



기후변화 시나리오에 따른 미래 토지피복변화 예측 및 군집분석을 이용한 지역 특성 분석

Prediction of Land-cover Change Based on Climate Change Scenarios and Regional Characteristics using Cluster Analysis

오윤경* · 최진용**† · 유승환*** · 이상현****

Oh, Yun-Gyeong · Choi, Jin-Yong · Yoo, Seung-Hwan · Lee, Sang-Hyun

ABSTRACT

This study was conducted to predict future land-cover changes under climate change scenarios and to cluster analysis of regional land-cover characteristics. To simulate the future land-cover according to climate change scenarios - A1B, A2, and B1 of the Special Report on Emissions Scenarios (SRES), Dyna-CLUE (Conversion of Land Use Change and its Effects) was applied for modeling of competition among land-use types in relation with socioeconomic and biophysical driving factors. Gyeonggi-do were selected as study areas. The simulation results from 2010 to 2040 suggested future land-cover changes under the scenario conditions. All scenarios resulted in a gradual decrease in paddy area, while upland area continuously increased. A1B scenario showed the highest increase in built-up area, but all scenarios showed only slight changes in forest area. As a result of cluster analysis with the land-cover component scores, 31 si/gun in Gyeonggi-do were classified into three clusters. This approach is expected to be useful for evaluating and simulating land-use changes in relation to development constraints and scenarios. The results could be used as fundamental basis for providing policy direction by considering regional land-cover characteristics.

Keywords: Climate change scenarios, Dyna-CLUE model, land-cover change, cluster analysis, regional classification

1. 서 론

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 2007년 발행한 보고서에 따르면, 지구 온난화로 인한 기후변화의 증후가 뚜렷하게 나타나고 있으며 이러한 변화는 인위적인 온실가스 배출증가로 인한 결과일 가능성이 높은 것으로 평가하고 있다. 특히, 토지이용변화는 대기 중 온실가스를 증가시키는 주요 요인이며 이를 분석하는 것은 기후변화 대응을 위한 전략수립에 필수적인 요소이다. 그러나 토지피복 및 토지이용 특성은 지역의 생태계의 순환 과정부터 전 지구적인 대기 및

물 순환, 정책 및 사회·경제적인 여건 등 다양한 요인과 관련이 있기 때문에, 미래 토지이용변화 모델링 과정은 매우 복잡하고 많은 불확실성을 내포하고 있다 (Verburg et al., 2002; Park, 2009). 따라서 미래의 토지이용을 예측하기 위해 여러 가정을 포함한 시나리오 설정 연구가 유용하게 활용되고 있으며 (Alcamo, 2001), 현재 기후변화 관련 연구에서 가장 광범위하게 활용되고 있는 시나리오는 IPCC에서 작성한 SRES (Special Report on Emission Scenario) 시나리오이다 (Bae et al., 2007). 본 연구에서는 미래의 사회·경제·환경적 가정이 포함된 SRES 시나리오 중 A1B, A2, B1 세 가지 시나리오를 바탕으로 국내 실정을 반영하여 경기도 지역의 미래 토지피복분포 변화를 모의하고, 그 특성을 지역 유형별로 나누어 분석하고자 하였다.

미래 예측을 위한 토지이용변화 모델링은 사회·경제적 요소의 변화에 따른 시·공간적 변화를 살펴보기 위해 통계기법을 활용하여 토지이용의 공간적 패턴과 구동요인과의 관계를 파악하는 것을 기초로 한다 (Verburg et al., 2002). 토지이용변화와 구동요인에 관한 연구를 살펴보면, 토지이용변화와 사회·경제적 변수요인과의 상관성을 분석하여 토지이용의 변화와 경제적 영향을 분석하거나, 토지이용정책에 따른 농업·산림면적의 변화

* 서울대학교 농업생명과학대학 연수연구원

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원

*** 서울대학교 농업생명과학대학 연수연구원

**** 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학전공

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

2011년 5월 20일 투고

2011년 9월 29일 심사완료

2011년 10월 20일 게재확정

를 살펴본 연구 또는 시장변화에 따른 토지이용변화를 분석한 연구가 있다 (Brown et al., 2002; Lambin et al., 2000; Deal and Schunk., 2004). 토지이용변화 모델로는 Cellular Automata (CA)모형이 공간 분석 연구에서 가장 많이 이용되고 있으며 Markov Chain 기법과 결합하여 미래의 토지이용변화를 예측하고 있다. 그러나 여러 연구에서 활용되는 Markov 기법은 수치 영상 또는 격자 기반의 GIS 데이터를 연산하여 현재 토지이용의 변화된 경향을 잘 반영하는 장점이 있지만 시간이 변하더라도 전이 확률이 항상 일정하고 모든 위치에 동일하게 적용되는 단점이 있다 (Lee and Kim, 2007). 비선형 동적모형인 CA 기법 또한 시계열 자료의 변화양상을 공통적으로 적용시켜 인접격자의 상태를 지속적으로 변화시키기 때문에 토지이용 정책이나 사회·경제적 요인을 반영하여 다양한 시나리오를 적용하는 데 한계가 있다. 반면, Dyna-CLUE (Conversion of Land Use Change and its Effects)모델은 환경변화와 사회·경제적 변화를 반영하여 토지이용변화를 파악할 수 있는 모델로서 Verburg et al. (1999; 2002)은 CLUE 모델을 이용하여 미래의 사회·경제적 시나리오를 반영한 토지이용 예측 연구를 수행하였으며 Schulp et al. (2008)은 SRES 시나리오를 기반으로 미래 유럽 지역의 이산화탄소 배출량을 추정하는 연구를 수행한 바 있다. 국내에서는 Oh et al. (2010a)이 위 모델을 활용하여 경기도 3개 시·군을 대상으로 토지이용변화 예측을 위한 회귀식 도출과 확률도 작성 연구를 수행하였으며 Oh et al. (2010b)의 연구에서는 국내 논지역의 변화를 예측하기 위해 지역 규모 (regional scale)의 기후변화 시나리오를 설정하고 미래 논 분포 변화를 모의한 바 있다.

위 선행연구를 바탕으로 본 연구에서는 대상지를 확대하여 경기도 31개 시·군의 2040년까지의 미래 토지피복변화를 모의하고, 모의된 결과의 시·군별 토지피복 분포 특성을 K-평균 군집분석을 이용하여 지역별 토지피복 특성을 분류하였다. 분류된 지역 유형별로 대표 시·군의 미래 토지피복변화 특성을 살펴보고, 기후변화 대응책을 모색하는 데 기초자료로서 활용하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 방법

본 연구의 수행 과정은 Fig. 1와 같다. 현재 국내에서는 기후변화 시나리오에 따른 기후 시스템의 반응을 통합적으로 모의하는 연구가 시작 단계에 있으므로, 본 연구에서는 일본의 국립환경연구소 (National Institute of Environmental Studies)에서 기후변화 시나리오에 따른 환경영향 평가를 위하여 수행한 전지

구 규모 (global scale)의 아시아 태평양 통합 모델 (Asia-Pacific Integrated Model)결과를 바탕으로 분석 대상지인 지역 규모 (regional scale)의 토지이용면적 변화 시나리오를 정량적으로 설정하였다. 이와 함께 국내의 인구변화추세 및 국내총생산의 변화와 비교하여 변화 패턴이 유사한 지역의 모델링 결과를 분석하고 이 변화 추세와 연구대상지의 사회·경제적 제약조건을 종합적으로 고려하여 토지이용면적의 변화 시나리오를 재구성하였다 (Oh et al., 2010b).

