사한 정보를 지닌 밴드간의 자료 중복을 줄이고, 연구 대상물의 분류를 효과적으로 수행하기 위한 자료압축 기법의 하나이다(Jensen, 1996, p.97-100). 캔자스 지역에서 수행된 이전 연구결과에 의하면, Landsat TM 3, 4, 5, 7번 밴드가 연구지역의 식생 분류에 가장 효과적인 것으로 분석되었다(Egbert *et al.*, 1995). 통상, OIF 값이 가장 높은 3개의 밴드 조합이 최소의 데이터 중복을 가지며 대부분의 정보를 담고 있다고 알려져 있으며, 본 연구지역의 경우, 밴드 3, 4, 5, 7을 통한 밴드 조합이 꾸준히 가장 높은 OIF 값을 보였다.

계절별 위성자료의 경우, 자료 취득 시기마다 상이한 대기간섭 효과를 최소화하기 위해 복사보정을 필요로 한다(Hill and Sturm, 1991). 본 연구에서는 Chaves(1988)의 improved dark-object subtraction technique을 적용하였다. 이 방법은 각 위성자료 취득 당시의 대기상태에 따라 상대적인 대기산란 모델을 적용하여 haze와 같은 복사강도 저해요인을 제거해낸다. 자료의 기하보정을 위해서는, 각 패스/로우 영상을 Universal Transverse Mercator(UTM) 투영법에 따라 좌표설정을 하였다. 이를 위해 최소 50개의 좌표기준점(ground control points)을 선정, 큐빅 컨벌루션법(cubic convolution)⁶⁾을 이용하여 각 화소의 좌표값을 내삽하였다. 보다 정확한 기하보정을 위해서 토지조사체계(PLSS)⁷⁾에 따른 1:100,000 축척의 디지털 라인 그래프를 기준자료로 참고하였다. 각 패스/로우의 계절별 위성자료 중, 한 영상의 기하보정이 완료된 후에는, 이 보정된 자료를 나머지 2개 영상의 보정을 위한 기준으로 이용하였다. 기하보정을 수행함에 있어서 본 연구에서는 각 화소의 위치오차가 0.5화소(15m) 이내로 계산되도록 하였다. 기하보정을 마친 후에는, 4개 밴드의 조합으로 된 각 패스/로우 영상을 계절별로 합하여 모두 12개의 밴드를 갖는 하나의 자료파일로 구성하였다. 이렇게 만들어진 각 단계별 자료화일이 다른 인접 패스/로우와 중복되는 것을 최소화하기 위해, 서로 겹치는 가장자리 자료

를 부분적으로 제거하여(subsetting) 추가적인 자료 축소효과를 얻었다. 다음으로는 도시지역, 하천, 호소 등의 비식생지역을 가려내기 위해 매스킹 작업을 실시하였다. 이를 위해, 기존의 캔자스 지표피복도 제작과정(Whistler *et al.*, 1995)에서 생성된 매스킹 화일을 사용하여 이들 지역을 가려내었다.

(2) 분류 1단계: unsupervised classification

분류 1단계에서는 12밴드로 합쳐진 계절별 자료 각 영상에 대해 ISODATA 군집분석 알고리즘을 통한 unsupervised classification을 이용하여, 스펙트럼 특성을 반영한 100개의 초기 클래스를 생성하였다. 각 패스/로우의 계절별 자료에 구름의 영향이 없는 경우에는 12개 밴드 모두 분류과정에 사용되었고, 하나 혹은 그 이상의 계절자료에 구름에 의한 자료손실이 있는 경우에는, 구름과 그에 따른 그늘지역을 디지털화하여 제외시킨 후, 나머지 자료에 대해 분류를 수행하였다. 구름에 의한 간섭이나 자료손실이 있는 지역은 따로 분리하여 구름의 영향이 없는 날짜에 해당하는 밴드만을 취합하여 분류작업을 수행하였다.

Unsupervised classification에 의해 구분된 각 클래스에 대해서는, 세 계절 자료를 컴퓨터 모니터에 동시에 출력한 뒤, 해당 군집과 동일위치에 있는 지표피복종류를 판독하여, 경작지, 자연식생, 또는 혼동클래스 중 하나로 분류하였다. 혼동클래스에 대해서는 '클러스터-버스팅(cluster-busting)⁸⁾' 기법을 적용하였는데(Jensen *et al.*, 1987; Richards,

1984), 이는 unsupervised classification에 의해 혼동클래스로 구분된 지역을 다시 원하는 수 만큼의 클래스로 추가분류하는 방법이다. 추가 분류된 이들 세부 하위 클래스들은 각각 경작지나 자연식생으로 분류되어 앞서 분류된 클래스와 합쳐졌다. 1차적인 분류과정이 완료된 후에는, 분류된 각 화일 별로 육안을 통해 분류의 오류가 있는지 확인하여, 오류가 발생한 경우 스크린 디지털화, 화소값 변경(recoding) 등의 수작업을 통해 이를 바로잡았다. 수작업이 끝난 후에는, 경작지를 제외한 자연식생 지역만을 추출하여, 이어지는 2단계 자연식생 분류과정에 사용되었다(그림 3).

(3) 분류 2단계: supervised classification

2단계 분류과정은 1996년부터 1998년까지 3년간에 걸쳐 수집된 3572 지점의 현장조사자료를 분류표본자료(training data)로 하여 supervised classification을 이용하여 수행되었다. 각 위성화상마다 식생 종류별로 최소 15지점의 현장표본자료를 수집하였다. 현장조사자료수집을 위해서 USGS 1:100,000 축척의 지형도를 참고로 사용했으며, 앞의 1단계 분류결과로 만들어진 지도를 투명 셀룰로이드에 같은 축척으로 인쇄하여 이를 지형도 위에 중첩할 수 있게 한 다음, 현장조사 활동을 돕는 가이드 역할을 하게 하였다.

식생종류별 현장표본자료수집을 위한 방법으로 섹션라인⁹⁾ 도로를 따라 격자형으로 자료를 수집하는 규칙적(systematic) 샘플방식을 채택하였다. 각 위성화상별로 나타나는 우점종들의 공간적 변이를 가급적 잘 포함할 수 있도록, 도로를 따라 약 10-12km 간격으로 현장조사를 실시하였다. 단, 저습지와 같이 공간적으로 흔히 나타나지 않는 식생의 경우에는, 규칙적인 간격에 구애받지 않고 관찰될 때마다 현장데이터를 수집하였다. 방대한 연구지역의 넓이에 비해 제한된 인력과 시간조건을 고려하여, 현장조사차량을 이용하여 가급적 신속한 조사작업이 되도록 노력하였다. 각 표본조사지에서는 다음과 같은 정보를 수집하였다: 군락 또는 군단 수준의 식생 종류; 식생상태나 전반적인 조건(방목의 강도, 외래종의 침투여부 등); Global Positioning System(GPS, Garmin GPS II Plus, KS, USA)을 이용한 지리적 좌표.

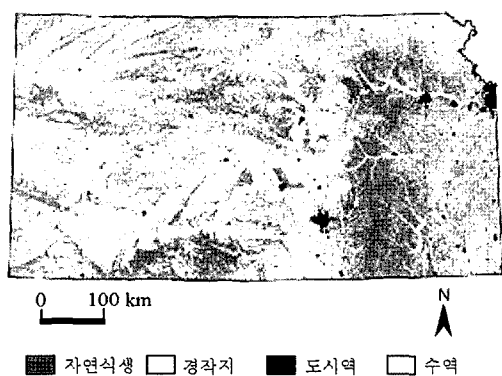


그림 3. 다계절 Landsat TM 자료를 이용하여 unsupervised classification을 통해 1차적으로 분류한 지표피복지도

현장조사자료를 바탕으로 각 패스/로우 위성자료를 배경으로 하여 표본지역을 스크린 디지털화하였다. 현장조사자료 이외에 백터화된 PLSS 자료를 추가적인 참고자료로 하여 표본지역 선정의 정확도를 높였다. 입력된 표본지역의 반사 스펙트럼 특성은 이후 maximum likelihood classification¹⁰⁾에 의한 supervised classification의 준거자료로 사용되었다. 원칙적으로 supervised classification에 의한 분류는 사용된 표본지역의 수만큼 클래스의 숫자가 결정된다. 그러나, 분류결과 같은 종류로 구분된 클래스들은 하나로 합쳐져 결과적으로 식생군단 수준의 식생구분지도가 만들어진다. 최종적으로, 앞서 언급한 비식생지역과 2차 분류에서 제외되었던 경작지를 모두 추가하여 2단계 식생분포도를 완성하였다.

