

연구논문

KOMPSAT-2 위성영상을 이용한 불투수지도작성 방법에 관한 실증연구

배다혜 · 이재일 · 고창환 · 하성룡

충북대학교 도시공학과

(2011년 9월 7일 접수, 2011년 10월 14일 승인)

A Study on Empirical Method Analysis of Impervious Surface Using KOMPSAT-2 Image

Da-Hye Bae · Jae-Yil Lee · Chang-Hwan Ko · Sung-Ryong Ha

Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

(Manuscript received 7 February 2011; accepted 14 April 2011)

Abstract

Impervious surface affects urban climate, flood, and water pollution and has important role as basic data for urban planning and environmental and resources management uses. With a high paved rate, increased quantity of the outflow water and brings urban flooding during a heavy rain. Moreover, these non-point source pollution is getting increased the water pollution. In this regard, it is definitely important to research and keep monitoring the current situation of paved surface, which influences urban ecosystem, disaster and pollution.

In this study, we suggest a method to utilize high resolution satellite image data for efficient survey on the current condition of paved surface. We analysed the paved surface condition of Dae-jeon metropolitan city area using KOMPSAT-2 image and validate its practicalness and limitation of this method.

Keywords : KOMPSAT-2, Impervious Surface, Land Cover Classification, High Resolution Satellite Imagery

I. 연구의 배경 및 목적

불투수성 포장면이라 함은 콘크리트, 아스팔트, 등과 같은 인공재료로 피복된 보도, 차로, 건물, 주차장 등으로서 빗물이 토양 및 지하수로 침투되지 못하는 지면을 의미한다. 강남의 물난리를 비롯하여 최근 이슈화가 되고 있는 도시홍수는 도시화에 따른 불투수율 증가와 직결된다. 불투수면으로 인한 환경문제는 수환경이나 녹지 공간의 부족에 국한된 것이 아니라, 생태계 전반에 걸친 자연자원의 효율적 관리와 각종 환경문제를 사전에 예방하기 위한 핵심 요인이다. 또한 불투수면 저감, 투수율 제고 등과 같은 다양한 관리수단을 동원하면 효율적으로 관리할 수 있어 유용한 유역관리지표가 될 수 있다.

이와 같이 도시의 생태와 재해 그리고 환경오염에 영향을 미치는 불투수 면적이 날이 갈수록 늘어나고 있으며, 이에 대한 현황 파악과 계획적 관리가 시급한 실정이다. 그러나 도시지역에서 토양포장상태는 건물의 신축과 도로개설 등으로 수시로 변하기 때문에 자료의 최신성을 유지하기 어렵다.

이러한 문제 인식하에서 보다 경제적이고 신속하게 토양의 포장상태를 파악하는 방법으로서 고해상도 인공위성영상을 이용하는 방안을 모색하였다. 따라서 본 연구에서는 국산 고해상도 위성영상인 KOMPSAT-2를 이용하여 토지피복분류를 실시하고 재분류를 통해 불투수면을 추출하고자 한다. 또한 고해상도 위성영상을 이용한 토지피복분류에 있어 전통적인 분류기법에서 오는 오분류 가능성을 배제하기 위해 밴드별 분광강조 기법을 이용한 분류계급별 분광특성을 분석하고, 그 특성에 따른 임계치를 설정해 계급별 추출방법을 통해 보다 정확한 분류를 실시하도록 한다.

II. 선행연구

도시화로 인한 불투수면적의 증가에 대한 관리의 중요성이 인식되어지면서 인공위성영상을 이용한

광역지역의 효율적인 불투수면 산정을 위한 연구가 이루어지고 있는 실정으로 자료의 목적에 따라 비도시지역을 포함한 광역지역의 경우 중저해상도 위성영상을 이용하고, 반면 도시지역의 세밀한 토지피복 정보를 취득하기 위해서는 IKONOS, SPOT-5, QuickBird와 같은 고해상도 위성영상을 주로 이용해 분류해 왔다. 고해상도 위성영상을 이용한 토지피복분류 방법으로 기존에 중저해상도에 적용되었던 전통적인 분류기법의 이용은 높은 분광해상력으로 인해 오분류를 일으킬 확률이 크다고 판단되어져왔다(구자용, 2007). 따라서 이를 개선시키기 위해 다양한 분류기법의 개발 및 적용이 시도되어왔다. 퍼지이론을 적용한 감독분류 방법을 이용해서 도시지역의 토지피복도 개선을 시도한 바 기타 감독분류기법에 비해 높은 분류 정확도를 보인다는 평가(사공호상의 1명, 2003)가 내려졌고, 또한 MLC(Maximum Likelihood Classification), ANN(Artificial Neural Network), SVM(Support Vector Machine), Naive Bayes 분류기법들을 이용하여 각각의 분류정확도를 비교분석한 결과 Boosting을 이용한 분류결과가 가장 높은 정확도를 보인다고 평가한 바 있다(임혜영 외 3명, 2005).