변화제한 구역으로는 농경지 보존을 위한 개발제한구역으로서 농업진흥구역도를 활용하였으며 상수원보호지역, 그린벨트 지역, 국토환경성 평가도를 바탕으로 산림 보존을 위한 변화제한 구역을 시나리오별로 차등 설정하여 토지피복변화를 모의하였다.

다음으로 토지피복도의 위치적 특성과 변화 구동요인 사이의 상관관계 규명을 위해 회귀분석을 수행하였다. 각 토지피복별 위치 특성의 정량화를 위해 로지스틱 회귀분석을 수행하고 ROC (Receiver Operating Characteristic) 곡선 검정법으로 회귀식의 유효성을 검토하였다. 로지스틱 회귀분석은 예측변수의 값이 독립변수들에 의해 결정되는 특성이 있는지 예측하려는 상황에서 유용하며, 종속변수가 이분형인 모형에 적합한 분석이다.

마지막으로 연구 대상지의 토지이용간의 상호 변화 특성과 토지이용별 전이 특성 (conversion elasticity) 값은 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도의 1999년, 2009년 토지피복 변화 특성을 분석하여 변화 행렬식과 전이 특성값을 결정하였다.

이를 바탕으로 토지면적 시나리오, 변화 제한지역, 회귀식 결과와 토지피복 변화 특성 값을 CLUE 모델에 입력하여 미래의 토지피복변화를 모의하였으며 실제 2009년 토지피복도와 모의된 토지피복결과를 비교하여 그 일치도를 확인하였다. 최종적으로 모의된 토지이용변화 결과의 지역별 특성을 살펴보기 위해 K-평균 군집분석을 통해 대상지 시·군을 3가지 유형으로 분류하고 유형별 대표 시·군의 토지피복변화 특성을 분석하였다.

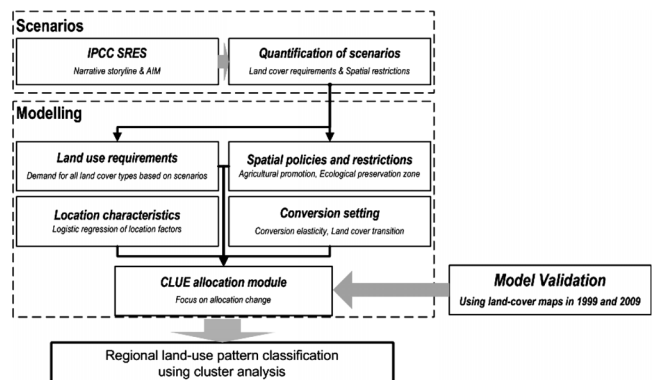


Fig. 1 Schematic diagram for simulating land-use change and regional analysis

2. 연구 대상지

연구 대상지는 서울에 인접한 경기도 31개 시/군을 대상으로 하였다. 경기도는 2003년을 기점으로 인구 및 경제활동에서 서울을 앞지르기 시작하면서 수도권 정비 계획법, 팔당 상수원 보호구역, 군사시설 보호구역, 개발제한 구역 등의 여러 규제들이 제정되어 온 지역으로, 개발수요와 개발규제 간 갈등이 지속적으로 거론되어온 지역이다 (Park, 2007). 뿐만 아니라, 대상지의 북동부에는 산림지역, 남동부는 농업지역이 넓게 분포하고 있어 다양한 형태의 토지이용이 고르게 분포하고 있다. 또한, 통계청의 시·도별 장래인구추계를 살펴보면 경기도 인구는 향후 지속적인 증가가 예상되고 있어 앞으로도 개발수요와 환경 보존 이념과의 갈등이 꾸준히 제기될 것으로 판단된다. 따라서 개발제한 구역이나 농업진흥구역과 같은 사회·정책적 요인을 포함하여 다양한 토지이용 시나리오 구성이 가능하고, 각각의 미래 토지피복변화를 모의 및 비교하기에 적합한 지역이라 판단하여 연구 대상지로 선정하였다.

3. 시나리오 설정

Fig. 2는 2000년에 공표된 AIM의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2 (a), (b)에서 보는 바와 같이 AIM에서는 WORLD, ASIAP, EFSU, ROW, OECD 지역으로 구분하여 인구와 각 지역 국내총생산의 변화 및 토지이용면적을 시나리오별로 제공하고 있다 (Morita, 1999; Oh et al., 2010b). 경기도를 대상으로 지역 규모의 토지이용변화 시나리오 설정에 활용하기 위한 결과 값을 선정하기 위하여 국내 인구변화추세와 국내총생산의 변화를 AIM의 지역별 모의 값과 비교한 결과, OECD 지역의 변화 패턴과 국내의 인구 및 국내총생산의 변화패턴이 유사하게 나타났다(Oh et al., 2010b). 따라서 본 연구의 토지피복면적 시나리오는 OECD 지역의 토지이용면적 변화율을 바탕으로 작성하였다.

AIM의 토지이용변화 면적은 온실가스 배출과 관련된 토지이용을 중심으로 농지 (cropland), 산림 (forest), 바이오매스 농장 (energy biomass farm), 초지 (grasslands)와 기타 지역 (others: urban and bare land)으로 분류하여 제공되며 이 결과를 2010