(4) 분류후 수정작업

2차분류결과에 따라 주전체 식생분포도가 완성된 뒤에는, 캔자스 생물연구소의 생태학자, 생물학자, 그리고 캔자스 원격탐사연구소 연구팀에 의한 세밀한 조사평가가 이어졌다. 40개 이상의 서로 다른 식생군단들의 분포를 한 지도에서 자세히 살펴보기 어렵기 때문에, 하나의 지도마다 제한된 수의 식생종류들을 인쇄하여 조사함으로써 육안조사사용이하도록 하였다(Tufte, 1983; Tufte, 1990; Tufte, 1997). 한 지도당 2-4개 종류의 식생군단을 배정하여, 모두 15장의 지도를 출력하여 식생분포의 타당성을 조사·평가하였다(그림 4). 이 방법을 통해 2차분류과정에서 발생한 오류를 비교적 쉽게 찾아내었고, 보다 정밀한 분석이 필요한 지역에 대해서는 각 패스/로우별로 컴퓨터 모니터를 통해 추가적인 확인작업이 수행되었다.

분류후 수정작업으로는, 위성자료의 처리와 GIS 모델링 기법을 사용하였다(Egbert *et al.*, 2001). 일부 수정작업의 경우, 전체 주 혹은 카운티 단위로 진행되었으나, 대부분의 과정에서는 패스/로우별로 진행하였다. 이를 위해, 다수의 보강자료들이 사용되었는데(표 3), 예를 들어 Küchler의 잠재자연식생도(Küchler, 1974)는 캔자스주 남서쪽에 분포하는 장초프래리와 혼합프래리 간의 경계를 구분하는데 사용되었다. 이 지도는 단초프래리 지역에 과장되게 분류된 샌드프래리와 산쑥프래리 분포를

바로잡는 데에도 사용되었다. 캔자스주 지표수 자료(Surface Water Information Management System, Kansas Department of Health and Environment, 1996)는 범람원지역에 걸쳐 과장되어 분류된 삼림을 조정하기 위해 사용되었다. 또, 수치 토양 자료(Soil Survey Geographic 데이터베이스, Natural Resources Conservation Service, USDA, 1998)는 서부지역의 플라야 분포를 확인하는 데에 사용되었다.

이 과정에서 분류상 가장 문제점으로 지적된 식생종류는 CRP였다. 현장조사에서 취득한 표본자료를 이용하여 supervised classification에 의해 CRP를 분류하고자 했으나, 분류결과는 만족스럽지 못했다. 여기에 대한 주요 원인으로는, CRP가 형태상 자연초지로 전환된 경지지만, 자연적인 지표피복(land cover)이 아닌 토지이용임을 들 수 있다¹¹⁾. 따라서, CRP 내에 존재하는 다양한 종류의 초지종류로 인하여 2차분류과정에서 구분된 다른 초지식생군단들과 혼동되는 결과를 낳았다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구에서는 분류후 차이분석(post-classification differencing)기법을 이용하여 CRP 초지를 구분해 내었다(Egbert *et al.*, 1998). 이를 위해서, 앞서 설명한 1차분류 결과 얻은 경작지-자연식생 구분 지도와 그 보다 몇 년 전에 만들어진 캔자스 토지이용 패턴(Kansas Land Cover Patterns, KLCP) 지도(Whistler, *et al.*, 1995, 1997)를 이용하여, 이 두 지도 간의 차이를 파악함으로써 CRP의 분포를 지도화 하였다. 즉, KLCP 지도에서는 경작지였던 곳이 GAP 1차 분류지도에서 자연식생지역으로 전환된 곳은 CRP로 간주되었다.

3) 정확도 평가

정확도평가작업은 캔자스 주전체에 걸쳐 현장조사를 통해 모아진 829개의 샘플을 분류결과와 비교함으로써 이루어졌다. 샘플지점으로는, 도로교차지점을 기준으로 인접한 구석지점을 무작위로 선정하였다. 이는 샘플지점간 이동시간을 최소화하며, 차량을 통한 이동으로 전체적인 현장조사작업 시간을 단축하고자 하는 목적에 유리한 방법이다(Edwards *et al.*, 1998). 현장조사에서 파악한 정보로는 1, 2, 3 순위 우점종을 차지하는 식생군단 종류, GPS 좌표, 조사지점에 대한 간략한 설명과 스케치 등을 포함하였다. 이러한 정보는 현장조사 직

