

RCP 시나리오 기반 Dyna-CLUE 모형을 이용한 황구지천 유역의 토지이용변화 분석

김지혜 · 박지훈 · 송인홍* · 송정현 · 전상민 · 강문성**

서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 · *서울대학교 농업생명과학연구원

**서울대학교 조경·지역시스템공학부, 서울대학교 농업생명과학연구원

Analysis of Land Use Change Using RCP-Based Dyna-CLUE Model in the Hwangguji River Watershed

Kim, Jihye · Park, Jihoon · Song, Inhong* · Song, Jung-Hun · Jun, Sang Min · Kang, Moon Seong**

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

**Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University*

***Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University,*

Research Institute for Agricultural and Life Sciences, Seoul National University

ABSTRACT : The objective of this study was to predict land use change based on the land use change scenarios for the Hwangguji river watershed, South Korea. The land use change scenario was derived from the representative concentration pathways (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios. The CLUE (conversion of land use and its effects) model was used to simulate the land use change. The CLUE is the modeling framework to simulate land use change considering empirically quantified relations between land use types and socioeconomic and biophysical driving factors through dynamical modeling. The Hwangguji river watershed, South Korea was selected as study area. Future land use changes in 2040, 2070, and 2100 were analyzed relative to baseline (2010) under the RCP4.5 and 8.5 scenarios. Binary logistic regressions were carried out to identify the relation between land uses and its driving factors. CN (Curve number) and impervious area based on the RCP4.5 and 8.5 scenarios were calculated and analyzed using the results of future land use changes. The land use change simulation of the RCP4.5 scenario resulted that the area of urban was forecast to increase by 12% and the area of forest was estimated to decrease by 16% between 2010 and 2100. The land use change simulation of the RCP8.5 scenario resulted that the area of urban was forecast to increase by 16% and the area of forest was estimated to decrease by 18% between 2010 and 2100. The values of Kappa and multiple resolution procedure were calculated as 0.61 and 74.03%. CN (III) and impervious area were increased by 0-1 and 0-8% from 2010 to 2100, respectively. The study findings may provide a useful tool for estimating the future land use change, which is an important factor for the future extreme flood.

Key words : Climate change, Land Use Change, RCP Scenarios, CLUE

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 극한 강수 사상이 증가하면서 극한 홍수 역시 빈번하게 발생하고 있다. 지난 5년

(2007~2011년) 동안 우리나라의 연 최대 강우강도는 1970년대 초반에 비해 30% 가량 증가하였으며, 2011년 7월에는 서울에 100년 빈도 이상의 홍수가 발생하여 막대한 피해를 일으킨 바 있다. 설계 빈도를 초과하는 극한 홍수는 수공구조물을 파괴하고 재산 및 인명 피해를 일으키는 원인이 되므로, 기후변화에 따른 미래의 홍수를 예측하고 이에 대비할 필요가 있다 (Kim and Ryu,