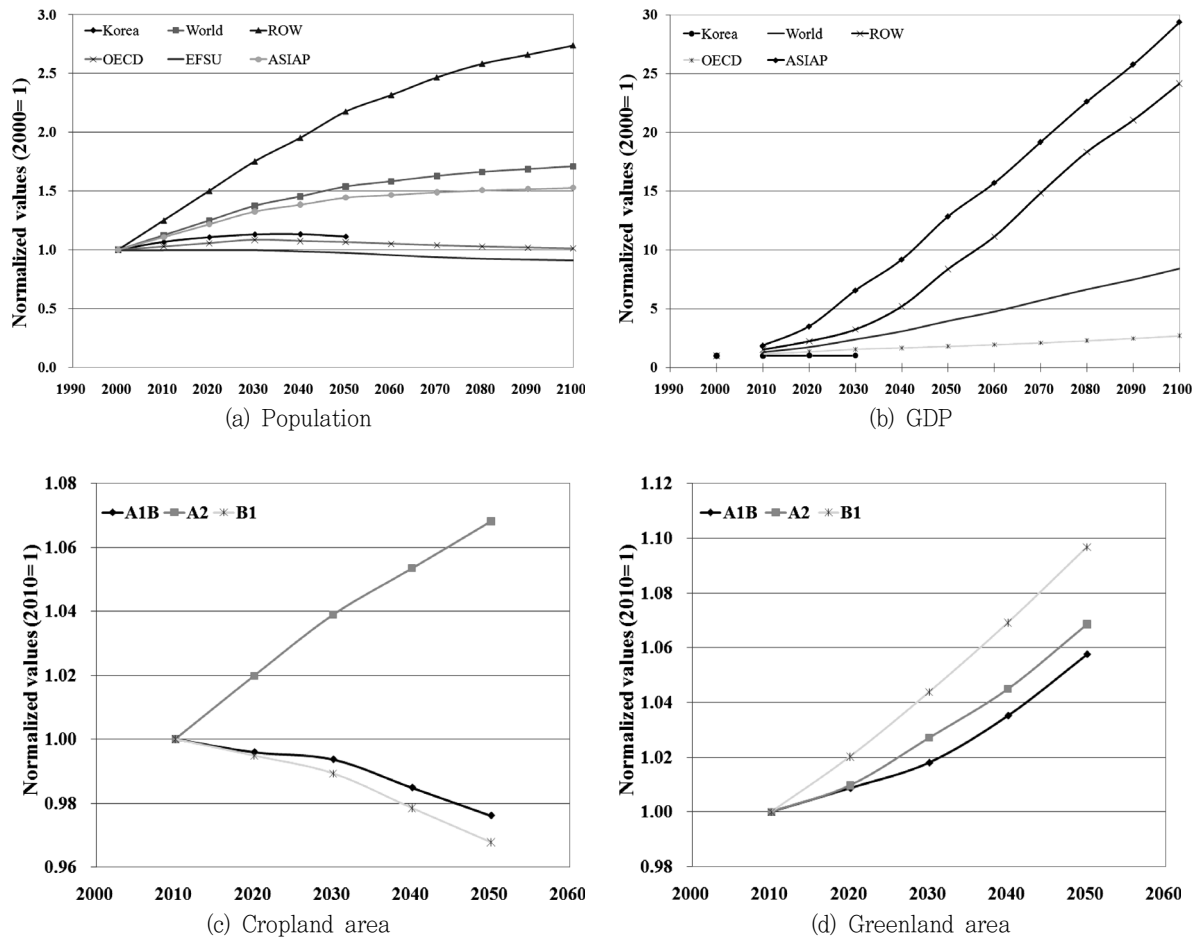


Fig. 2 Outputs of AIM (Morita et al., 1999; Oh et al., 2010b)

년 기준으로 변화율을 환산하여 Fig. 2 (c), (d)와 같이 나타내었다. 이를 바탕으로 본 연구의 토지피복별 시나리오를 설정하였는데 AIM에서 농경지 (cropland)로 분류된 면적을 과거 20년의 경기도 지역의 논/밭 변화비율로 분배하여 논면적과 밭면적 변화 시나리오를 작성하였다. 또한, AIM의 산림·바이오매스 농장·초지를 합하여 녹지면적 (greenland area) 변화율을 산정하고 국내 산림/초지 면적 비율을 적용하여 토지 피복면적 변화 시나리오를 구성하였다. 토지이용 변화제한 구역의 경우, 사회·정책적 요인을 감안하여 농업진흥구역과 국토환경성평가 1등급 지역, 상수원 보호지역 등을 변화 제약 조건으로 환경 보전 시나리오인 B1 시나리오에 모두 적용하고 A1B 시나리오에서는 농업진흥구역만 변화제한구역으로 설정하여 모의하였다 (Oh et al., 2010b).

4. 기초자료 구축

토지이용변화 모의를 위한 기초 자료는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 환경부 (2009) 중분류 토지피복지도를 활용하여 기준

도를 작성하였고, 농경지 보존을 위한 개발제한 구역으로는 농림부의 농업진흥구역도를 활용하였다. 경기도의 상수원보호지역 및 그린벨트 지역과 환경부에서 제공하는 국토환경성 평가도를 바탕으로 산림 보존을 위한 개발제한 구역도를 작성하였다. 이와 함께 국가지리정보포털의 1:25,000 수치지도로부터 해당 지역의 수치표고 모델 (DEM, Digital Elevation Model)과 경사도 (aspect), 향 (slope) 지도를 구축하였으며 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 바탕으로 토양특성 자료를 마련하였고, ArcGIS의 유클리디안 거리 연산 도구를 활용하여 도시·도로·수역과의 접근성 지도 등을 구동요인 자료로 구축하였다. 본 연구에서 활용된 독립변수는 선행연구를 참고하여 토지이용변화와 관련이 있을 것이라 추정되는 구동요인 중 공간자료인 GIS 자료를 중심으로 선정한 변수이다 (Schulp et al., 2008; Oh et al., 2010a; Oh et al., 2010b).

III. 결과 및 고찰

1. 토지이용면적 시나리오

시나리오 설정 부분에서 언급한 선행연구의 지역규모 시나리오를 적용하여 산출된 경기도의 토지이용 면적 시나리오는 Fig. 3과 같다. 먼저 농경지 면적 (cropland area) 시나리오를 살펴보면, 지구주의 (globalization) 시나리오인 A1B, B1 시나리오에서 논면적이 지역주의 시나리오 (regionalisation)보다 많이 감소하는 것으로 나타났고, 밭면적은 다른 두 시나리오에 비해 A2 시나리오에서 상대적으로 많이 증가하는 쪽으로 변화하였다. 이는 급격한 경제성장을 지향하는 A2 시나리오에서 다른 시나리오보다 인구 증가율을 높게 가정하고 있으므로, 농경지 수요면적이 타 시나리오보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 반면 시가화면적은 A1B 시나리오에서만 증가하는 것으로 나타났고 A2 시나리오와 환경지향 시나리오인 B1 모두 시가화면적이 현재 수준을 유지하는 것으로 설정되었다. 나지면적 변화 시나리오는 세 시나리오 모두 꾸준히 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 A1B 시나리오에서 가장 급격한 감소를 보였다. AIM의 녹지면적 변화율을 바탕으로 국내의 산림/초지 비율을 적용하여 산정한 산림과 초지면적의 시나리오를 살펴보면, 초지의 경우 모든 시나리오에서 증가하는 경향을 보였다. A1B, A2, B1 순으로 초지 면적이 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 산림면적 변화 시나리오에서는 환경지향 시나리오인 B1 시나리오에서 산림면적이 가장 많이 증가하는 것으로 나타났다.