한편으로는 위성영상을 이용한 불투수면 지도 작성 및 불투수율을 산정하기 위한 연구가 진행되었는데 단순토지피복분류를 통한 불투수면 추출의 개념이 아닌 영상을 이용한 직접적인 불투수율을 산정하기 위해 연구의 초점이 맞추어져왔다. Landsat ETM+ 영상에 대한 위성반사율을 이용하여 Tasseled-cap과 NDVI로 전환하고 다양한 변수들이 불투수도에 미치는 영향을 분석하고 Regression Tree 알고리즘에 따라 불투수도 추정식을 개발하여 안성지역의 불투수도를 지도화한 바 있다(김성훈 외 3명, 2007). 또한 분광혼합분석(Spectral mixture analysis) 기법을 이용한 비교적 정확한 불투수율을 얻을 수 있음을 확인한 바(조홍래 외 1명, 2005) 있었다.

국외에서는 중저해상도 영상을 시초로 현재 60cm의 공간해상도를 지니고 있는 고해상도 위성

영상인 QuickBird에 이르기까지 상당한 기술력의 발전을 토대로 주제에 맞는 분류 기법을 고안하기 위해 많은 연구가 진행되어져 왔다. 객체지향적분류(Object-oriented classification)기법을 이용한 자동적 영상 분류 방법의 설계를 시도한 바(Ruvimbo Gamanya 외 2명, 2007) 있고, 분광혼합분석기법을 통한 불투수면 분포율을 산정한 바(Changshan Wu 외 1명, 2003) 있다. 또한 고차원 원격탐사 영상인 AVIRIS의 분류를 위한 빠른 분리능을 기반으로 한 객체 선택 방법을 제시하기도 하였다(Baofeng Guo 외 3명, 2008). 최근에도 계속해서 고해상도 위성영상을 활용한 토지피복분류에 관한 연구가 이어지고 있다(Zhang Rongqun 외 1명, 2011)

III. 연구 방법

1. 대상지의 선정

1) 대상지 선정 조건

본 연구는 대전광역시를 대상으로 실증연구를 수행하였다. 대상지 선정에는 우선적으로 국산 고해상도 위성영상인 KOMPSAT-2의 영상취득 가능유무와 기상조건이 A급일 때의 영상을 이용하고자 하였다(그림 1).

대전광역시는 신시가지 그리고 산림, 농경지, 하

천 등의 다양한 지형적 조건을 갖추고 있으며 지역의 인지도가 높아 영상판별을 하는데 유리할 뿐만 아니라 현장조사도 용이하다.

2) 취득영상의 특징

취득한 KOMPSAT-2 영상은 2007년 5월 10일에 촬영된 영상으로 운량조건은 A급이며 구름이 거의 존재하지 않는 깨끗한 이미지이다. 가시광선 영역대인 RGB를 포함해 NIR(Near Infrared)와 함께 4개의 밴드를 지니며, Panchromatic까지 총 5개의 별도 GeoTiff이미지로 구성되어 있고, 각각의 RPC(Rational Polynomial Coefficient) data를 포함한다(표 1).

2. 영상의 전처리

본 연구에서 이루어진 모든 분석은 Leica에서 보급하는 ERDAS IMAGINE V8.6을 이용해 실시하였다.

표 1. KOMPSAT-2 영상의 특징

Band NO.	영역	파장대(nm)	공간해상도(m)
1	Blue	450-520	4
2	Green	520-600	4
3	Red	630-690	4
4	Near Infrared	760-900	4
8	Panchromatic	500-900	1