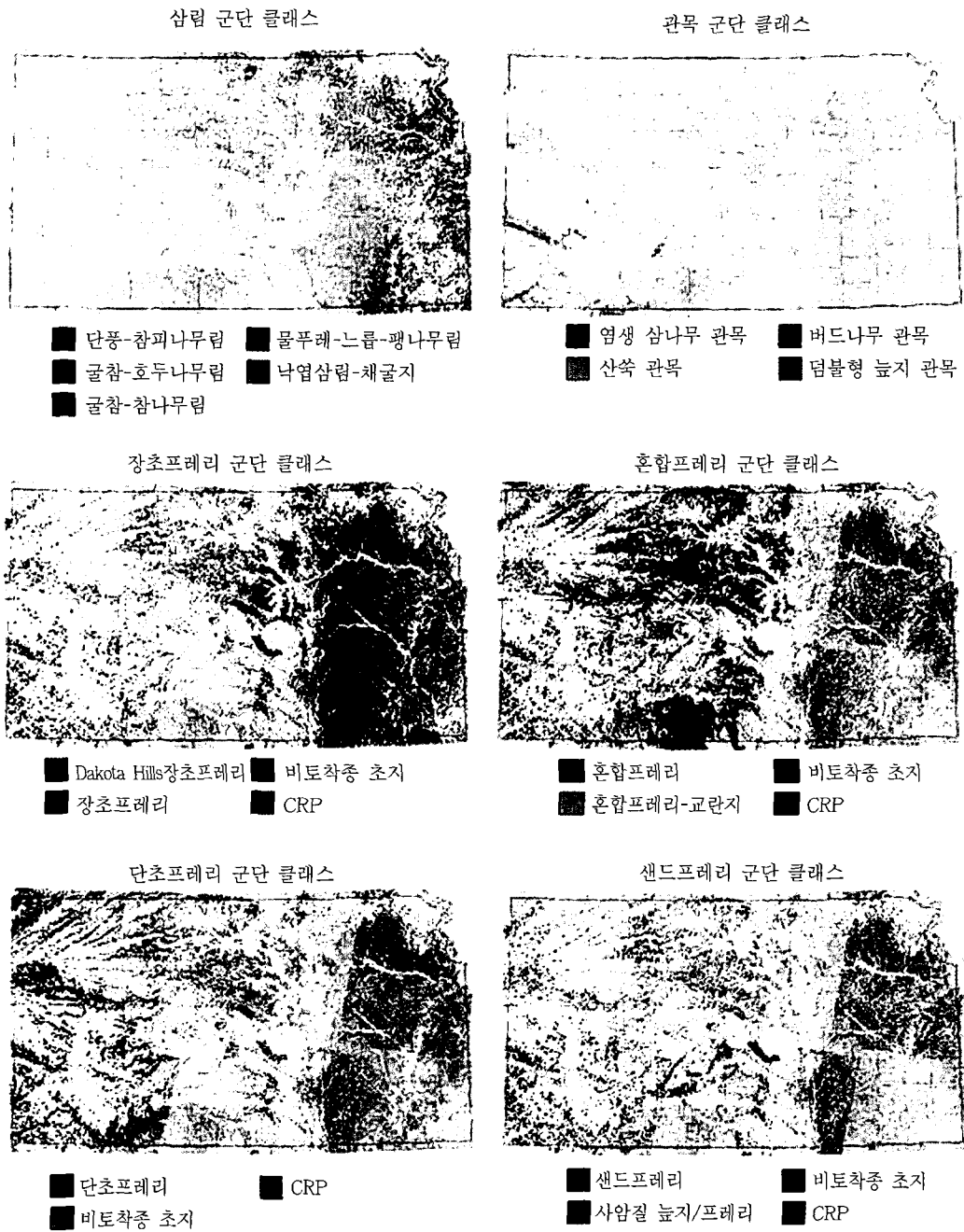


그림 4. 식생군단 수준으로 분류된 식생도의 각 분류구분 평가를 위해 제작된 그룹별 식생분포도의 예

후 데이터베이스에 입력되었으며, 각 현장조사지점의 분포는 Arc/Info 포인트 파일로 만들어져 이후 현장조사지역을 디지털화하는데에 중요자료로

사용되었다. 각 조사지점은 다각형의 벡터파일로 디지털화하였는데, 두 가지의 식생군단 종류가 동시에 나타나는 지점에 대해서는 각각에 대해 서

로 다른 두 개의 다각형으로 디지털화하였다.

분류정확도를 계산함에 있어서는, 세 가지 다른 비교방법을 적용하였다. 첫째, 각 디지털화된 샘플지점의 중심화소에 대하여 분류결과와 현장샘플을 비교하였다. 두번째, 각 중심화소와 그 주위 8개 인접화소(3-by-3 window)에 대하여 분류결과와 현장샘플을 비교하였다. 마지막으로, 각 중심화소를 중심으로한 3-by-3 window에 대하여 최빈치(focal majority)를 선정하여 이를 샘플과 비교하였다. 분류정확도 파악수준으로는, 식생군단 수준(Grossman *et al.*, 1998) 이외에도, 보다 단순화된 식생군계 수준(Grossman *et al.*, 1998), 그리고 앤더슨 분류단계 I(Anderson *et al.*, 1976) 등 모두 세 가지 수준에 대해 수행되었다. 식생군계 수준과 앤더슨 분류단계 I의 분류 클래스는 가장 세밀한 분류구분인 식생군단 수준의 클래스들을 단순화하여 생성하였다. 정확도 계산을 위해 이 세 가지 수준의 식생분류도에 대해, 분류된 클래스와 현장샘플

을 비교하여 크로스-테블레이션을 실시하였다. 본 연구에서 분류정확도를 나타내기 위한 방법으로는 통상적인 두 가지의 분류구분별 오류지표, 즉 errors of omission(혹은 제작자 중심 정확도)과 errors of commission(혹은 사용자 중심 정확도)¹²⁾, 이를 합산한 전체정확도, 그리고 Kappa(khat) 통계치가 사용되었다(Congalton and Green, 1999; Story and Congalton, 1986).

3. 연구결과 및 논의

캔자스 GAP 프로젝트의 최종 결과물인 식생분류도는 캔자스주 자연식생에 대한 수치화된 정밀 지도로서는 처음으로 제작된 것이다(그림 5). 본 장에서는 분류결과 나타난 식생분포의 전체적인 패턴과 분류 정확도에 대해서 논의하고자 한다.

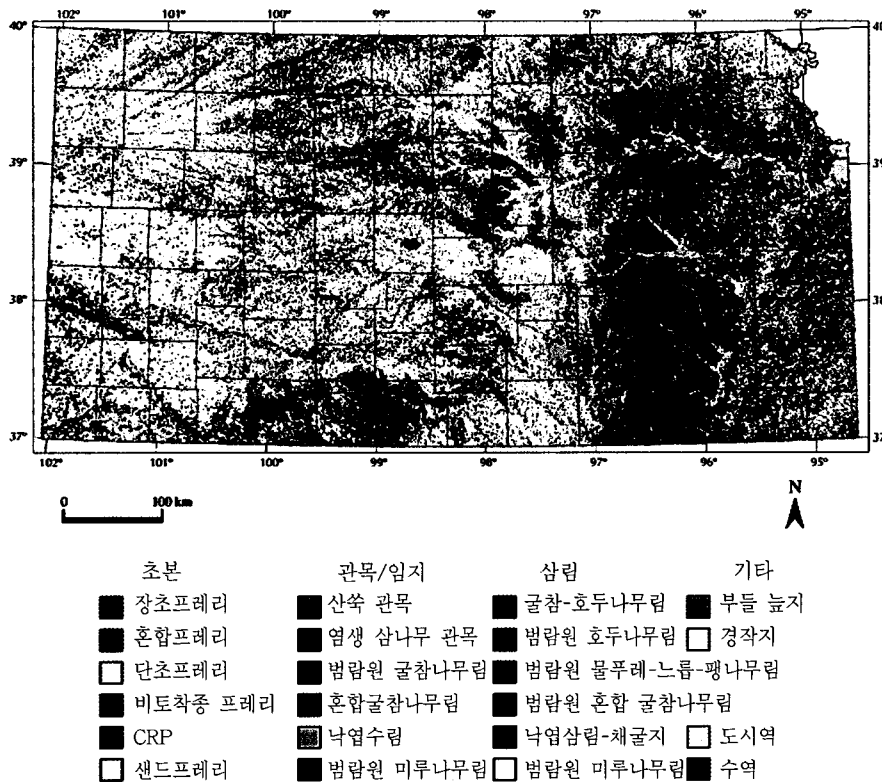


그림 5. 최종 캔자스 식생분류도. 43개의 식생군단 구분중 주요 분류구분만을 발췌하여 범례에 표시하였다

1) 식생 분포 패턴

전반적인 캔자스 주 지표피복의 공간적 패턴이 그림 5를 통해 잘 나타났다. 전형적인 농업활동의 결과로 약 48% 이상의 면적이 농경지로 이용되고 있으며, 기타 인간활동이 반영된 CRP 등의 비토착종 초지지역은 단초프레리나 혼합프레리 지역의 면적을 넘어섰다. 자연식생의 경우, 장초프레리, 단초프레리, 혼합프레리가 주 전체의 경관을 지배하는 것으로 나타났으며, 이들을 모두 합치면 전체 면적의 약 26%를 차지하였다. 범람원지역 삼림이 목본식생 분포의 대부분을 차지하였으나, 주 동부 지역에서는 상당한 면적에 걸쳐 참나무류의 삼림이 분포하였다. 육안으로도 지형·지질·기후 특성에 따른 식생의 공간적 분포 패턴이 선명하게 파악되었다. 예를 들어, 토양층이 얇고 농업활동이 적은 동부 초지지역의 경우, 토착 장초프레리가 우세하게 나타났으며, 점이지역인 남동부에서는 혼합프레리가 전형적으로 나타났다. 캔자스 동부지역은 삼림, 장초프레리, 외래종 초지, 경작지 등이 동시에 복잡하게 섞여 분포하는 특징을 보여주었다. 반면에, 캔자스 남서부지역은 단초프레리, 산쭉류 관목, CRP, 대규모의 경작지 등으로 특징 지워졌다.