2. 토지이용변화 모델 구축

이분형 로지스틱 회귀분석으로 6가지 토지피복의 회귀식을 추

Table 1 Description of spatially explicit allocation factors

Factor	Variable	Description
Land-cover	Water	Water and wetlands
	Built-up	Residential/industrial/commercial/and recreational areas, and public facilities
	Forest	Forest and natural areas
	Paddy	Paddy field area
	Upland	Agricultural land not included in paddy field
	Grassland	Grassland, including semi-natural grassland and biomass land calculated by the scenario
	Barren	Unused housing site and bare soil
Driving factors	DEM	Height (in m)
	Aspect	Aspect based on DEM
	Slope	Slope based on DEM (in degrees)
	Soil depth	Effective depth class
	Soil drain	Soil drainage class
	Soil type	Rock, sandy loam, clay loam, etc.
	D_city	Distance to city (m)
	D_water	Distance to water (m)
	D_road	Distance to road (m)
Restrict condition	Agricultural promotion zone	Designated to guarantee a stable food supply
	Water supply source preservation zone	Designated to protect water supply source
	Greenbelt zone	Designation of Greenbelt area
	ECV	Environmental conservation value of national land

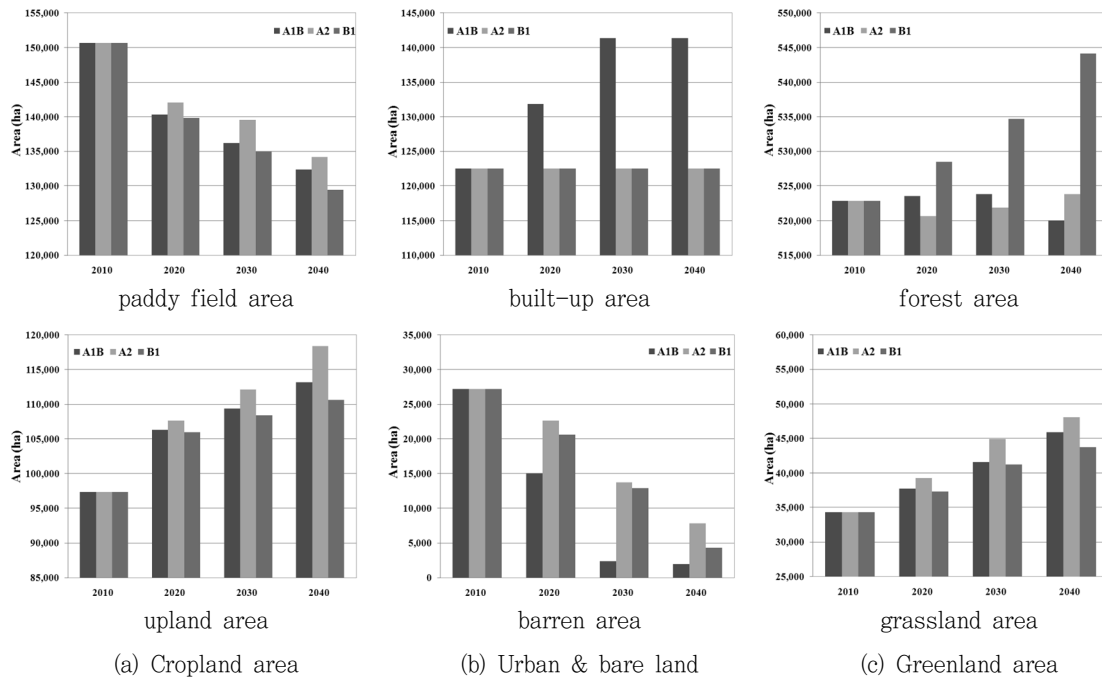


Fig. 3 Demand for aggregated area according to the three scenarios

Table 2 Binary logistic estimates for land-cover patterns (B values)

Factors	Built-up	Paddy	Upland	Forest	Grassland	Barren
DEM	-0.001258	-0.005301	-0.003151	0.006537	-0.000791	-0.004989
Aspect	-0.000215	-0.002079	0.000602	0.003065	0.000254	-0.000118
Slope	-0.036820	-0.108137	-0.065219	0.114339	-0.026264	-0.028184
Soil depth	0.038032	0.266640	0.174806	-0.268385	-0.054125	-0.025790
Soil drain	0.007663	-0.409871	0.048091	0.385053	0.168714	-0.012631
Soil type	-	0.104753	0.035633	-0.134116	0.035440	0.043103
Distance from cities	-0.011831	0.000103	-0.000693	0.000882	0.000594	0.000192
Distance from roads	-0.001060	0.000325	0.000209	0.000105	-0.000326	-0.000212
Distance from water	0.000096	-0.000301	0.000062	0.000092	-0.000493	-
Constant	0.935860	0.049899	-2.015275	-3.092485	-3.273046	-2.758070
ROC statistic	.933	.867	.712	.917	.657	.689

정한 결과는 Table 2와 같다. 9가지 구동요인으로 회귀 분석을 수행한 결과, 유의수준 0.05 하에서 시가화지역 분포와 가장 큰 상관관계를 갖는 요인은 경사도와 토심인 것으로 나타났으며 접근성 항목인 도로와의 거리가 비교적 큰 영향을 미치는 변수로 나타났다. 이에 비해 농경지인 논과 밭에서는 토양 특성인 토심, 배수, 토질 속성의 영향이 높게 나타났으며, 논과 배수특성이 음의 관계를 갖는 것에 비해 밭에서는 양의 관련성이 있는 것으로 나타났다. 산림과 초지에서도 전반적으로 토양 특성과 경사도의 영향이 타 구동요인에 비해 높게 나타났고, 나지에서는 토양속성과 경사도, 고도의 영향이 큰 것으로 산정되었다.

로지스틱 회귀분석을 이용하여 예측된 회귀식으로 모의한 토지피복도와 1999년 토지피복도를 비교하여 ROC 곡선법으로 평가한 결과, 시가화지역과 산림 분포 예측 결과는 90 % 이상의 일치도를 보였으며, 논은 86.7 %, 밭은 71.2 %로 예측 결과와 실제 피복도와 일치도가 양호하였다. 이에 비해 초지는 65.7 %, 나지는 68.9 %로 낮게 나타나 본 회귀식은 산림과 논을 중심으로 한 토지피복예측 모델로 활용성이 높을 것으로 판단하였다.