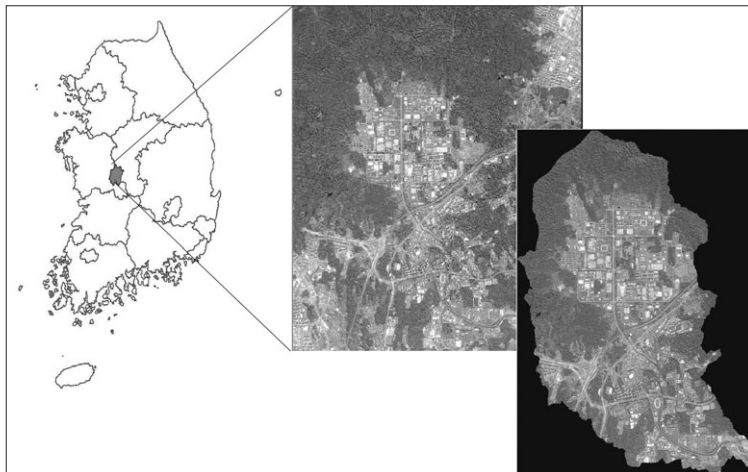


그림 1. 연구 대상지

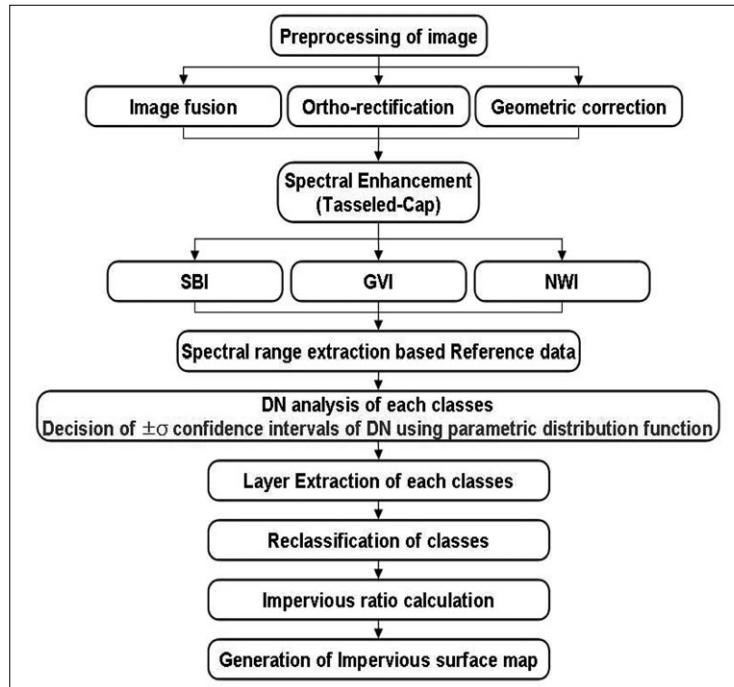


그림 2. 영상의 분석과정 흐름도

본 연구의 영상 분석 흐름은 그림 2와 같다.

취득된 4개의 4m급 Multi-spectral 이미지와 1m급 Panchromatic 이미지의 영상융합을 거쳐 정사보정을 실시하고, 지표의 기하학적 왜곡을 수정하기 위해 해당 대상지역의 수치지도를 참고로 한 기하보정을 실시한다. 이와 같은 영상 전처리 과정을 거쳐 얻어진 1m급 Multi-spectral 이미지는 이미지 강조 기법인 Tasseled-cap Transformation 모델을 이용해 새로운 3개의 모델(토양밝기지수, 식생지수, 습윤지수)로 변환되고, 변환된 3개의 모델을 토대로 토지이용도의 참고자료를 이용해 계급별 sample pixel들을 추출한다. 추출된 각 모델별 계급의 지수들은 비초과확률을 통해 신뢰구간을 선정하게 되고, 신뢰구간 안에 포함되어지는 각 모델들의 계급별 해당 지수들의 공통적인 pixel선정으로 최종적인 계급 추출을 한다. 추출된 계급별 Layer들로 하여금 최종적인 토지피복분류도를 작성하게 되면, 불투수면에 해당하는 계급들을 재분류하는 방법을 통해 불투수면 지도를 작성하게 된다.

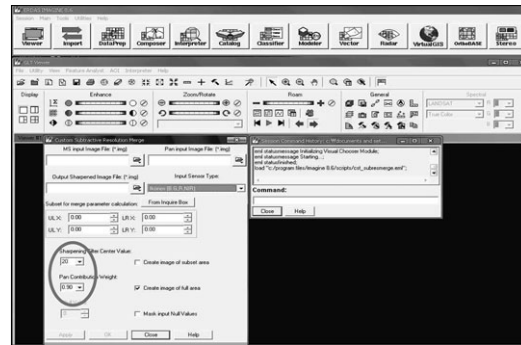


그림 3. Custom Subtractive Resolution Merge법에 의한 영상융합

1) 영상융합(Image Fusion)

Bundle로 제공된 KOMPSAT-2의 각 밴드별 해상도의 증가를 위해 Custom Subtractive Resolution Merge를 실시하였다(그림 3). 기존의 Principal Component Analysis, Multiplication, IHS법 등은 KOMPSAT-2 이미지에 적용결과 양질의 Output을 제공하지 못하여, Shapen 정도와 Pan 분포의 가중치를 조절할 수 있는 Custom Subtractive Resolution Merge법을 이용하였다.

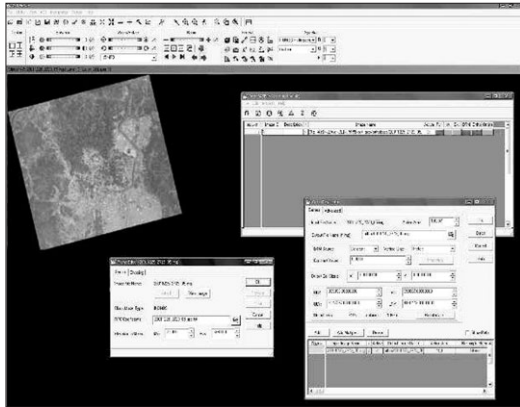


그림 4. RPC file을 이용한 정사보정

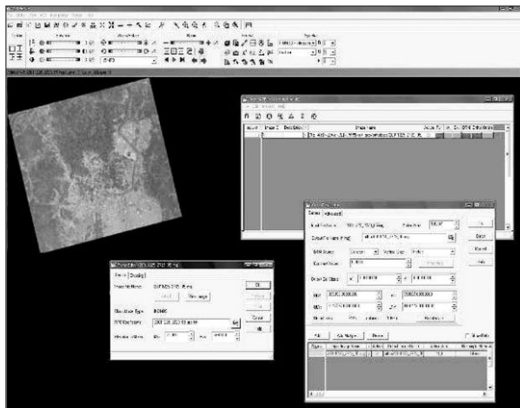


그림 5. Reference data(digital map 1:5000)을 이용한 기하보정 실시

프로그램의 버전 상 센서타입의 설정에 있어 KOMPSAT-2 영상의 타입을 제공하지 않아서 분광해상도가 유사한 IKONOS로 센서타입을 설정하여 적용하였다.