이러한 현존식생분포 패턴은 초기정착민들의 유입 이래로 연구지역의 토지이용 및 지표피복의 변화가 빠른 속도로 진행된 것을 보여준다. 현재의 농경지는 대부분 자연초지인 프레리로부터 전환된 점을 감안할 때, 농업활동으로 인한 자연초지의 감소가 현격히 일어났음을 알 수 있다. 19세기 이전부터의 토지이용변화 뿐만 아니라, 최근의 변화를 파악하기 위해 Peterson *et al.*(2001)은 Küchler 잠재식생분포도, KLCP 지도(Whistler *et al.*, 1995), 그리고 캔자스 GAP 지도를 상호 비교하였다. 잠재식생분포도와 GAP 지도의 비교를 통해 역사적 측면의 토지이용변화를 살펴본 결과, 장초프레리의 약 50%에 이르는 면적이 비토착종 초지, 농경지로 전환되었고, 특히 혼합프레리는 장초 프레리보다 더 많은 면적에 걸쳐 농지로의 전환이 이루어졌다. 이는 토양층이 깊지 못하고 암석층으로 인해 비교적 농경이 어려운 장초프레리 지역보다 혼합프레리 지역이 농업에 적합했기 때문이다. 이러한 일련의 농업활동에도 불구하고 이들 프레리 지역의 면적은 현재 주전체의 23%를 차지하고 있다.

1993년에 제작된 KLCP 지도와 GAP 지도를 비교해 보면, 약 80% 정도의 면적이 최근 8-10년 동안 토지이용 변화없이 유지되어 온 것으로 나타났다. 최근의 주된 토지이용변화로는, 초지에서 경작지로, 경작지에서 초지로, 그리고 초지에서 삼림으로의 전환이 주를 이루었다. 분류후 변화포착 기법(post-classification change detection)을 이용한 분석에 따르면, 100만 헥타르 이상의 농지가 초지로 되돌려졌는데, 이는 USDA의 토지보전프로그램 시행의 결과다. 자연초지 또한 160만 헥타르에 달하는 면적이 농경지로 전환된 것으로 나타났다. 지난 8-10년간 초지가 농지로 전환된 추이를 살펴볼 때 이는 실제에 비해 과장된 수치인 것으로 판단된다. 위성자료의 기하학적 불일치(misregistration errors) 등에 의한 결과가 토지이용변화의 오류로 나타났을 것으로 보인다. 이 밖에도 주요한 변화는 삼림 면적에서 나타났다. KLCP 지도에서는 불과 2.7%로 나타났던 삼림면적이 캔자스 GAP 지도에서는 8%로 증가하였다. 자연적인 증가/감소분(식생천이, 외래종 침입, 산불 등)에 의한 변동이 한 요인이 될 수 있겠으나, 지리적으로 제한된 분포를 감안할 때, 다른 요인들도 함께 고려되어야 할 것으로 사료되었다. 두 지도제작과정에서의 분류기법 차이에 의한 오류도 그 중 한가지로 판단되었다. KLCP 지도는 GAP 지도와 달리 unsupervised classification에 의존해서 제작된 것이다. 이 지도에서는 unsupervised classification 이후, 항공사진과의 비교를 통해 임목밀도 80% 이상에 대해서만 삼림으로 분류했기 때문에 삼림면적이 과소추정(underestimation)되었을 가능성이 높다.

2) 정확도 평가

표 4는 각 분류 수준에 따른 평균 정확도를 보여주고 있으며, 앤더슨 분류단계 I과 식생군단 수준의 분류 클래스별 정확도 평가 결과는 표 5와 6에 각각 나타나 있다. 여기에는 각 분류 클래스에 대한 제작자중심, 사용자중심 정확도가 포함되어 있다. 대부분의 경우, 세 가지 계산방법에 따른 결과는 비슷한 정확도를 보여주었다. 각 분류 클래스별 자세한 비교분석표는 캔자스 GAP 프로젝트 최종보고서(Egbert *et al.*, 2001) 또는 캔자스 지질연구소 내 자료지원센터 웹사이트(<http://gisdasc.kgs>),

표 4. 분류 단계별 평균 정확도

분류 레벨	비교 방법	평균 정확도	Kappa
앤더슨 단계 I	point	88.0%	0.66
	3-by-3 window	88.3%	0.65
	focal majority	89.4%	0.69
식생군계 수준	point	64.5%	0.52
	3-by-3 window	64.5%	0.52
	focal majority	66.2%	0.54
식생군단 수준	point	49.3%	0.43
	3-by-3 window	49.8%	0.44
	focal majority	51.7%	0.46

표 5. 분류 구분에 따른 앤더슨 분류 단계 I 정확도(%)

분류 구분	point		3-by-3 window		focal majority	
	참가오류	누락오류	참가오류	누락오류	참가오류	누락오류
초본	93.9	92.2	93.6	93.1	94.4	93.6
경작지	82.9	68.0	81.1	65.8	81.0	68.0
삼림/임지	65.3	82.1	66.3	78.9	69.9	83.3
관목	45.5	48.4	48.5	47.0	51.6	51.6

ukans.edu)를 통해 찾아볼 수 있다.

평균 정확도 결과(표 4)에 나타나듯이, 원하는 분류클래스의 숫자는 궁극적으로 지도의 용도에 따라 결정되어야 할 것으로 보인다. 앤더슨 분류단계 I에서 평균 정확도는 88-89%에 이르는 반면, 식생군계 수준에서는 64-66%로 떨어졌다. 가장 세밀한 식생군단 수준에서는 정확도는 더욱 낮아져서 평균 정확도는 49-51%에 머물렀으나, 주요한 개별 분류 클래스(예, 장초프래리, 혼합프래리)에 대해서는 평균치를 상회하는 결과를 얻었다.

정확도 평가결과를 정확히 이해하기 위해서는 몇 가지 유념해야 할 사항이 있다. 우선, 정확도 평가를 위해 800개가 넘는 지점에 대해 현장조사가 이루어졌지만 주전체 면적과 분류된 식생 종류의 숫자를 감안하면 충분치 않은 샘플수일 수가 있다는 점이다. 본 연구를 위해 원래 디자인된 현장조사 방법은 시간과 인력, 그리고 샘플링 기법의 면에서 훨씬 종합적이고 신뢰성 높은 것이었으나, 연구비확보의 문제로 인해 조사지점의 수를 줄인 대체방법을 적용할 수밖에 없었다. 효과적인 샘플의 숫자에 대해 논한 글들이 다수 있으나, Congalton and Green(1990, pp.17-19)은, 연구지역의 크기에

따라 분류 구분당 50-100개의 조사지점이 필요하다는 대략적인 가이드라인을 제시하였다. 이에 따르면, 본 연구지역의 경우, 약 2000-4000개의 현장조사샘플이 필요하다는 결론이 나온다. 전체 43개의 분류구분 중 30개에 대해서는 10개 미만의 샘플만이 조사되었고, 단지 11개 구분에 대해서 25개 이상의 샘플이 조사되었다. 이러한 한계에도 불구하고, 가장 많은 현장조사샘플이 얻어진 지역은 가장 넓은 면적을 차지하는 식생 종류, 즉 장초프래리(106개 샘플), 혼합프래리(125개 샘플), 단초프래리(106개 샘플), 비토착종 초지(105개 샘플), CRP(131개 샘플)에 속하였다.

본 연구의 목적상 비경작지에 대한 식생구분에 관심을 두었기 때문에, 경작지에 대한 현장조사는 비중있게 다루어지지 않았다. 경작지에 대한 현장조사는 정확도 평가 계획에 포함되지는 않았으나, 현장조사과정 중 가까이 발견되는 지점에 대해서만 간헐적으로 현장표본을 취하였다. 경작지에 대한 정확도는 상대적으로 높게 나타났으나, 이는 표본지점의 숫자가 현저히 적다는 점을 감안할 때, 실제 정확도에 비해 오히려 낮은 수치라고 사료된다. 도시지역과 수역에 대한 표본조사 역시 거의 이뤄지지 않았는데, 이는 1993년 KLCP 지도에서의 이들 분포를 대부분 GAP 지도에 적용하였고, 이미 정확도가 85%를 상회하였기 때문이다.