Corresponding author : Park, Jihoon

Tel. : 02-880-4597

E-mail : gtj825@snu.ac.kr

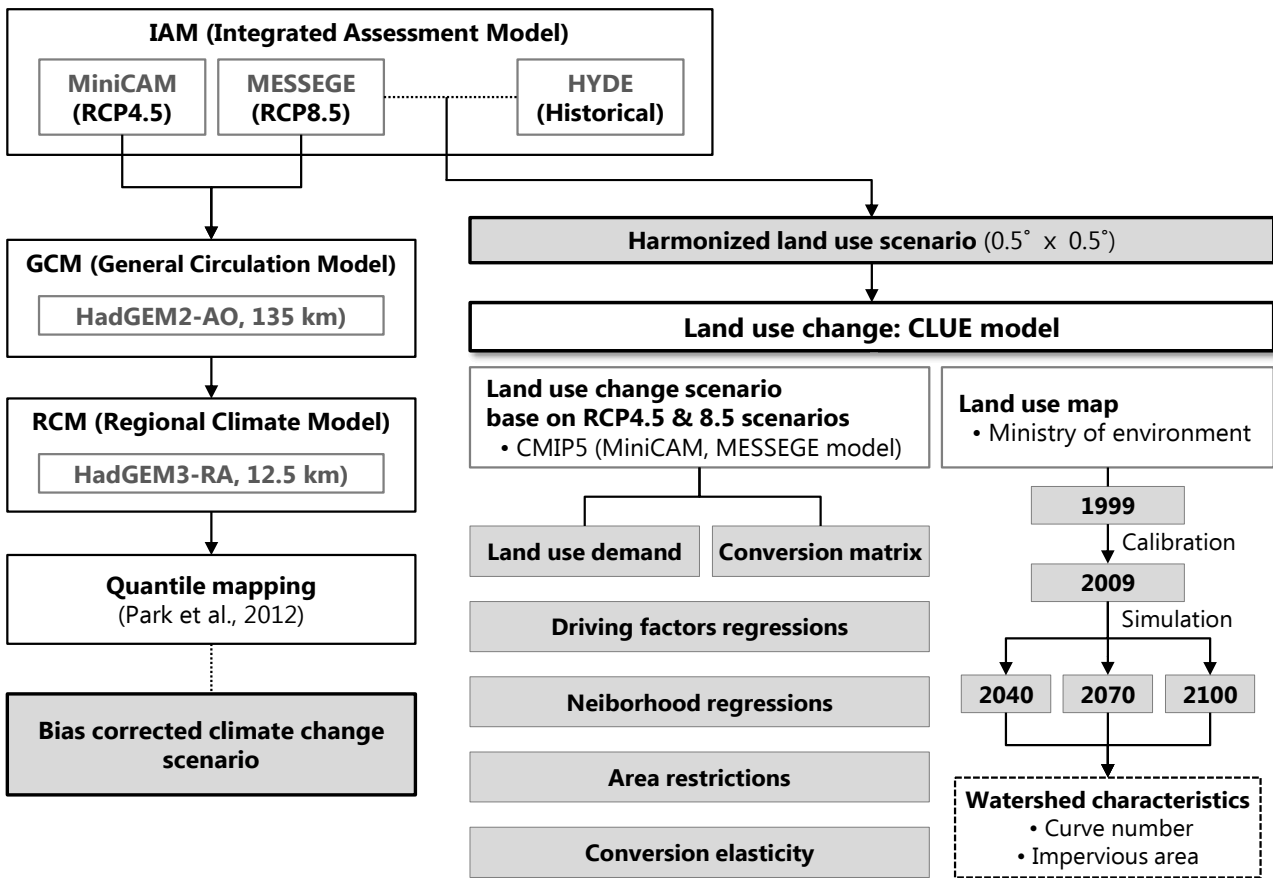


Figure 1. Flow chart of this study (building process of climate and land use change scenarios)

유역에 대해 저해상도로 모의하는 한계를 지닌 반면, CLUE-S 모형은 보다 세부적인 단위에서의 모의가 가능하도록 수정되었다. 또한, CLUE-S 모형 및 Dyna-CLUE 모형에서는 토지이용과 구동 요인 사이의 관계를 바탕으로 토지이용을 할당한 후 이를 전체 토지이용 요구량으로 제어하는 피드백 과정을 통해 토지이용변화가 모의되며, Dyna-CLUE 모형에서는 구동 요인과의 관계뿐만 아니라 이웃 격자와의 관계도 고려할 수 있다.

본 연구에서는 CLUE 모형 중 가장 최근에 개발된 모형인 Dyna-CLUE 모형을 이용하였다. Dyna-CLUE 모형은 위치 적합성, 토지이용변화 요구량, 변화 특성, 제한 조건 등 4 가지 부분으로 구성되어 있다.

나. 모형의 구성

1) 위치 적합성

어떤 격자에서 다른 토지이용으로의 변환이 일어날 때, 그 위치에 가장 적합한 토지이용으로 변환이 이루어진다. 토지이용의 위치적합성은 토지이용과 구동 요인

사이의 관계 또는 주변 토지이용과의 관계를 통해 나타낼 수 있다.

식 (1)은 토지이용과 구동 요인의 관계를 이분형 로지스틱 모형으로 나타내고 있다.

$$\log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i} \quad (1)$$

여기서, P_i 는 격자 i 에 어떠한 토지이용이 존재할 확률, $X_{n,i}$ 는 구동요인, β_n 은 각 구동요인에 대한 계수를 의미한다.

토지이용변화를 일으킬 수 있는 구동 요인에는 토양, 기후, 지형 등의 생물물리적 요인과 인구, 기술, 정치 구조, 경제적인 조건 등의 인위적인 요인이 있다 (Veldkamp and Fresco, 1996). 본 연구에서는 Veldkamp and Fresco (1996), Verburg et al. (2002), Oh (2011) 등의 연구를 참고하여 고도경사향 등의 지형인자, 도시주요기관도로수역까지의 접근성, 토양 배수깊이-종류 등의

지질학적 조건, 인구 밀도를 구동요인으로 설정하였다. 지형 자료 및 인구 자료를 기반으로 구동요인 자료를 구축하고, 2009년 토지이용도를 이용하여 각 토지이용과 구동요인의 관계를 분석하였다.