2) 정사보정(Ortho-rectification)

위성영상의 취득 당시 함께 제공받았던 RPC (Rational Polynomial Coefficient) file을 이용한 정사보정을 실시하였다(그림 4). RPC file은 촬영 당시의 내부표정요소 및 외부표정요소에 대한 정보를 담고 있어 상용 틀에 입력되어 쉽게 정사보정을 할 수 있게 도와준다.

3) 기하보정(Geometric correction)

본 연구에서는 지리정보와의 명확한 매칭을 위해

1:5,000 축척의 수치지도를 참고자료로 하여 GCP(Ground Control Point)선정에 의한 기하보정을 실시하였다(그림 5). 표본점 선정은 영상 전역에 골고루 포인트를 지정하였으며 resampling 기법으로는 nearest neighbor resampling법을 이용하였다. 정확도의 향상을 위하여 GCP 선정에 차이를 두어 여러 차례 반복 실시 후 RMSE(Root Mean Squared Error)값이 가장 적게 나타날 때의 보정 결과를 최종 영상으로 인정하였다.

2. 분광강조기법(Spectral Enhancement)의 적용

본 연구에서는 기존의 분류방법에서 벗어난 새로운 분류기법의 적용성을 검토하여 토지피복도를 작성 후 불투수면 지도를 작성하기위해 분광강조기법을 이용하여 계급별 단계적 추출을 이용한 분류를 시도하였다.

1) TCT(Tasseled-cap Transformation) Model

분광강조기법 중의 하나인 TCT(Tasseled-cap Transformation) 모형은 Kauth-Thomas 모형이라고도 불리며, 원래 Landsat MSS 자료를 직교 변환하여 새로운 형태의 각기 다른 4개의 지수로 변환하는 것이다(Kauth al et, 1976). 고해상도 위성 영상이 보급되기 시작되면서 James. H. Horne에 의해 IKONOS에 적합한 변환식이 고안되었다.

$$\begin{aligned}
 SBI &= 0.326B1 + 0.509B2 + 0.560B3 + 0.567B4 \\
 GVI &= -0.311B1 - 0.356B2 - 0.325B3 + 0.819B4 \\
 NWI &= -0.612B1 - 0.312B2 + 0.722B3 - 0.081B4
 \end{aligned}$$

위식에서 B1, B2, B3, B4는 영상의 각 밴드 넘버를 말한다.

따라서 본 연구에서는 KOMPSAT-2에 적용하기 위해 영상특성이 매우 흡사한 IKONOS를 위해 개발된 Horne식을 적용하여 변환하였다.

2) 원영상과 TCT Model의 DN분포 특성 및 비초 과학률곡선 비교

원영상의 DN분포는 비슷한 distribution에 중복성이 큰 반면 TCT변환 모델의 index 중 SBI의 경우 다른 두 개의 지수와 현격히 다른 분포 특성을

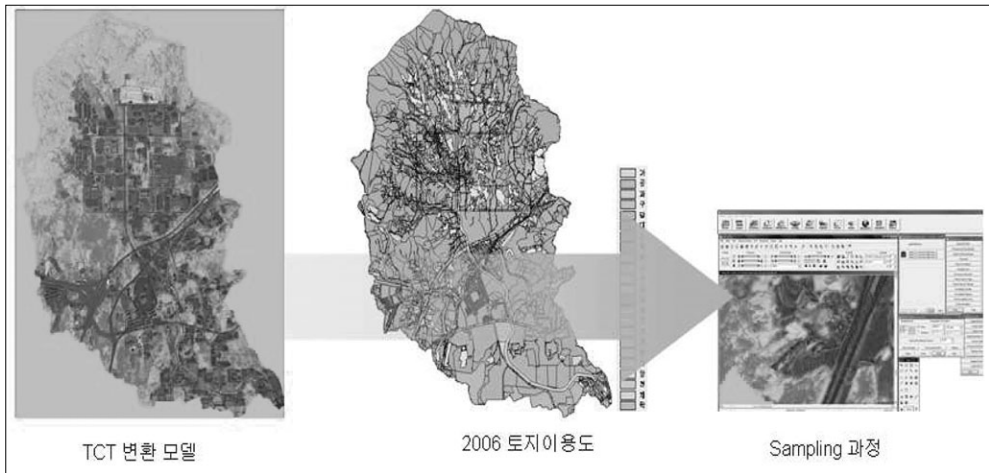


그림 6. 토지이용도를 이용한 TCT변환 Index별 계급의 표본추출 과정

보인다. 고유 DN값의 강조를 통해 서로 다른 영역 대의 이미지를 보여줘 목적에 맞는 토지피복상의 분류를 용이하게 할 수 있다.

3. 토지피복도 작성 방법

1) 토지피복분류 계급별 Sampling

토지이용도 자료를 토대로 확실히 되는 계급별 boundary 내의 균일한 pixel(400pixel)을 선택 후 각 계급별 3개 TCT 모델 index내의 지수 범위를 파악하고자 하였다(그림 6).