4. 결론

본 연구의 기본 목표는 가능한 모든 식생종류의 구분을 식생군단 수준에서 수행하는 것이었다. 이는, 세밀한 수준의 식생분류를 통해, 지도 사용자의 필요에 따라 세밀한 분류구분을 그대로 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 경우에 따라서 분류구분을 단순화, 혹은 일반화하여 그 목적에 맞는 2차적인 지도를 만들 수 있게 하자는 취지였다. 분류 결과, 분류수준이 높아짐에 따라 평균 분류정확도는 낮아졌지만, 주전체에 걸쳐 상세하게 분포하는 식생군단의 경우 비교적 높은 분류정확도를 나타내었다. 식생군단 수준으로는 처음으로 제작된 GAP 지도는 목표한 바, 주전체의 생물다양성을 파악하기 위한 자연식생의 분포와 현황을 보여주는 유용

표 6. 식생군단별 분류 정확도(%).

식생군단 국문명	point		3-by-3 window		focal majority	
	첨가오류	누락오류	첨가오류	누락오류	첨가오류	누락오류
단풍-참피나무림	na	na	na	na	na	na
굴참-(북미산)호두나무림	26.3	71.4	25.7	71.4	26.3	71.4
Post 굴참-(북미)참나무림	38.5	71.4	49.4	68.3	46.2	85.7
범람원 (북미) 호두나무림	0.0	0.0	0.0	0.0	na	0.0
범람원 물푸레-느릅-팽나무림	42.3	34.4	41.0	33.3	41.4	37.5
범람원 미루나무림	8.3	100.0	11.4	100.0	12.5	100.0
범람원 혼합 굴참나무림	0.0	na	0.0	na	0.0	0.0
범람원 (미중부)굴참나무림	0.0	0.0	0.0	0.0	na	0.0
혼합 굴참나무림(꼭지)	0.0	0.0	15.7	61.1	40.0	100.0
Post 굴참-(북미)참나무림	50.0	33.3	31.8	25.9	33.3	33.3
범람원 미루나무림	25.0	36.4	25.2	31.3	30.8	36.4
산속 관목	46.9	51.7	48.1	49.4	51.6	55.2
버드나무관목	na	na	na	na	na	na
덤불형 늪지 관목	na	na	na	na	na	na
장초프레리	48.0	68.9	49.1	72.0	47.6	73.6
샌드프레리	61.1	39.3	61.6	40.1	61.1	39.3
서부산 개밀프레리	10.0	8.0	15.1	12.9	15.8	12.0
사암질 늪지/프레리	na	na	na	na	na	na
혼합프레리	43.2	63.7	41.6	64.6	44.4	70.2
남서부 건조용 알칼리 프레리	na	na	na	na	na	na
단초프레리	68.0	48.1	68.8	48.4	66.2	44.3
초지 플라야	na	na	na	na	na	na
염생 늪지/프레리	na	na	na	na	na	na
골풀 플라야	na	na	na	na	na	na
플라야	na	na	na	na	na	na
저지 또는 습지 프레리	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
민물 늪지	na	na	na	na	na	na
큰골풀 늪지	0.0	na	0.0	na	0.0	0.0
부들 늪지	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
광엽초본 플라야	na	na	na	na	na	na
비토착종 초지	60.0	42.9	62.1	45.2	69.1	44.8
CRP	68.0	50.4	69.1	48.3	76.4	51.9
염생 삼나무 또는 위성류 관목	0.0	0.0	0.0	0.0	na	0.0
경작지	82.9	68.0	81.1	65.8	81.0	68.0
낙엽수림-채굴지	50.0	0.0	39.1	0.0	0.0	100.0
범람원 단풍나무림	na	na	na	na	na	na
상록삼림-교란지	na	na	na	na	na	na
낙엽수림	0.0	0.0	0.0	0.0	na	0.0
혼합프레리-교란지	14.3	0.0	18.1	0.0	0.0	19.2
잡초성 늪지	50.0	33.3	19.0	14.8	0.0	0.0
잡초성 사면고지	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

*na : 현장 샘플이 없거나 분류결과가 없음.

한 도구가 될 것으로 보인다.

지표피복을 정확히 분류해 내는 일은 그 본질상 매우 복잡한 과정이지만, 캔자스 초지의 경우, 방목, 목초지, 농약을 이용한 제초, 화전 농법 등 지속적인 인위적 간섭으로 인해 토지이용분류에서의 어려움이 가중되었다. 이러한 식생종에 따른 반사스펙트럼 특성 차이를 상쇄할 만큼의 영향을 미치지 않기 때문에, 위성자료를 이용한 식생구분에 큰 장애요인으로 작용한다. 자연식생분류 외에도, 본 연구는 다양한 보강자료와 분류후 수정작업을 거쳐 인위적 간섭이 있는 지역의 식생 분포(외래종 등)를 파악하였다. 이를 통해, 보다 실제 식생분포에 가까운 식생분류체계와 지도를 구현하고자 하였다. 분류결과, 인간활동에 의해 발생하는 분류상의 혼동을 피하고, 분류 정확도를 높이기 위해서는, unsupervised 및 supervised classification에 의한 1, 2차 분류 작업 이후에, 상당량의 수정과정이 불가피하다는 결론을 얻었다. 한 가지 주목할 만한 결과는, CRP지역을 성공적으로 분류해 낸 것이었다. 기존의 농지로부터 초지로 전환된 CRP는 캔자스주 전체 토지면적의 4.9%를 차지하게 되었다. 3.6%를 차지하는 단초 프레리, 1.3%를 차지하는 산썩류 관목에 비교할 때, 야생동물의 잠재적인 서식처로서의 기능을 갖는 CRP의 향후 역할에 관심이 모아지고 있다(Berthelsen and Smith, 1995; Kantrud, 1993; Roseberry *et al.*, 1994).

본 분류결과에 나타나 있듯이, 식생군단과 같은 세밀한 수준에서 식생분류를 시도할 경우, 다계절 위성자료만을 가지고서는 만족할 만한 정확도를 얻기 힘들다. 토양, 지질, 수문자료 등 보강자료 외에도 해당 연구지역의 식생, 지표피복에 대한 폭넓은 경험과 전문적인 지식이 뒷받침되어야 성공적인 분류 결과를 기대할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 어려움에도 불구하고, 분류상의 세밀함이나 공간적 해상도의 잇점으로 인해 캔자스 GAP 지도는 앞으로 다양한 분야에 걸친 분석 도구로 광범위하게 이용될 것으로 전망된다. 한 예로, Lauver *et al.*(2000)은 Küchler의 잠재식생분포도와 함께 캔자스 GAP 지도를 분석하여 캔자스의 식생변화의 성격과 그 정도를 조사한 바 있다. 이들에 의하면, 630만 헥타르에 이르던 장초프레리의 70%가 경작지, 도시지역으로 전환되거나 다른 목분류에 의해 대