식 (2)와 식 (3)은 토지이용과 주변 격자의 관계를 이분형 로지스틱 모형으로 나타내고 있다.

$$\log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 F_{1,i} + \beta_2 F_{2,i} + \dots + \beta_n F_{n,i} \quad (2)$$

$$F_{k,d,i} = \frac{n_{k,d,i}/n_{d,i}}{N_k/N} \quad (3)$$

여기서, P_i 는 격자 i 에 어떠한 토지이용이 존재할 확률, $F_{n,i}$ 는 누적 인자 (enrichment factor), β_n 은 각 누적 인자에 대한 계수, $n_{k,d,i}$ 는 i 격자에 대한 d 크기의 이웃 격자들 중 토지이용 k 에 해당하는 격자 수, $n_{d,i}$ 는 i 격자에 대한 d 크기의 이웃 격자 수, N_k 는 토지이용 k 에 해당하는 전체 격자 수, N 은 전체 격자 수를 의미한다.

토지이용과 구동요인 및 주변 격자의 회귀 분석 결과는 ROC (receiver operation characteristic) 곡선법에 의해 검정하였다. ROC 곡선의 면적이 1.0이면 모의 결과가 실측값과 완벽하게 일치함을 의미하며, 0.5이면 모의값과 실측값이 완전하게 랜덤 관계임을 의미한다 (Pontius and Schneider, 2001).

2) 토지이용변화 요구량

RCP4.5와 8.5 토지이용변화 시나리오를 이용하여 연도별 토지이용변화 요구량을 산정하였다. 시나리오의 격자 크기가 경위도 기준 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 이므로, 유역 경계를 기준으로 면적 평균하여 유역 단위의 시나리오로 상세화 (downscaling)하였다. 시나리오의 항목을 환경부의 대분류 항목을 기준으로 시가화건조지역, 논, 밭, 산림 (산림 및 초지), 나지, 수역 (습지 및 수역) 6 개의 토지이용으로 재분류하였다. 이 기준에 맞추어 시나리오의 항목 중 시가지 (urban land)는 토지이용도의 시가화건조지역, 농경지 (crop land)는 논과 밭, 1차 토지 (primary land)와 목초지 (pasture)는 산림으로 설정하고, 2차 토지의 면적을 각 토지이용에 분배한 후 남은 면적을 나지로 설정하였다. 1차 토지란 인간의 영향을 받지 않은 토지를 의미하며, 2차 토지란 이전에 인간의 영향을 받았으나 현재 복구가 이루어진 토지를 의미한다 (Hurtt et al., 2011). 논과 밭은 시나리오의 농경지 항목으로 총 면적을 결정한 후에, 과거 토지이용도의 논과 밭 면적 비율로 평균 비율을 산정

하여 구분하였다.

과거의 토지이용변화와 시나리오의 추세를 일치시키기 위하여 1995~2009년의 지적공부등록 지목별 면적과 시나리오의 과거 모의 결과를 비교하여 시나리오를 보정하였다. 시나리오의 각 변환 항목별로 가중치를 두어 토지이용의 증가폭 또는 감소폭을 조절하였고, 이를 미래 시나리오에 적용하여 시나리오를 보정한 후에 2040년, 2070년, 2100년의 토지이용별 면적을 산정하였다.

3) 변화 특성

변화 특성에는 전이 특성 값과 변환 행렬이 있다. 전이 특성 값은 다른 토지이용으로의 변화 가능성을 의미한다. 전이 특성 값은 0과 1 사이의 값으로 표현되며 토지이용의 전이 특성이 1이면 그 토지이용으로부터 다른 토지이용으로의 전이가 불가능하고 0이면 전이가 자유로움을 의미한다. 전이 특성에 따라 모형의 모의 결과가 달라지기 때문에, 모형의 보정을 통하여 가장 적절한 값을 결정하였다.

변환 행렬은 토지이용들 간의 상호 변화 가능성을 의미하며 0 또는 1로 이루어진 행렬로 표현된다. 변환 행렬의 각 행에서부터 열 방향으로 변환이 이루어지며, 1은 변환이 가능함을 의미하고 0은 변환이 불가능함을 의미한다. 시계열 토지이용도를 통해 각 토지이용 항목 간의 변환 여부를 파악하고, 이를 통해 변환 행렬을 구성하였다.