위 회귀식과 함께 1999년과 2009년의 토지피복도를 이용하여 변화행렬을 구성하였다. 토지피복들 간에 상호변화가 존재하는 행렬요소에 '1'의 값을 부여하고, 변화가 없거나 상대적으로 적은

Table 3 Comparison of changes in land-cover according to the three scenarios

Scenario		Baseline	A1B (2040)		A2 (2040)		B1 (2040)	
		Area	Area	Δ Area	Area	Δ Area	Area	Δ Area
		(ha)	(ha)	(ha, (%))	(ha)	(ha, (%))	(ha)	(ha, (%))
Land-cover	Built-up	122,488	141,716	19,228	123,041	553	123,573	1,085
				15.7		0.5		0.9
	Paddy	150,639	132,386	-18,253	134,589	-16,050	129,420	-21,219
				-12.1		-10.7		-14.1
	Upland	97,341	113,363	16,022	118,358	21,017	110,655	13,314
				16.5		21.6		13.7
	Forest	522,811	519,102	-3,709	522,653	-158	542,860	20,049
				-0.7		0.0		3.8
	Grassland	34,278	46,250	11,972	48,351	14,073	43,899	9,621
				20.6		41.1		28.1
	Barren	27,180	1,921	-25,259	7,748	-19,432	4,332	-22,848
				-92.9		-71.5		-84.1

면적이 변화한 요소는 '0'으로 가정하여 토지이용변화를 모의한 결과, 2009년의 토지피복도와 모의 결과의 전체 면적 일치도가 70.4 %로 나타났다. 일반적으로 토지이용변화 모델링에서 70 % 이상의 정확도를 모델 타당성의 기준으로 활용하고 있으므로 (Park, 2009), 본 모델을 기후변화 시나리오를 반영한 토지이용 변화 모의에 적용 가능한 것으로 판단하였다.

3. 토지이용변화 모의 결과

Table 3은 경기도 토지이용변화 모의 결과를 나타낸 표이고 Fig. 4에는 공간적으로 모의한 토지피복변화를 시나리오별로 도시한 결과이다. 시가화면적의 경우, 경기도 인구 증가를 반영한 A1B에서만 15.7 %로 크게 증가하는 것으로 나타났고, 다른 시나리오에서는 거의 변화가 없는 것으로 모의되었다. 그림에서 살펴보면 2040년의 A1B 시나리오 모의 결과 (b)에서 경기도 남부지역의 시가화면적이 기준도에 비해 확장되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 논면적의 경우, 경기도 전체 지역에서 30년 동안 약 10.71 %~14.1 % 감소하는 것으로 나타났으며, 밭면적은 13.7 %~21.6 % 증가하는 것으로 나타났다. 논면적 감소는 그림을 통해 확연하게 구분이 되지는 않지만 A2 시나리오에서 가장 적게 감소한 것으로 나타난 반면 밭면적은 가장 많이 증가하여, 토지이용변화 모의 시 가정한 농경지 수요량이 충분히 반영된 것으로 나타났다. 공간적인 변화를 살펴보면 상대적으로 서해와 인접한 경기도 서남부 지역의 논면적 감소 폭이 적은 것으로 나타났으며, 서울과 인접한 안양시, 의왕시 부근에서 가장 많이 감소하는 것으로 모의되었다. 밭 분포의 공간적 변화를 살펴보면 상대적으로 화성, 양평, 여주 등에서 밭면적이 상대적으

로 높게 증가하였다. 이에 비해, 산림면적은 세 시나리오 모두 미미한 변화만 보였으며 경제지향 시나리오인 A1B와 A2 시나리오 결과에서 1% 미만의 감소를 나타내었고, 환경지향 시나리오인 B1 시나리오에서는 3.8 % 증가하는 것으로 나타났다. 초지와 나지의 경우, 다른 피복에 비해 큰 폭의 변화율을 보여 초지의 경우 20.6 %~41.1 %까지 증가하는 것으로 나타났으며, 나지는 70 % 이상 감소하여 다른 용도의 토지로 전환되는 것으로 나타났다.

4. 지역별 토지피복변화 유형 분류

2009년 환경부 토지피복도상의 시·군별 시가화 및 나지면적, 녹지면적, 농경지면적 비율의 표준화 점수를 바탕으로 K-평균 군집분석을 실시한 결과는 Table 4와 같다. 경기도 31개 시·군의 토지피복 특성을 바탕으로 군집 분석한 결과, I 유형에 11개 시·군, II 유형에 6개 시·군, III 유형에 14개 시·군이 포함되는 것으로 나타났다. 각 유형별 중심 점수를 비교해보면, I 유형의 중심에서는 시가화 및 나지 점수 (Z_1)가 1.3로 평균 0.0에 비해 높은 값을 보였으며, 농경지 점수 (Z_2)는 -0.3, 녹지 점수 (Z_3)는 -0.8로 평균 이하 값을 보였다. 토지이용변화 모의 시 활용한 6가지 토지피복 분류로 I 유형의 중심을 살펴보면 Fig. 5 (a)와 같이 상대적으로 나지와 시가화지역의 표준화 점수가 높게 나타나고 있어, I 유형은 시가화면적이 넓게 분포한 도시 지역의 특징을 갖고 있음을 알 수 있다. II 유형의 중심에서는 농경지 점수 (Z_2)가 1.7로 매우 높게 나타났으며, Fig. 5 (b)의 세 분류에서도 논과 밭면적의 분포 비중이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. III 유형은 녹지 중심 지역으로서 산림 및