체되었다. 반면에, 200만 헥타르에 달하는 면적이 아직 원래의 프레리로 남아있는데, 특히 캔자스주 동부지역에 광범위하게 분포하고 있다. 유사한 맥락에서, Peterson *et al.*(2001)은 10년 전에 제작된 식생분포도와 GAP 지도를 비교하여 최근의 식생 변화에 주목하였다. 분석결과, 넓은 면적의 경작지가 농지보전 프로그램으로 인하여 CRP 초지로 전환되었고, 동부지역의 경우 삼림면적이 지속적으로 증가하고 있었다. 특별히, Egbert *et al.*(2001)은 CRP로의 토지이용변화에 따른 식생의 경관구조변화를 보다 자세하게 분석하였다. 이들에 따르면, CRP는 초지의 총면적을 증가시킨 효과 뿐만 아니라 개별 식생지역의 내부면적(core area)과 식생간 연결성을 증대시킴으로써 야생동물의 서식처로서의 잠재적 가치를 가질 것으로 보였다. 아울러, Wardlow와 Egbert(2001)는 최근, 미국지질조사국이 제작한 NLCD 지도(Vogelmann *et al.*, 1998; Vogelmann *et al.*, 2001)와의 비교를 통해, NLCD 지도가 캔자스주 초지면적을 2백만 헥타르 가량 과추정하고 있음을 알아내고, 이는 지도제작에 사용된 위성자료와 분류방법이 서로 다르기 때문인 것으로 보였다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 우리나라 현존 식생도 대부분은 현장직접조사를 통해 조사자가 지형도 위해 식생의 경계를 그려 만든 것인데, 이러한 자료들은 조사자의 주관적 판단, 많은 조사시간, 조사시기에 따른 식생변화 등 여러 한계점을 가지고 있다. 따라서, 시간과 비용면에서 효율적이며 지표피복변화에 따른 갱신이 유리한 위성자료 기반의 수종별 식생분류 필요성이 증가하고 있다. 개발과 생태적 교란으로 인한 산림자원에의 위협에 직면하여, 국내에서도 산림자원을 효과적으로 보전하고 관리하기 위해 자연식생도 작성에 착수하였다. 특히, 환경부문의 기초자료로 이용될 식생분류도는 빈번한 산림자원변화에 효율적으로 대처하기 위해 위성자료에 기초한 방법론에 근거해 제작하도록 계획하고 있다. 최근 한국환경정책평가연구원(전성우, 정휘철, 1999)의 기초연구에 따르면, 최적의 수종별 식생분류를 위해서는 다계절 위성자료, GPS를 통한 정확한 현장표본자료, 그리고 다양한 지리적, 생물학적인 보강자료 등이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 같은 연구에서, 기복이 심

한 산악지형의 특성을 감안할 때, 분류결과에 대한 지형변화의 영향을 파악하고 그 결과를 반영해야 할 필요성도 지적하였다. 이와 같은 국내 수종별 분류가능성에 대한 한국정책평가연구원의 제언은 본 연구에서 사용한 일련의 방법론과 유사한 부분을 다수 수용하고 있다. 앤더슨 단계 II 식생군계, 또는 식생군단 수준의 식생분류에 대해서는 아직 외국사례를 검토하거나 기초조사 단계에 있는 상황에서, 본 연구결과는 이후 위성자료를 이용해 진행될 우리나라 식생분류 기법에 대한 많은 적용가능성을 시사한다.

총 5년 6개월의 장기간에 걸쳐 제작된 캔자스 GAP 지도는, 인력 면에서도 5명의 공동연구책임자, 9명의 자료분석요원, 그리고 8명의 현장조사 전문가의 참여로 제작된 실로 방대한 작업의 결과라 할 수 있다. GAP 프로젝트 최종결과물의 내용으로는, 자료설명(metadata)이 첨부된 수치식생지도, 제작법과 정확도 평가를 담은 최종보고서, 그리고 플로터로 인쇄한 지도 등이다. 앞서도 언급된 바 있듯이, 본 연구를 통한 식생 분류가 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었던 데에는, (1) 봄, 여름, 가을의 계절별 위성자료의 사용, (2) 1차적으로 경작지를 분류해 낸 다음, 자연식생지역에 초점을 두고 2차 분류를 행했던, '하이브리드' 분류법의 적용, (3) 여러 장의 지도에 각각 한정된 종류의 식생구분만을 부분적으로 인쇄하여 그 공간적 분포를 현장조사 전문가들을 통해 검토한 점, (4) 다양한 보조자료를 통해 분류후 수정·보완 한 점과 같은 방법 상의 장점이 중요하게 작용한 바 크다.

감사의 글

본 연구를 위한 미항공우주국의 재정적 후원에 감사드린다. 캔자스 GAP 지도제작에 공동 참여한 캔자스원격탐사연구소와 캔자스생물연구소의 연구원, 분석요원, 현장조사 전문가 모두에게 감사드린다. 저자 일동은 또한 본 연구를 가능케 했던 캔자스주 정부, 그리고 연방정부 산하의 여러 기관의 재정적, 인력 면에서의 도움에 감사드린다: the Kansas GIS Policy Board; the Kansas Department of Wildlife and Parks; the Kansas Biological

Survey; Kansas State University; the National Aeronautics and Space Administration; the Biological Resources Division of the U.S. Geological Survey; the U.S. Environmental Protection Agency, Region 7; and the National Park Service.

註

- 1) Anderson을 중심으로 한 United States Geological Survey(USGS)는 1970년대 중반에 원격탐사자료에 적용할 목적으로 토지이용분류체계를 고안했는데, 지금까지 세밀한 부분에 대한 보강이 이루어져 왔으나 주요 골격은 그대로 유지된 채, 현재까지도 널리 사용되고 있다 (Anderson *et al.*, 1976). 분류단계가 올라감에 따라 보다 세밀한 세부구분으로 나누어지는데, 단계 I과 II 전국 혹은 卍단위 규모에 적합하며, 단계 III과 IV는 지역적, 카운티, 혹은 그 이하 규모의 토지이용 구분에 적합하다. 앤더슨 분류 단계 I은 경작지, 삼림, 초지, 수역, 도시역, 습지 등을 포함 모두 9개의 클래스를, 단계 II는 이보다 더 세분화된 37개의 클래스를 갖는다(Lillesand and Kiefer, 2000, pp.208-211).
- 2) 지표사상의 분류과정에서, 분류하고자 하는 대상에 대한 현장표본을 사용하고자 할 때, 그 대상의 전형적인 표본 지역을 선정하여 그 지역의 반사스펙트럼 밴드별 특성에 기준하여 전체자료를 분류하는 것을 supervised classification이라 한다. 반면에, 표본지역을 사용하지 않는 경우, unsupervised classification이라 한다.
- 3) 분류정확도를 높이거나 분류과정을 효율화하기 위해, unsupervised classification과 supervised classification을 결합한 분류방법을 말한다. 하이브리드 분류기법은 지표의 각 분류 클래스의 반사 분광 패턴이 다양하게 나타나는 식생분류에 종종 적용된다(Lillesand and Kiefer, 2000, p.559-560). 본 식생분류는 자연식생에 초점을 맞추었으므로, 경작지와 자연녹지간의 혼동을 막기 위해 1차적으로 unsupervised classification을 사용하여 경작지를 자연 녹지로부터 분리해내었다.
- 4) 본 연구에 사용된 분류체계는 유네스코(UNESCO, 1973)의 형식을 골자로 한 것인데, 이는 모두 7개의 분류단계를 포함하고 있다: 클래스(class), 그룹(group), 하위그룹(subgroup), 식생군계(formation), 식생군단(alliance), 식생군집(community). 이 중, 식생군계는 형태적으로 분류할 때, 가장 높은 구분단계에 해당한다. 수관의 형태, 식생의 높이, 분포지의 표고 범위(elevational zone), 수문학적 조건, 공존하는 식생의 종류 등에 근거하여 서로 유사한 성격을 갖는 식생군을 하나의 구분단위로 설정한다. 이보다 한 단계 높은 분류구분을 식생군단이라 하며, 이 단계 이상의 분류는 형태가 아닌 분류학적인 기반 위에서 이루어진다. 면적 상으로 가장 우세한 식생종을 공유하는 식생군집의 집합체를 말한다(한국생물과학협회, 2000; Grossman *et al.*, 1998; Lauver *et al.*, 1999).