4) 제한 조건

제한 조건은 정책 또는 법에 의해 토지이용이 제한되는 구역으로, 제한이 이루어지는 구역은 -9998로, 제한이 없는 구역은 0으로 표현하여 격자 자료로 입력된다. 본 연구에서는 농업진흥 및 보호구역과 상수원보호구역을 제한조건으로 설정하였다.

5) 토지이용의 할당

Dyna-CLUE 모형에서 토지이용의 할당은 다음 식 (4)를 통해 이루어진다.

$$P_{tot_{i,t,lu}} = P_{loc_{i,t,lu}} + P_{nbh_{i,t,lu}} + ELAS_{lu} + COMP_{t,lu} \quad (4)$$

여기서, $P_{tot_{i,t,lu}}$ 는 격자 i 에 토지이용 lu 가 존재할 수 있는 총 확률, $P_{loc_{i,t,lu}}$ 은 구동 요인에 따른 위치 적합 확률, $P_{nbh_{i,t,lu}}$ 은 주변 격자에 따른 적합 확률, $ELAS_{lu}$ 는 전이 특성 값, $COMP_{t,lu}$ 는 경쟁 이득 값 (competitive advantage)을 의미한다.

각 격자별로 총 확률이 가장 큰 토지이용이 할당되며,

토지이용별 면적이 토지이용 요구량을 만족하는지 여부에 따라 $COMP_{t,lu}$ 값이 상향 또는 하향 조정되면서 반복 계산이 이루어진다.

Figure 2는 CLUE 모형의 토지이용 할당 과정을 보여주고 있다.

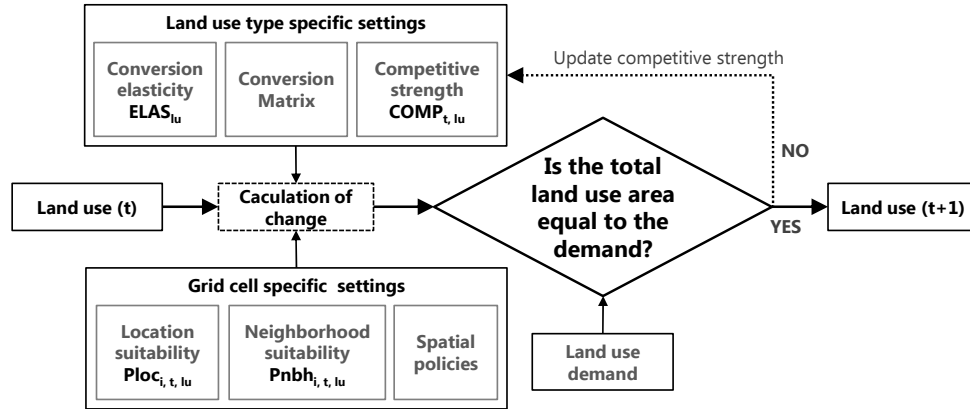


Figure 2. Land use allocation procedure

다. 모형의 적용성 평가

CLUE 모형의 적용성을 평가하기 위하여 1999년의 토지이용도로부터 2009년의 토지이용변화를 모의하고, 2009년 토지이용도와 비교하였다. 모형의 적용성 평가에는 Kappa 값과 다중 해상도 절차 (Multiple Resolution Procedure)를 이용하였다.

1) Kappa 값

Kappa 값은 모의 결과와 실측 자료 사이의 유사성을 평가하는 변량으로 (Hagen, 2002), 토지이용변화의 모의 결과를 평가하기 위해 자주 사용된다. Kappa 값을 산정하기 위해, 우선 Table 1과 같이 두 개의 토지이용도 A, B에 대해 토지이용 항목 별로 변화율을 산정하여 분할

표 (contingency table)를 작성한다. 여기서, p_{ab} 는 토지이용도 A의 a 항목에서 토지이용도 B의 b 항목으로 분류된 비율을 의미한다. 분할표의 각 성분을 식 (5)~식 (7)에 대입하여 Kappa 값을 산정할 수 있다.

Kappa 값이 1.0이면 모의 결과와 실측 자료가 완벽하

게 일치함을 의미하며, 0.7 이상이면 모의 결과가 실측 자료를 잘 반영하는 것으로 판단한다.