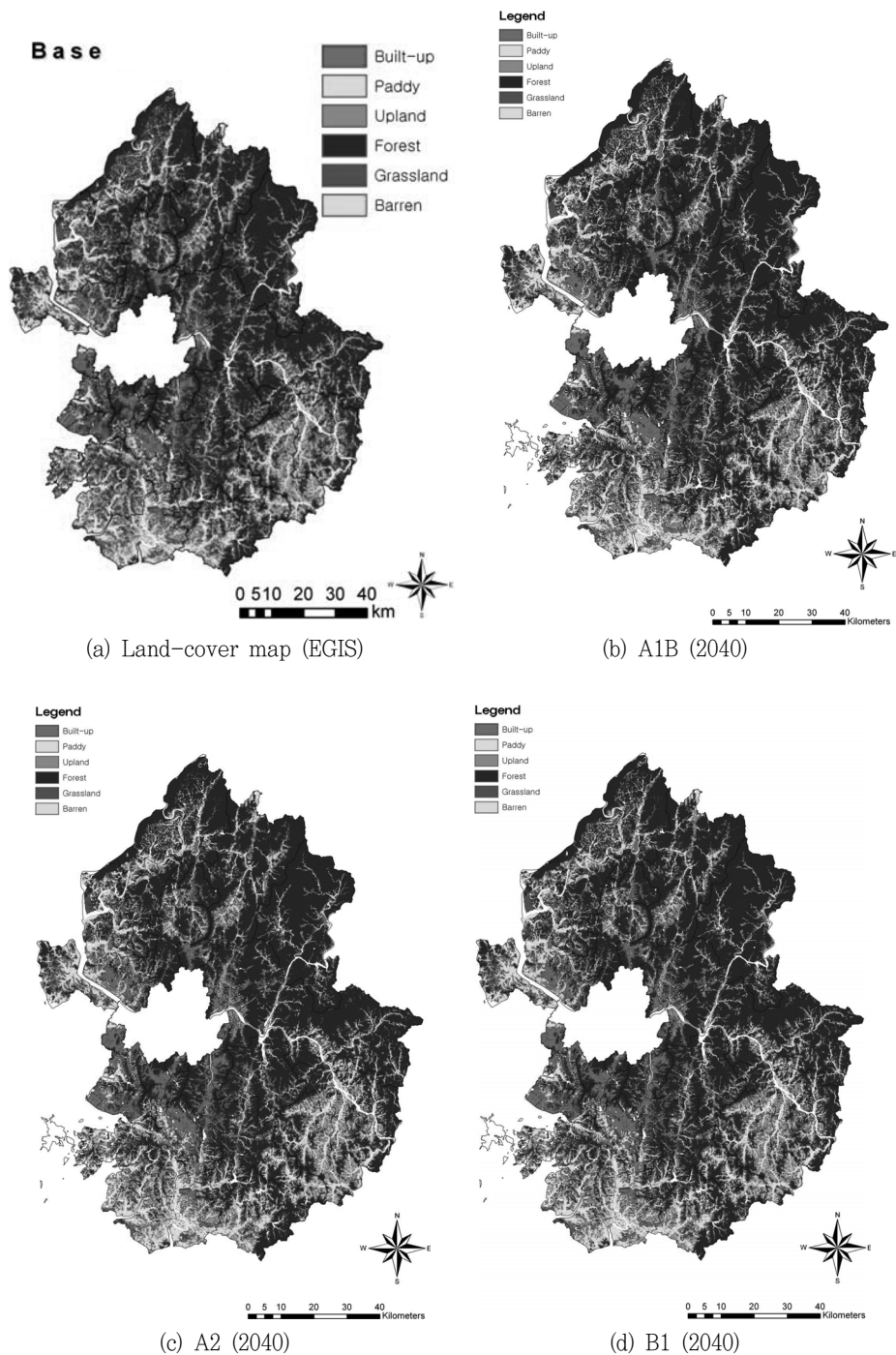


Fig. 4 Prediction of land-cover change according to the three scenarios

초지 면적의 표준화 점수가 0.9로 높게 나타나는 특징을 보이고 있다. 그러나 Fig. 5 (c)의 세 분류를 살펴보면 초지의 중심 점수가 -0.6 으로 다른 유형의 평균에 비해 작은 값을 나타내고 있으므로 III 유형은 산림 중심 유형의 특성을 가진 지역으로 분류하였다.

토지피복 특성을 바탕으로 군집 분석한 결과, 시가화 중심 유형인 I 유형에는 안산, 안양, 부천, 고양, 군포, 구리, 광명, 오산, 성남, 시흥, 수원 등 11개 시·군이 포함되는 것으로 나타났고, 안성, 김포, 화성, 이천, 평택, 여주 등 6개 시·군이 농경지 중심 유형인 II 유형으로 분류되었다. 이를 제외한 14개 시·군이

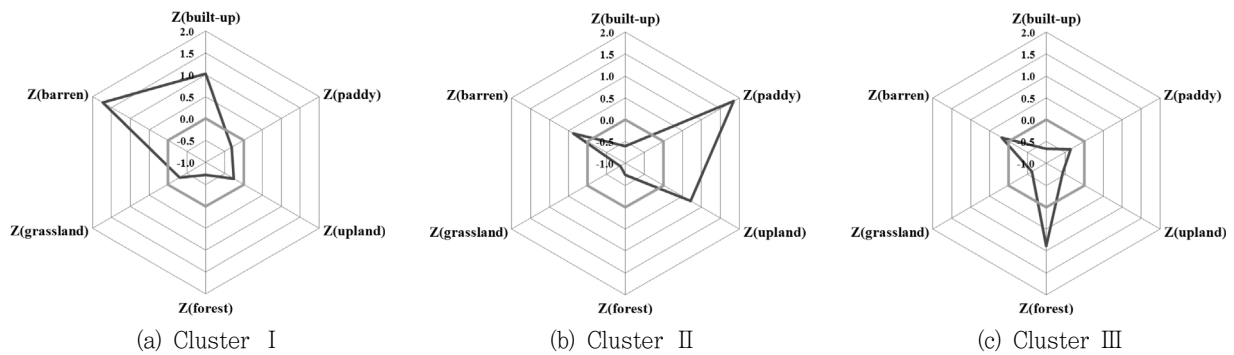


Fig. 5 Factor scores of each cluster center

Table 4 The results of cluster analysis

Cluster	Factor scores of cluster center			Frequency	Regions
	Z ₁	Z ₂	Z ₃		
I	1.3	-0.3	-0.8	11	Ansan, Anyang, Bucheon, Goyang, Gunpo, Guri, Gwangmyeong, Osan, Seongnam, Siheung, Suwon
II	-0.5	1.7	-0.9	6	Anseong, Gimpo, Hwaseong, Icheon, Pyeongtaek, Yeoju
III	-0.6	-0.5	0.9	14	Dongducheon, Gapyeong, Gwacheon, Gwangju, Hanam, Namyangju, Paju, Pocheon, Uijeongbu, Uiwang, Yangju, Yangpyeong, Yeoncheon, Yongin

산림 중심 유형으로 분류되어 대부분의 시·군이 III 유형에 속하는 것으로 나타났다. 이 중 각 유형별 대표 시·군을 선정하여 기후변화 시나리오별 토지이용변화 모의 결과의 특성과 유형별 기후변화 대응 전략의 방향을 다음과 같이 제안하였다.

가. I 유형 (시가화 중심유형)

시가화면적 비율이 전체 행정구역 면적 중 59.4 %를 차지하는 부천시 I 유형 지역 중 토지이용 변화가 가장 큰 것으로 모의된 수원을 대표 지역으로 선정하였다. 이 지역의 기후변화 시나리오에 따라 모의된 토지이용 변화 결과를 표준화 점수로 변환하여 도시한 결과는 Fig. 6 (a), (b)과 같다. 부천의 경우, 기준연도의 토지이용에 비해 환경 보존을 강조하는 B1 시나리오에서 토지피복변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 고성장 사회 시나리오인 A1B 시나리오에서는 시가화면적의 표준화 점수가 기준연도의 2.7에서 2040년에 3.0으로 증가하였고, A2 시나리오에서는 초지 면적의 표준화 점수가 -1.0에서 0.2로 증가하였다. I 유형에 포함된 지역 중 가장 변화 폭이 크게 나타난 수원에서도 A1B 시나리오에서는 시가화지역의 점수가 증가하였고, A2 시나리오에서 초지 비율의 표준화 점수가 증가하는 특징을 보이고 있다. 반면, B1시나리오에서는 기준연도인 Base 비율과 가장 변화가 적게

모의되었음을 알 수 있다. 따라서 본 유형에 해당하는 지역에 경제 성장을 지향하는 시나리오를 적용할 경우, 증가하는 시가화면적을 고려하여 도시 내부의 에너지 사용 및 폐기물 처리에 의한 배출 저감 전략에 중점을 두어 대응책을 마련하는 것이 적합할 것이라 사료된다. 또한, 초지 면적 증가를 고려하여 도시 내부의 녹화사업에 중점을 두어 기후변화 대응 전략을 수립하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

나. II 유형 (농경지 중심유형)

II 유형의 대표 지역으로는 농경지 표준화 점수가 가장 높게 나타난 평택과 기후변화 시나리오별 토지피복 변화 편차가 가장 큰 화성을 선정하여, 두 지역의 표준화 점수를 각각 Fig. 6의 (c), (d)에 도시하였다.