총 14개의 계급(물, 밝은 나지, 어두운 나지, 골프장, 도로, 침엽수림, 활엽수림, 농경지, 비닐하우스, 블루톤 건물, 레드톤 건물, 콘크리트 건물, 초지, 그림자)을 구분해, 각 분류계급이 3개의 TCT 모델에서 각각 어느 지수범위 안에 분포하는지 분석하였다. 분석된 지수들은 통계분석을 토대로 Min, Max, Mean, Std dev.를 계산하였다.

2) 각 계급별 TCT index에서의 분포 특성 분석

추출된 각 계급별 400개씩의 Pixel data가 가진 지수 데이터를 Minitab 통계프로그램을 이용해 정규화 된 분포 분석을 실시하였다. 14개의 분류 계급 중 대표되는 9개의 계급(water, paddy, barren, building, forest, grass, road, vinyl house, shadow)을 선정해 Index별로 어떤 분포 특성을 보

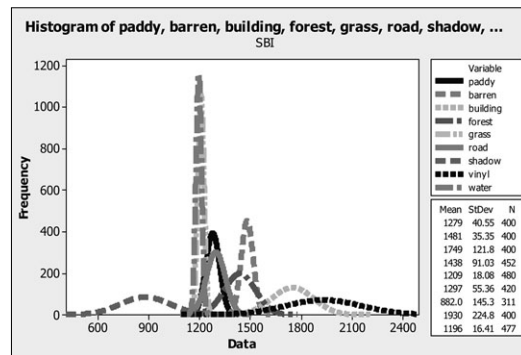


그림 7. SBI의 계급별 분포 특성 분석

이는지 파악하였다.

① SBI(Soil Brightness Index)

불투수면에 해당하는 Vinyl house와 buildings는 높은 SBI값으로 넓은 분산을 보이며 다른 계급들과의 중복성이 낮아 높은 변별력을 지닌 것으로 판단된다. shadow의 경우 매우 낮은 영역대로 넓게 분포되어 다른 계급들과의 확연한 구분이 가능하며, water와 grass의 경우 변별력은 높으나 중복성이 강해 다른 Index와의 구분이 필요하다(그림 7).

② GVI(Green Vegetation Index)

Biotope과 연관된 식생(grass, paddy, forest)의 분포를 확연히 구분 가능하며 특히 forest는 높은 GVI를 갖는 동시에 다른 영역과 확연히 구분되어져 상당한 변별력을 갖는다. grass와 paddy영역

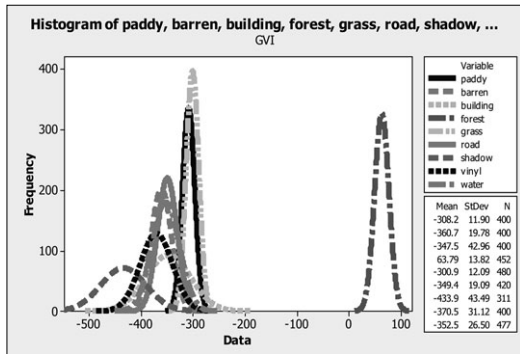


그림 8. GVI의 계급별 분포 특성 분석

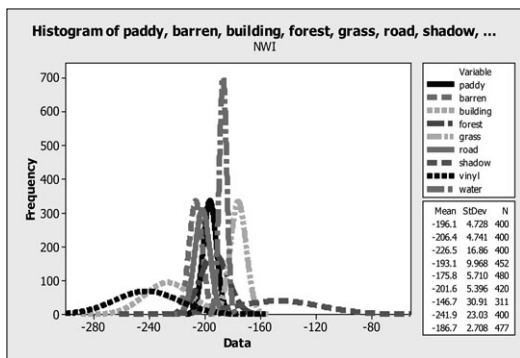


그림 9. NWI의 계급별 분포 특성 분석

은 다른 계급과 구분은 용이하나 이 둘은 중복성이 강해 다른 Index와의 구분이 필요하다(그림 8).

③ NWI(Non-suched Wetness Index)

Biotope에 해당하는 forest, grass, water, paddy 등은 비슷한 범주에 속해 있어 NWI를 통해 Biotope을 구분하기에 매우 용이함을 알 수 있으며, SBI와 NWI에서는 road와 paddy가 비슷한 분포특성을 보이거나 GVI에서는 다른 분포특성을 보이고 있다(그림 9).

3) 추출된 토지피복 계급별 신뢰구간 추정

비초과확률곡선에서의 신뢰구간은 $\mu \pm \sigma$ 에 의해 결정된다. 각 계급에서 각 TCT index 범위의 픽셀들은 적정 조정계수(ω)의 결정에 의해 포함하는 범위가 달라진다.

본 연구에서는 400개의 표본 샘플 추출에 이용되었던 토지이용도를 참고로 Threshold값인 (ω)의 조정에 의한 추출을 달리해 비교한 뒤 적정 조정계수를 선정함으로써 계급별 신뢰구간을 추정하였다(그림 10).