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \tag{5}$$

$$P(A) = \sum_{i=1}^n p_{ii} \tag{6}$$

$$P(E) = \sum_{i=1}^n (p_{iT} \times p_{Ti}) \tag{7}$$

여기서, K 는 Kappa 값, n 은 토지이용 항목의 수, p_{ab} 는 토지이용도 A의 a 항목과 토지이용도 B의 b 항목이 사상된 비율, p_{nT} 는 토지이용도 A의 각 항목과 연관된

Table 1. Contingency table for calculating Kappa value (Hagen, 2002)

		Map B categories				Total
		1	2	...	n	
Map A categories	1	p_{11}	p_{12}		p_{1n}	p_{1T}
	2	p_{21}	p_{22}		p_{2n}	p_{2T}

	n	p_{n1}	p_{n2}		p_{nn}	p_{nT}
Total		p_{T1}	p_{T2}	...	p_{Tn}	1

전체 비율, p_{Tn} 는 토지이용도 B의 각 항목과 연관된 전체 비율을 의미한다 (Hagen, 2002).

2) 다중 해상도 절차 (Multiple Resolution Procedure)

다중 해상도 절차는 토지이용변화 모의 결과를 평가하는 방법으로, 격자 기반의 토지이용도에 다양한 크기의 윈도우 ($n \times n$)를 적용하여 윈도우 크기에 따른 일치 정도를 산정하는 방법이다. 모의 결과와 실측 자료의 일치 여부를 격자 하나의 단위로만 조사할 경우, 일치하지 않는 격자들이 완전히 다른 패턴을 가질 수 있다 (Costanza, 1989). 반면, 다중 해상도 절차의 경우 윈도우 크기를 늘려가면서 일치 정도를 판단하기 때문에 전체적인 패턴이 일치하는가를 평가할 수 있다.

윈도우 크기에 따른 일치 정도는 식 (8)로 산정된다.

$$F_w = \frac{\sum_{s=1}^{t_w} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^p |a_{1i} - a_{2i}|}{2w^2} \right]_s}{t_w} \quad (8)$$

여기서, F_w 는 윈도우 크기가 w 일 때의 일치 정도, $|a_{1i} - a_{2i}|$ 는 윈도우 s 내에서 토지이용이 i 인 격자 수의 차, p 는 윈도우 s 내의 토지이용 종류, t_w 는 윈도우의 총 수를 의미한다.

이렇게 계산된 F_w 는 윈도우 크기가 커질수록 증가하는 양상을 보인다. 식 (9)는 윈도우 크기에 따라 변화하는 일치 정도를 하나의 변량으로 표현하여 전반적인 일치 정도를 나타내기 위해 작은 크기의 윈도우에 가중치를 두어 F_t 를 가중 평균한 것이다.

$$F_t = \frac{\sum_{w=1}^n F_w e^{-k(w-1)}}{\sum_{w=1}^n e^{-k(w-1)}} \quad (9)$$

여기서, F_t 는 전체적인 일치 정도, n 은 계산에 활용한 윈도우의 수, k 는 0~1의 상수를 의미한다. k 값이 0이면 모든 윈도우에 동일한 가중치가 실리고 1에 가까워질수록 작은 윈도우에 가중치가 실리며, 큰 윈도우에 대해서는 0.1일 때 가장 적절한 가중치가 실리게 된다 (Costanza, 1989).

2. 토지이용변화 시나리오

가. RCP 시나리오의 개요

기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC)는 1988년에 설립된 이후 기후변화 평가보고서를 지속적으로 발간해왔다 (NIMR, 2011). 지난 2007년에 온실가스 배출 특별 보고서 (Special Report on Emission Scenarios, SRES) (IPCC, 2000)를 기반으로 IPCC 4차 기후변화 평가보고서 (AR4)가 발간된 이후, 2013~2014년 발간된 IPCC 5차 기후변화 평가보고서 (AR5)를 위한 표준 온실가스 시나리오로 대표농도경로 (RCP)를 새롭게 선정하였다. (Moss et al., 2008).

RCP 시나리오는 대표 복사강제력에 따라 RCP2.6, RCP4.0, RCP6.0, RCP8.5 등 네 종류로 분류되며, 2.6~8.5 등의 숫자는 2100년에 도달하게 될 복사강제력을 의미하는 숫자로, 단위는 W/m^2 이다. RCP8.5는 저감 대책 없이 현재의 추세로 온실가스가 배출될 경우의 시나리오이고, RCP2.6은 지구가 최대의 회복력을 가질 때의 시나리오이며, RCP4.5와 RCP6.0은 온실가스 저감 정책이 실현될 때의 시나리오이다.