평택의 경우, 기준연도 (Base)에 논면적이 평택시 전체 면적의 45.5 %를 차지하였으나 기후변화 시나리오에 따른 토지피복변화 모의 결과, 2040년에 43.0 % (B1 시나리오)~44.8 % (A2 시나리오)의 비율을 나타내는 것으로 모의되었으며 발면적 비율은 기존의 13.3 %에서 17.2 % (B1 시나리오)~19.1 % (A2 시나리오)로 증가하는 것으로 나타났다. 이를 표준화하여 나타낸 결과를 살펴보면, 평택시의 논 비율의 표준화 점수는 기존의 3.2에서 3.0 (B1 시나리오)~3.1 (A2 시나리오)로 조정되어 변화가 거의 나타나지 않았으나 밭 비율 표준화 점수는 0.7에서 1.1 (B1 시나리오)~1.5 (A2 시나리오)로 상대적으로 크게 증가하는 것으로 모의되었다.

화성에서는 기존의 30.7 %를 차지하는 논면적 비율이 2040년에는 27.5 % (B1 시나리오)~29.0 % (A2 시나리오)로 감소하고, 발면적 비율은 기존의 14.6 %에서 17.4 % (B1 시나리오)~19.4 % (A2 시나리오)로 증가하는 것으로 모의되었다. 이를 표준화 점수로 나타내면 논면적 비율의 경우, 1.8에서 1.5 (B1 시나리오)~1.6 (A2 시나리오)로 감소하고, 발면적 비율의 표준화 점수는 0.6에서 1.1 (B1 시나리오)~1.5 (A2 시나리오)로 크게 증가하는 것으로 나타난다.

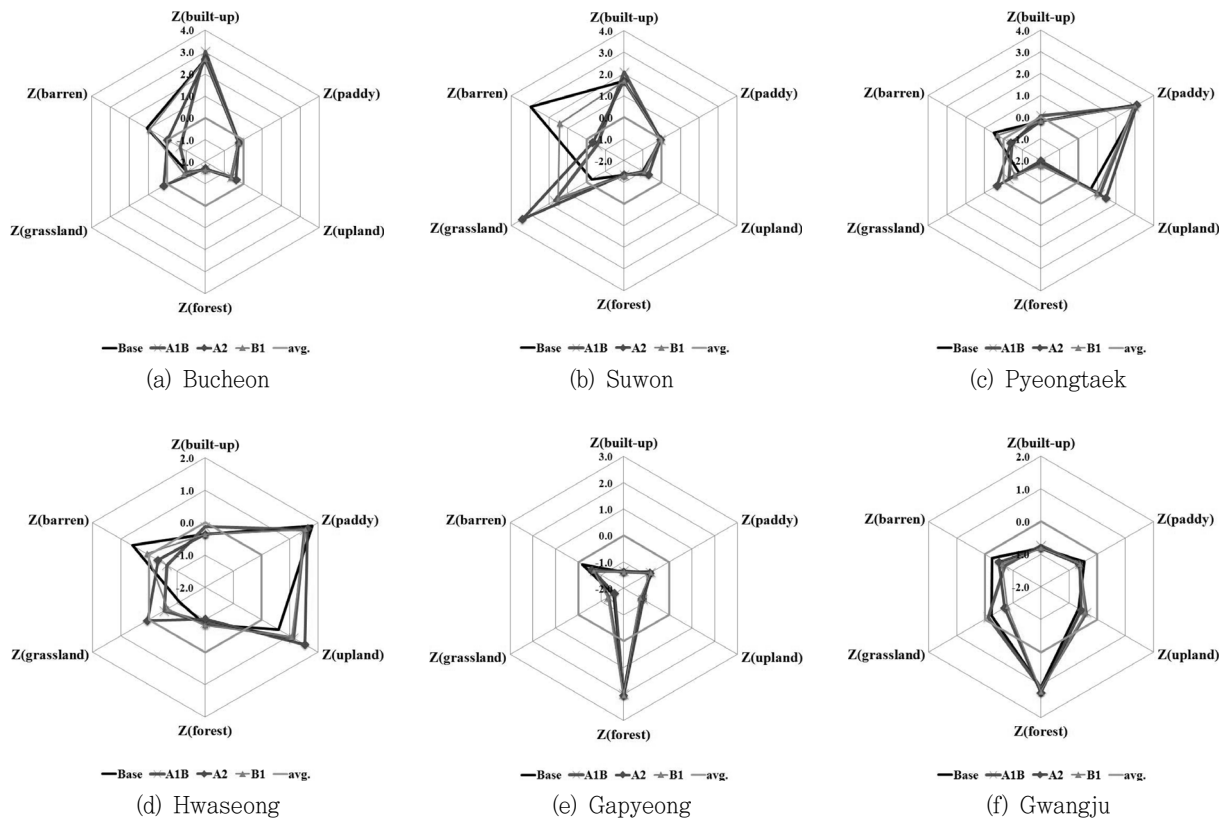


Fig. 6 Factor scores of each region under climate change scenarios (A1B, A2, B1)

따라서 II 유형 지역에서는 농경지 표준화 점수의 변화폭이 크게 나타나는 지역을 중심으로 밭 작물 경작방법에 친환경 농법을 적용하여 기후변화 대응책을 마련할 필요가 있을 것으로 사료된다. 즉, 농경지를 대상으로 관개 방식, 시비법 등을 개선함으로써 지속가능한 토지이용방안을 모색하는 것이 지자체의 온실가스 감축에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

다. III 유형 (산림 중심유형)

III 유형에 해당하는 14개 시·군 중, 전체 면적의 85.7 %가 산림인 가평군과 68.6 %가 산림인 광주시의 시나리오별 토지피복변화를 Fig. 6 (e), (f)에 나타내었다. 가평군은 산림 분포비율이 가장 높은 지역이며 광주시는 기후변화 시나리오에 따른 토지피복 면적의 변화가 14개 시·군 중 가장 큰 지역이다. 가평군에서는 기준연도와 비교하여 시나리오별 모의에 따른 토지피복 변화 결과의 차이가 거의 없었으며, 광주시에서는 A2, B1 시나리오에서 초지와 나지지역이 산림지역으로 전환되어 약 0.5 % (A2 시나리오)~3.8 % (B1 시나리오)의 산림 증가를 나타내었고, A1B 시나리오에서는 발면적이 1.4 % 정도 증가하는 것으로 모의되었다. 이는 표준화 점수로 환산하면 0.3 미만의 변화로서 다른 유형에 비해 산림 중심 유형에 포함되는 지역에서의 토지

피복 변화가 매우 적은 것을 알 수 있다.