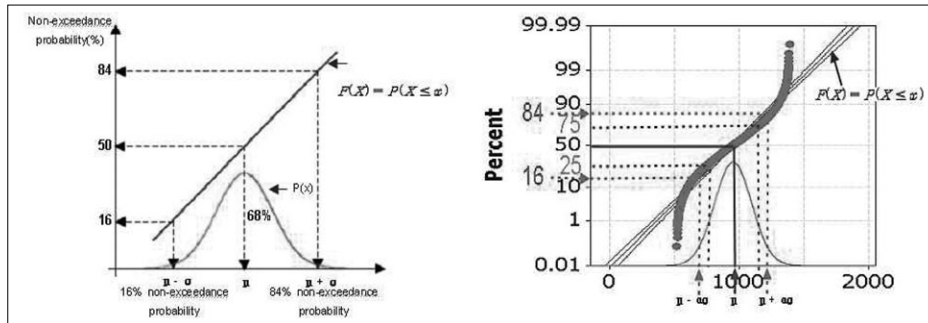


그림 10. 비초과확률에 의한 신뢰구간 설정

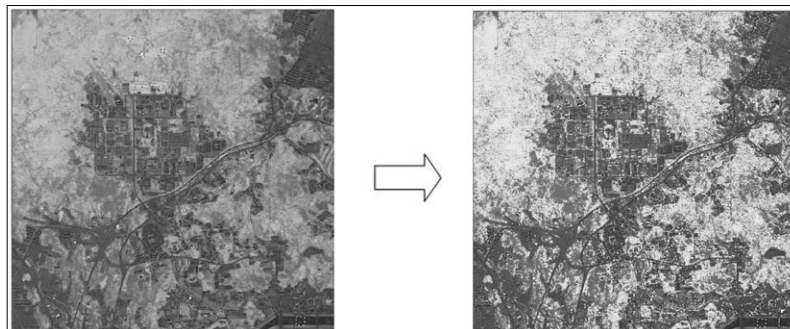


그림 11. 비계급별 신뢰구간 선정에 의한 해당 pixel의 추출

4) 추정된 계급별 3개의 TCT index 신뢰구간에 따른 영상 내 모든 해상 pixel의 추출

각 TCT index별로 14개 계급에 대한 신뢰구간에 포함되는 pixel들만을 추출해 따로 layer를 구축해 저장해 놓는다. 3개의 TCT index별 14개의 계급 layer가 생성된 총 42개의 layer를 형성하게 되고, 이 data는 이후 3개의 TCT index를 모두 만족시키는 공동 pixel을 분석해 최종적으로 분류계급화 하였다(그림 11).

5) 토지피복분류도 작성 후 정확도 검증

Error matrix를 통한 분류정확도 평가를 실시하였다. 각각의 선택된 분류계급들에 해당하는 행렬상의 분류오차를 계산해 전체 정확도를 평가하였다.

4. 불투수면 지도 작성 및 불투수율 산정

추출기법을 통해 14개의 계급으로 분류된 토지피

표 2. 토지피복계급 항목 결정

	투수지역	불투수지역
토지피복 분류 계급	하천, 침엽수림, 활엽수림, 초지, 골프장, 농경지, 밝은나지, 어두운나지	도로, 비닐하우스, 건물1,2,3

복도를 토대로 2분법적 재분류 방법을 이용해 대상 지역의 투수지역과 불투수지역을 구분하도록 하였다(표 2). 그림자 영역의 경우 육안분류를 통해 인접한 다른 계급으로 편입시켜 조정을 실시하였다.

수치지도에서 추출한 watershed boundary data에 의해 대상지역 전체의 총 불투수율(TIA: Total Impervious Area)을 산정하였으며 다음의 식에 의해 계산하였다.