- 5) CRP는 미국 역사상 가장 빠르고 큰 규모로 토지이용변화를 초래하였는데, 지금까지 약 1400만 헥타르의 농경지가 1986년부터 1995년 사이에 자연초지, 삼림, 그리고 기타 보전용도로 전환되었다. 미농무성의 기준에 의해 허가된 농지는 약 10년간의 기간동안 자연초지로 관리되는데, 이에 대해 농지소유주는 일정액의 보상금을 해당기간동안 수령하게 된다. 캔자스주에서는 1992년까지 약 120만 헥타르의 경작지가 CRP로 전환되었으며, 이를 통해, 14% 정도의 초지면적이 증가하였다(Wildlife Legacy Partners, 1994). CRP의 유지여부는 경지소유주에 대한 정부의 보상금 사정에 따라 결정되기 때문에, 통상적으로 CRP는 영구적인 초지로 간주되지 않는다. 그러나, 공간적으로 넓은 면적을 차지하고 있고, 야생동물의 잠재서식처로서의 가치를 지니고 있는 점을 감안하여, 본 연구에서는 CRP 경지를 하나의 독립된 초지종류로 분류하였다.
- 6) 원격탐사자료의 지리적 좌표수정을 위해 일반적으로 사용되는 좌표변환법 중 하나이다. 변환될 자료의 화소좌표가 이미 설정된 좌표기준점에 대해 어떤 방식으로 계산·변환되느냐에 따라 크게 nearest-neighbor, bilinear interpolation, cubic convolution법으로 나뉜다. 이 중, cubic convolution법은 가장 복잡한 알고리즘을 가지고 있고, 아마도 가장 널리 사용되는 방법으로 알려져 있다. 간략히 이에 대해 서술하면, 한 화소의 변환좌표값을 정확하게 추정하기 위해 해당 화소와 인접한 16개의 이웃 화소값에 가중치를 주어 그 평균값을 변환되는 화소의 좌표값으로 설정하는 방법이다(Campbell, 2002, pp.305-307).
- 7) 부동산 등기나 소유권의 법적 정의를 제공하기 위해 소유지의 상대적, 절대적 위치와 그와 관련된 소유권, 주소, 재산세, 부동산 평가 자료 등을 담은 미국토지조사체계를 가리킨다(Lo and Yeung, 2002, pp.55).
- 8) 초기의 unsupervised classification에 의해 확연히 분류되지 못한 화소들을 다시 하위의 클래스들로 분류하는, 이른바 'unsupervised classification 内の unsupervised classification'라 할 수 있는 기법이다. 이러한 연속적인 unsupervised classification 이후에도 분류가 어려운 화소들이 생기지만, 그 비율은 현저히 낮아진다(Jensen, 1996).
- 9) 미국토지의 거래, 조사, 관리를 위해 만들어진 법률적 토지관리기준체계를 Public Land Survey System이라 부른다. 각 카운티 토지는 동서방향의 range와 남북방향의 township에 의해 구분되는데, 각 range, township은 36개의 section이라 불리우는 가로, 세로 1.6km(1mile) 정방형의 토지로 이루어져 있다. 이런 격자형 구분체계의 특성에 따라 주요도로들이 이 section line을 따라 나 있다. 따라서, 본 연구에서는 이동이 용이한 색선라인도로를 따라 규칙적인 간격으로 현장조사를 하도록 디자인하였다.
- 10) 원격탐사자료를 분류하는 대표적인 방법으로, '최대우도법(最大尤度法)'이라 불리기도 한다. 각 화소의 반사스펙트럼을 표본지역의 그것과 비교할 때, 표본지역의 반사스펙트럼의 밴드별 특성을 통계적으로(평균, 분산 등) 분석하여, 같은 종류에 속할 확률이 가장 높은 집단에 그 화소를 분류해 넣는 방법을 말한다(Campbell, 2002, pp.342-343).

- 11) 많은 경우, 인위적인 지표경관에 국한하여 사용하는 '토지이용(land use)' 과 지표사상의 일반적인 종류를 표현하기 위해 사용되는 '지표피복(land cover)' 이 서로 구분 없이 사용되지만, 여기에서는 글의 맥락상 이 두 가지를 구분하여 사용한다. 일반적으로 '지표피복'은 지표사상의 자원적 성격(resource-oriented)에 중점을 두고 있고, '토지이용'은 인간활동(human-activity-oriented)에 보다 중점을 두고 있다(Lillesand and Kiefer, 2000, pp.208; Jensen, 1996, pp.200).
- 12) 전통적인 의미에서 분류의 정확도는, 하나의 분류구분(category)에 대해, 바르게 분류된 지도상의 화소 숫자를 현장샘플에 해당하는 같은 분류구분의 총 화소 숫자로 나눈 것으로 표시해왔다. 이는 특정 지역의 한 분류구분에 대해 잘못 분류된 화소 숫자를 제외한 정확도를 나타낸다는 의미에서 '누락오류(errors of omission)'라 부른다. 특정지역이 얼마나 정확하게 분류되었느냐에 관심이 있는 지도제작자의 입장을 고려하여 이를 '제작자중심 정확도(producer's accuracy)'라 부르기도 한다. 반면에, 지도이용자들은 특정 분류구분 A가 지도 전체에 걸쳐 얼마나 정확한 지에 관심이 있기 때문에, 지도분류가 100% 정확하지 않다면, 분류구분 A의 일부 화소는 잘못 분류된 것이다. A로 분류된 지도상의 화소 숫자 중 실제와 다른 화소 숫자의 비율을 계산하면 A로 잘못 분류된 정도를 나타낼 수 있다. 따라서 이 수치는 실제에 대한 분류구분 A의 과추정(overestimation)치를 보여주며, '첨가오류(errors of commission)'로 불리기도 한다. 지도이용자의 입장에서 이는 분류된 지도의 신뢰도를 나타내며, 제작자중심 정확도에 대비하여 '사용자중심 정확도(user's accuracy)'라고도 알려져 있다(Story and Cor.galton, 1986).

文 獻

- 전성우, 정휘철, 1999, 생태자연도 작성 및 활용을 위한 원격탐사기법 연구 II-식생분류도 작성을 중심으로, 기본과제 연구보고서, 한국환경정책평가연구원, 서울, 51-97.
- 한국생물과학협회, 2000, 생물학 용어집, 아카데미출판사, 서울.
- Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T., and Witmer, R.E., 1976, A land use and land cover classification system for use with remote sensor data, *Geological Survey Professional Paper 964*, U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- Anderson, M., Bourgeron, P., Bryer, M.T., Crawford, R., Engelking, L., Farber-Langendoen, D., Gallyoun, M., Goodin, K., Grossman, D.H.,