따라서 본 유형에 해당하는 지역의 토지피복변화 특성상, 개발로 인한 토지피복의 변화에 중점을 두는 것 보다는 주요 탄소 저장고인 기존 산림 지역의 유지·관리를 통한 보존 전략을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 지역별 수목 밀도와 수종 등을 고려한 산림 지역의 유지·관리 전략을 마련함으로써 기후변화 대응에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 온실가스 배출 시나리오에 나타난 사회·경제적 가정에 따라 모의된 전지구 규모의 토지이용변화 결과를 바탕으로 국내의 미래 토지피복 변화를 공간적으로 예측하였다. 이를 바탕으로 지역 특성에 맞는 유형별 저감대책 방안을 제안하기 위하여 토지피복 특성에 따라 시·군별 유형을 분류한 후, 토지피복변화 경향을 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전지구 규모의 통합모형인 AIM 모델에서 산출된 OECD 지역의 토지이용변화 결과와 경기도 지역의 사회·물리적 특성을 결합하여 구성된 지역 규모의 기후변화 시나리오를 활용하였고, 농업진흥구역 및 그린벨트, 상수원 보호구역, 국토환경성 평가 1

등급 지역의 변화제한 조건을 시나리오별로 차등 적용하여 경기도 지역의 향후 30년간의 토지이용변화를 모의하였다.

2. 총 토지이용변화를 살펴보면 시가화면적의 경우, A1B 시나리오에서만 15.7 %로 크게 증가하는 것으로 나타났고, 다른 시나리오에서는 거의 변화가 없는 것으로 모의되었다. 논면적은 30년 동안 약 10.7 %~14.1 % 감소하는 것으로 나타났으며, 밭면적은 13.7 %~21.6 % 증가하는 것으로 나타났다. 산림면적은 세 시나리오 모두 큰 변화를 보이지 않았고 환경지향 시나리오인 B1 시나리오에서 3.8 % 정도 증가하였다.

3. 시·군별 토지피복 특성을 이용하여 군집분석을 실시한 결과, I 유형 (시가화 중심 지역)에 11개 시·군, II 유형 (농경지 중심 지역)에 6 개 시·군, III 유형 (산림 중심 지역)에 14개 시·군이 해당하는 것으로 나타났다.

4. I 유형에 해당하는 지역의 기후변화 대응을 위해서는 시가화지역 내에서 친환경 에너지 활용 및 에너지 절약에 중점을 두어 전략을 수립할 필요가 있으며, II 유형에서는 농경지를 대상으로 관개 방식, 시비법 등을 개선함으로써 지속가능한 토지이용 방안을 모색하는 것이 지자체의 온실가스 감축에 기여할 수 있을 것이라 판단된다. III 유형의 경우, 지역별 수목 밀도와 수종 등을 고려한 산림 지역의 유지·관리 전략을 마련하는 것이 기후변화 대응에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

본 연구에서는 다양한 시나리오에 따른 토지피복변화 모의를 수행하였으며, 모의 결과를 바탕으로 군집분석을 수행하여 지역 유형별 토지피복변화 특성을 분석하고, 각 지역 유형별 토지이용방안을 제시하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 결과는 토지피복특성 중심으로 살펴본 기후변화 대응방안으로서 한계가 있다. 그러므로 본 연구 결과는 지자체별로 지역 특성을 고려한 기후변화 대응책 마련하는 데 있어 구체적인 전략을 수립하기 전의 기초 단계에서 다양한 시나리오를 적용하고 중점 분야를 파악하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Alcamo, J., Kreileman, G. J. J., and R. Leemans, 1996. *Integrated scenarios of global change*. Pergamon Press, London
2. Bae, D. H., Jung, I. W., and W. T. Kwon, 2007. Generation of High Resolution Scenarios for Climate Change Impacts On Water Resources(I): Climate Scenarios on Each Sub-basins. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(3): 191-204. (in Korean)
3. Brown, D. G., Pijanowski, B. C., and J. D. Duh, 2002. Modeling the relationships between land use land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *J Environmental Management*. 59(4): 247-263.
4. Deal, B. and D. Schunk, 2004. Spatial dynamic modeling and urban land use transformation: a simulation approach to assessing the costs of urban sprawl. *Ecological Economics* 51(1): 79-95.
5. IPCC, 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
6. Lambin, E. F., Rounsevell, M. D. A. and H. J. Geist, 2000. Area agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82:321-331.
7. Lee, Y. J. and S. J. Kim, 2007. Surveying and Geo-Spatial Information Engineering : A Modified CA-Markov Technique for Prediction of Future Land Use Change. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 27(6): 809-817. (in Korean)
8. Morita, T., Matsuoka, Y., Jiang, K., Masui, T., Takahashi, K., Kainuma, M., and R. Pandey, 1998. Quantification of IPCC-SRES storyline using the AIM/EMISSION-LINKAGE model. the IPCC Modeler Meeting of the Special Report on Emission Scenarios.
9. Nakicenovic, N., and R. Swart, R. 2000. *IPCC special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.
10. Oh, Y.-G., Choi, J.-Y., Bae, S.-J., Yoo, S.-H., and S.-H. Lee, 2010a. Research Paper : A Probability Mapping for Land Cover Change Prediction using CLUE Model. *Journal of the Korean Society of Rural Planning (KSRP)* 16(2): 47-55. (in Korean)
11. Oh, Y.-G., Yoo, S.-H., Lee, S.-H., and J.-Y. Choi, 2010b. Prediction of paddy field change based on climate change scenarios using the CLUE model. *Paddy and Water Environment* 1-15. (in Press)
12. Park, C., 2009, The Analysis of potential Reduction of CO₂ Emission for Low Carbon Society - Focused on Land Use Change-. Master thesis. Seoul National University. (in Korean)
13. Park, M. W., 2007. Special Feature : An Issue and Development of the urban Policy in Gyeonggi Province.

- Journal of Korean Society of Civil Engineers* 55(7): 19-27. (in Korean)
14. Schulp, C. J. E., Nabuurs, G.-J., and P. H. Verburg, 2008. Future carbon sequestration in Europe-Effects of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 127(3-4): 251-264.
15. Veldkamp, A., and P.H. Verburg, 2004. Modelling land use change and environmental impact. *Journal of Environmental Management* 72(1-2): 1-3.
16. Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and S. S. A Mastura, 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management* 30(3): 391-405.
17. Verburg, P. H., De Koning, G. H. J., Kok, K., Veldkamp, A., and J. Bouma, 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling* 116(1): 45-61.