$$\text{불투수율(\%)} = \frac{\text{계급별불투수지역면적}}{\text{계급의 전체면적}} \times 100$$

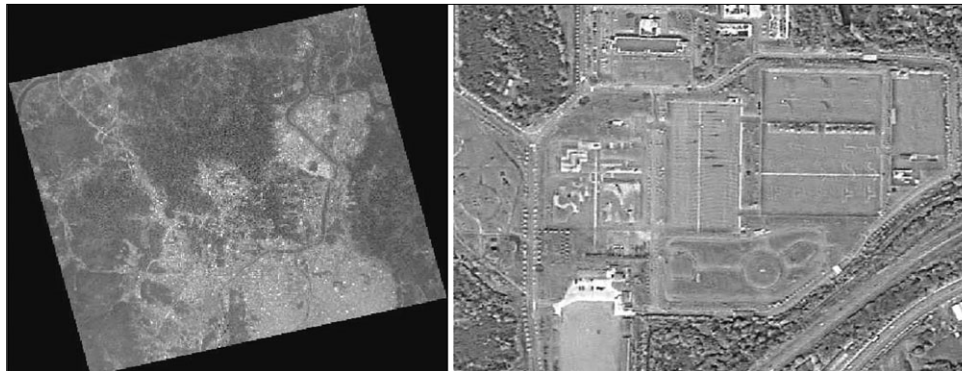


그림 12. 영상융합 전체영상(좌)과 확대영상(우) 결과

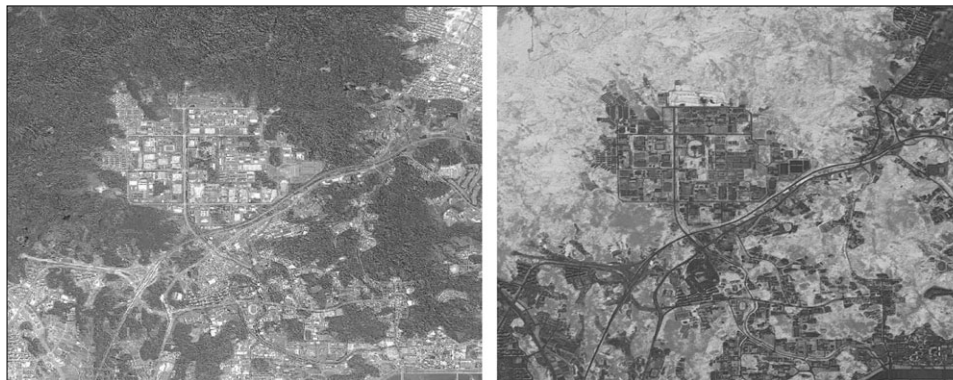


그림 13. TCT Model 적용 전(좌), 적용 후(우)

IV. 연구 결과

1. 영상의 전처리

1) 영상융합(Image Fusion)

최종적으로 얻어진 융합영상은 그림 12와 같다.

2) TCT Model의 변환 결과

TCT(Tasseled-cap Transformation) Model의 실험적 적용 결과 총 3개의 SBI(Soil Brightness Index), GVI(Green Vegetation Index), NWI(None-such Wetness Index)로 작성되었고, 그림 13은 변환된 3개의 지수를 RGB로 overlapping한 것이다.

변환된 TCT모델들의 지수범위는 표 3에 정리하였다. SBI의 경우 지수는 양의범위 값을 가지며

표 3. TCT 변환 이미지의 지수 범위

	layer	min	max	meanstdev
SBI	221.51	8,984	1,323.623	139.988
GVI	-670.12	491.31	-188.460	113.567
NWI	-615.88	1,180.4	-237.426	40.777

GVI와 NWI는 음과 양의 범위 값을 동시에 갖는 분포를 보인다.

2. 토지피복분류도 작성

1) 토지피복분류도 작성

전체 14개의 계급으로 구성된 토지피복분류도를 작성하였다. 계급별 면적분포는 표 4에 정리하였다.

분류계급에는 그림자도 포함하고 있으며, barren(나지)이나 building(건물)의 경우 다양한 분광 특성으로 반사되기 때문에 밝기나, 색의 차이에 따라 계급을 세분화하여 분류하였다.

2) 토지피복분류도의 정확도 검증

전체적으로 상당히 높은 분류정확도를 보이며, 전체정확도는 97.15%로 분류의 신뢰도가 상당히 뛰어난 것으로 판단되었다. 따라서 이를 토대로 재분류를 통해 최종적인 불투수면지도(impervious map)를 작성 후 대상지의 불투수율을 산정하도록 하였다.

표 4. 분류된 토지피복 계급별 면적

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
agricultural	barren1	barren1	building1	building2	building3	forest1	forest2	golf	grass	road	shadow	vinyl house	water
11,956	206,719	701,036	82,111	596,900	337,288	492,099	428,557	1,083,814	40,700	82,308	21,342	226,682	5,903

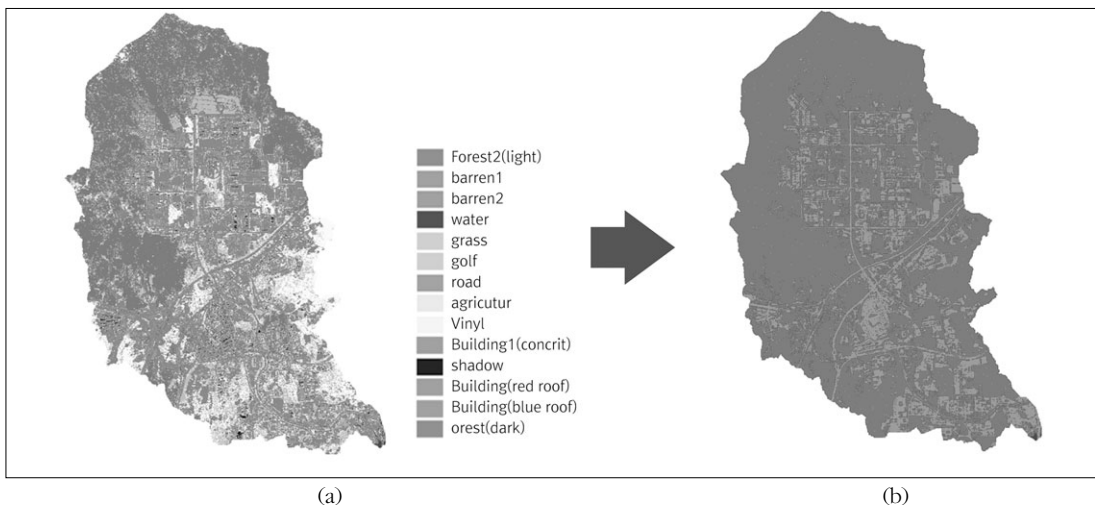


그림 14. (a) 대상구역의 토지피복분류 결과 (b) 대상구역의 불투수지도 작성 결과

3. 불투수면 지도 작성 및 불투수율 산정

토지피복분류도의 투수지역과 불투수지역으로 재분류 실시 결과, 대상유역 전체의 불투수율은 31.16%로 나타났다(그림 14).