- Landaal, S., Metzler, K., Patterson, K.D., Pyne, M., Reid, M., Sneddon, L., and Weakley, A.S., 1998, International classification of ecological communities: terrestrial vegetation of the United States, Vol. II, *The National Vegetation Classification System: list of types*, The Nature Conservancy, Arlington, Virginia.
- Berthelsen, P.S. and Smith, L.M., 1995, Nongame bird nesting on CRP lands in the Texas Southern High Plains, *Journal of Soil and Water Conservation*, 50, 672-675.
- Buttner, G. and Csillag, F., 1989, Comparative study of crop and soil mapping using multitemporal and multispectral SPOT and Landsat Thematic Mapper data, *Remote Sensing of Environment*, 29, 241-249.
- Campbell, J.B., 2002, *Introduction to remote sensing*, The Guilford Press, New York.
- Chavez, P.S., 1988, An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479.
- Congalton, R.G., and Green, K., 1999, *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Edwards, T.C., Moisen, G.G., and Cutler, D.R., 1998, Assessing map accuracy in a remotely sensed, ecoregion-scale cover map, *Remote Sensing of Environment*, 63, 73-83.
- Egbert, S.L., Price, K.P., Nellis, M.D., and Lee, R., 1995, Developing a land cover modelling protocol for the high plains using multi-seasonal Thematic Mapper imagery, in *Proceedings, ACSM/ASPRS 95 Annual Convention and Exposition*, Charlotte, North Carolina 3: 836-845.
- Egbert, S.L., Lee, R., Price, K.P., Nellis, M.D., and Boyce, R., 1998, Mapping Conservation Reserve Program (CRP) lands using multi-seasonal Thematic Mapper imagery, *Geocarto International*, 13, 17-24.
- Egbert, S.L., Peterson, D.L., Stewart, A.M., Lauver, C.L., Blodgett, C.F., Price, K.P., and Martinko, E.A., 2001, *The Kansas GAP land cover map: final report*, Kansas Biological Survey Report No. 98. (38 pp., plus appendices).
- Egbert, S.L., Park, S., Stewart, A.M., Peterson, D.L., Lauver, C.L., Price, K.P., and Martinko, E.A., 2001, Landscape structure and the U.S. Conservation Reserve Program on the Central High Plains, *ASPRS 2001: Gateway to the New Millennium*. St. Louis, Missouri, April 23-27.
- Fuller, R.M., Groom, G.B., and Jones, A.R., 1994, The land cover map of Great Britain: an automated classification of Landsat Thematic Mapper data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 553-562.
- Fuller, R.M. and Parsell, R.J., 1990, Classification of TM imagery in the study of land use in lowland Britain: practical considerations for operational use, *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1901-1917.
- Grossman, D.H., Faber-Langendoen, D., Weakley, A.S., Anderson, M., Bourgeron, P., Crawford, R., Goodin, K., Landaal, S., Metzler, K., Patterson, K.D., Payne, M., Reid, M., and Sneddon, L., 1998, The National Vegetation Classification System: development, status, and applications, in The Nature Conservancy, *International classification of ecological communities: terrestrial vegetation of the United States. Volume I*, Arlington, Virginia.
- Hill, J. and Sturm, B., 1991, Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring, *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1471-1491.
- Jennings, M.D., 1993, Natural terrestrial cover classification: Assumptions and definitions, Gap Analysis Technical Bulletin 2. Idaho Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, University of Idaho, Moscow, Idaho.
- Jensen, J.R., Ramsey, E.W., Mackey, H.E., Christensen,

- E.J., and Shartz, R.R., 1987, Inland wetland change detection using aircraft MSS data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 521-529.
- Jensen, J.R., 1996, *Introductory digital image processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kansas Department of Health and Environment, 1996, Surface Water Information Management System (SWIMS)(<http://mapster.kgs.ukans.edu/dasc/datalog/coredata.html>).
- Kantrud, H.A., 1993, Duck nest success on Conservation Reserve Program land in the prairie pothole region, *Journal of Soil and Water Conservation*, 48, 238-242.
- Kuchler, A.W., 1974, A new vegetation map of Kansas, *Ecology*, 55, 586-604.
- Lauver, C.L., Kindscher, K., Faber-Langendoen, D., and Schneider, R., 1999, A classification of the natural vegetation of Kansas, *The Southwestern Naturalist*, 44, 421-443.
- Lauver, C.L., Stewart, A.M., Egbert, S.L., Martinko, E.A., Price, K.P., Peterson, D.L., Park, S., and Blodgett, C.F., 2000, Just how much tallgrass prairie is left?-Analysis of current and historical land cover in Kansas, National GAP Meeting 2000, San Antonio, Texas.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.P., 2000, *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York.
- Lo, C.P. and Yeung, A.K., 2002, *Concepts and techniques of geographic information systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Mausser, W., 1989, Agricultural land-use classification in the Upper Rhine Valley using multitemporal TM data, *Proceedings, Workshop on Earthnet Pilot Project on Landsat Thematic Mapper Applications*, Workshop held December 1987, Frascati, Italy.
- Peterson, D.L., Stewart, A.M., Egbert, S.L., Lauver, C.L., Martinko, E.A., Price, K.P., and Park, S., 2001, Identifying and understanding land use/land cover changes in Kansas, *ASPRS 2001: Gateway to the New Millennium*, St. Louis, Missouri, April 23-27.
- Price, K.P., Egbert, S.L., Nellis, M.D., Lee, R.Y., and Boyce, R., 1997, Mapping land cover in a High Plains agro-ecosystem using a multi-date Landsat Thematic Mapper modeling approach, *Transactions of Kansas Academy of Sciences*, 100, 21-33.
- Richards, J.A., 1984, Thematic mapping from multitemporal image data using the principal components transformation, *Remote Sensing of Environment*, 16, 35-46.
- Roseberry, J.L., Richards, B.J., Hollenhorst, T.P., 1994, Assessing the potential impact of Conservation Reserve Program lands on Bobwhite habitat using remote sensing, GIS, and habitat modeling, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 1139-1143.
- Scott, J.M., Davis, F., Csuti, B., Noss, R., Butterfield, B., Groves, C., Anderson, H., Caicco, S., Dierchia, F., Edwards, Jr., T.C., Ulliman, J., Wright, R.G., 1993, Gap analysis: A geographic approach to protection of biological diversity, *Journal of Wildlife Management*, 57, supplement, Wildlife Monographs No. 123.
- Sophocleous, M., 1998, Water resources of Kansas-a comprehensive outline, in M. Sophocleous(eds.), *Perspectives on sustainable development of water resources in Kansas*, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, 5-16.
- Stewart, A.M., Peterson, D.L., Egbert, S.L., Price, K.P., Blodgett, C.F., Park, S., Lauver, C.L., Martinko, E.A., and Cully, J., 2000, Land cover mapping for GAP: A hybrid classification approach to identifying the vegetation of Kansas, *Proceedings, ASPRS 2000, Annual Meeting of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Washington, DC, May 23-26.
- Story, M. and Congalton, R.G., 1986, Accuracy assessment: a users perspective, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 397-399.

- Tou, J.T. and Gonzalez, R.C., 1974, *Pattern recognition principles*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- Tufte, E.R., 1983, *The visual display of quantitative information*, Graphics Press, Cheshire, Connecticut.
- Tufte, E.R., 1990, *Envisioning information*, Graphics Press, Cheshire, Connecticut.
- Tufte, E.R., 1997, *Visual explanations*, Graphics Press, Cheshire, Connecticut.
- UNESCO, 1973, *International classification and mapping of vegetation*, Paris, France.
- USDA, Natural Resources Conservation Service, 1998, Soil Survey Geographic (SSURGO) Database (<http://mapster.kgs.ukans.edu/dasc/datalog/coredata.html>).
- Vogelmann, J.E., Sohl, T., and Howard, S.M., 1998, Regional characterization of land cover using multiple sources of data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 45-57.
- Vogelmann, J.E., Howard, S.M., Yang, L., Larson, C.R., Wylie, B.K., and van Driel, J.N., 2001, Completion of the 1990s National Land Cover Data set for the conterminous United States, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 650-662.
- Wardlow, B.D. and Egbert, S.L., 2001, A comparison of the GAP and regional MRLC land cover data sets for the state of Kansas classification systems, methods and results, *ASPRS 2001: Gateway to the New Millennium*, St. Louis, Missouri, April 23-27.
- Whistler, J.L., Jakubauskas, M.E., Egbert, S.L., Martinko, E.A., Baumgartner, D.W., Lee, R., 1995, The Kansas state land cover mapping project: Regional scale land use/land cover mapping using Landsat Thematic Mapper data, *1995 ACSM/ASPRS Annual Convention and Exposition Technical Papers, Vol. 3*, 773-785.
- Whistler, J.L., Jakubauskas, M.E., Egbert, S.L., Martinko, E.A., Baumgartner, D.W., and Lee, R., 1997, *Kansas land cover patterns*, Single sheet, 1:750,000 scale, color, Map available from Kansas Geological Survey, Publications Division, Lawrence, Kansas.
- Wildlife Legacy Partners., 1994, *The Conservation Reserve Program: A wildlife conservation legacy*, Wildlife Management Institute, Washington, DC.

최초투고일 03. 08. 06

최종접수일 03. 11. 21