V. 결론

이 연구는 국산 고해상도 위성영상인 KOMPSAT-2를 이용하여 최근 이슈가 되고 있는 도시홍수 등 도시의 생태와 재해 그리고 오염 등에 영향을 미치는 불투수지표면을 분석하는 방법을 모색하는 연구로서, 대전광역시를 대상으로 실증연구를 수행하였다. 위성영상을 이용하여 불투수지도를 제작하는 방법론의 유용성을 정리하면 다음과 같다.

1) KOMPSAT-2 위성영상은 정밀 토지피복 분포 및 복잡한 도시지역의 불투수지표면의 상태를 파악하는데 매우 유용한 자료로 활용할 수 있다. 특히 본 연구에서는 토지이용도를 기준으로 토지이용도 별로 계급을 나누고 계급별 불투수율을 분석하였다. 이는 토지피복을 이루고 있는 계급별 특성을 분석하기 위한 기술로 활용할 수 있다. 그러나 현재 관리대상지역의 정확한 토지정보 제공을 위해서는 최신자료의 위성영상을 이용해야 한다.

2) 본 연구의 수행결과인 고해상도 위성영상을 활용한 불투수면 지도는 도시의 지속가능한 발전을 위한 합리적인 토지이용규제 및 오염총량관리제에서의 개발 규제 및 완화에 대한 지표 마련에 활용할 수 있다. 또한 수질오염총량관제에서 설정하고 있는 목표수질에 부합할 수 있는 개발계획의 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

3) 본 연구에서는 고해상도 위성영상을 이용한 토지피복분류에 있어 전통적인 분류기법에서 오는 오분류 가능성을 배제하기 위해 밴드별 분광강조 기법을 이용한 분류기법을 적용하였다. 이는 영상에서 공간적 분광 특성에 따른 불투수 지표면의 특성을 해석하는데 지표로 활용할 수 있다.

4) 유역수문모델 및 도시수문모델을 이용한 도시 지역에서의 다각적인 오염부하 해석 시 토지이용에

따른 모의 구동을 위한 기초 입력자료 제공에 활용할 수 있으며, 소단위 공간의 유출 특성 분석과 유역의 오염부하량 산정에 이용할 수 있다. 이 외에도 전국적인 토지이용 현황과 오염부하와의 관계 해석에 기술적 초석을 제공 할 것이다.

5) 궁극적으로 본 연구에서 제시된 결과는 과거의 불투수면 변화 실태의 확인 필요성이 제기될 때 현재의 상황과 비교할 수 있어 불투수공간의 확대 및 환경 악화의 원인을 분석하는데 중요한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 구자용, 2007, 고해상도 위성영상을 이용한 토지피복도 제작기법 연구, 지리학연구회, 41(1), 83-94.
- 김선화 외, 2010, 한반도 토지피복도 제작을 위한 다시기 Landsat ETM 영상의 정합방법, 대한원격탐사학회, 26(2), 87-98.
- 김성훈 외, 2007, Landsat 7 ETM+ 영상을 이용한 안성지역의 불투수도 추정, 대한원격탐사학회, 23(6), 529-536.
- 김찬수 외, 2011, 다중시기 위성영상과 토지 통계자료를 이용한 토지피복변화 예측 : 천안시, 아산시를 사례로, 한국지형학회지, 18(1), 41-56.
- 사공호상, 2003, IKONOS 위성영상을 이용한 불투수지표면 분석방법에 관한 실증연구, 한국 GIS학회, 11(4), 509-518.
- 엄정섭, 2004, 도시의 불투수면 총량규제에서 원격탐사와 GIS의 활용, 한국환경영향평가학회, 13(5), 263-276.
- 임혜영 외, 2005, 고해상도 위성영상의 효율적 지형분류기법 연구, 지형공간정보학회지, 13(3), 33-40.
- 조홍래 외, 2005, 분광혼합분석 기법을 이용한 탄천유역 불투수율 평가, 대한원격탐사학회지, 21(6), 457-468.

Baofeng Guo *et al.*, 2008, A fast separability-based feature-selection method for high-dimensional remotely sensed image classification, *Pattern Recognition*, 41, 1670-1679.

Changshan Wu *et al.*, 2003, Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis, *Remote Sensing of Environment*, 84, 493-505.

Ruvimbo Gamanya *et al.*, 2007, An automated satellite image classification design using

object-oriented segmentation algorithms: A move towards standardization, *Expert Systems with Applications* 32, 616-624.

Zhag Rongqun *et al.*, 2011, Study of land cover classification based on knowledge rules using high-resolution remote sensing images, *Expert Systems with Applications* 38, 3647-3652.

최종원고채택 11. 10. 15