본 연구에서는 온실가스 저감 정책으로 비교적 변화가 적을 것이라 예상되는 RCP4.5와 변화가 가장 두드러지게 나타날 것이라 예상되는 RCP8.5를 대표 시나리오로 선정하였다.

나. 토지이용변화 시나리오

RCP4.5와 8.5 토지이용변화 시나리오는 HYDE 3.1 모형의 과거 (1500~2005년) 모의 결과와 MiniCAM 및 MESSAGE 모형의 미래 (2005~2100년) 모의 결과의 조화 (harmonize)를 통해 산출되었다 (Hurtt et al., 2011). 시나리오의 공간 격자는 경위도 기준 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 이며, 각 격자 내에서 시가지 (urban land), 목초지 (pasture), 농경지 (crop land), 1차 토지 (primary land), 2차 토지 (secondary land) 사이의 변화량이 1년 단위로 표현된다. (Hurtt et al., 2011).

시나리오의 변화량은 한 격자의 면적에 대해 t 년도의 토지이용 항목 중 $(t+1)$ 년도에 다른 토지이용으로 변화한 비율을 나타내며 이를 이용하여 기준년도로부터 변화량을 누적시켜 미래의 토지이용별 면적을 산정하였다.

3. 대상 유역 선정

본 연구에서는 안성천의 제 2지류인 황구지천을 대상 유역으로 선정하였다. 황구지천은 경기도 수원시와 화성시에 위치하고 있으며 유역면적은 261.11 km^2 , 유로연장은 37.52 km 이다. 황구지천 유역의 토지이용은 시가지 36%, 논 19%, 밭 7%, 산림 31%로 이루어져 있

다. Figure 3은 황구지천 유역에 대한 정보를 보여주고 있다.

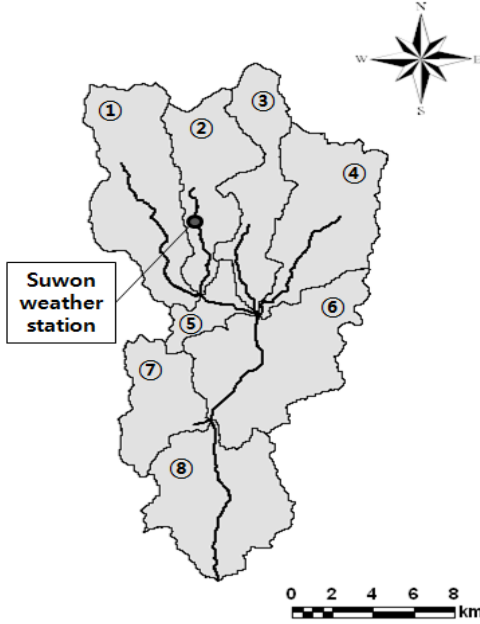


Figure 3. Map of the study watershed and subbasins

4. 공간 자료 구축

가. 지형자료

황구지천 유역에 대해 환경부의 1999년, 2009년 중분류 토지이용도를 구축하였다 (Figure 4). 대분류 토지이용도는 토지이용을 시가화건조지역, 논, 밭, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역의 7 개로 분류하는 반면, 중분류 토지이용도는 23 개로 분류하고 있다. 중분류 토지이용도를 대분류 항목으로 재분류한 후에, 대분류 항목 중 산림과 초지, 습지와 수역을 각각 하나로 분류하여 시가화건조지역, 논, 밭, 산림 (산림 및 초지), 나지, 수역 (습지 및 수역)의 6 개 토지이용으로 재분류하였다. CLUE 모형에서 하나의 토지이용은 면적의 변화가 없게 유지되어야 하기 때문에, 수역 면적을 동일하게 조절하였다. 지적공부등록 지목별 면적을 확인한 결과 2009년의 수역 면적이 가장 현실을 잘 반영하는 것으로 분석되어, 2009년의 수역 면적을 1999년 토지이용도에 중첩하여 수역 면적을 수정하였다. 1999년과 2009년의 토지이용도를 이용하여 모형의 모의 능력을 평가한 후에, 2009년 토지이용도가 2010년을 대표하는 것으로 보고 이를 기준으로 2040년, 2070년, 2100년의 토지이용변화를 모의하였다.

토양도는 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 이용하였다. 개략토양도에는 토양통명, 토양 배수 등급, 토양 깊이, 토양 종류 등의 자료가 포함되어 있다.

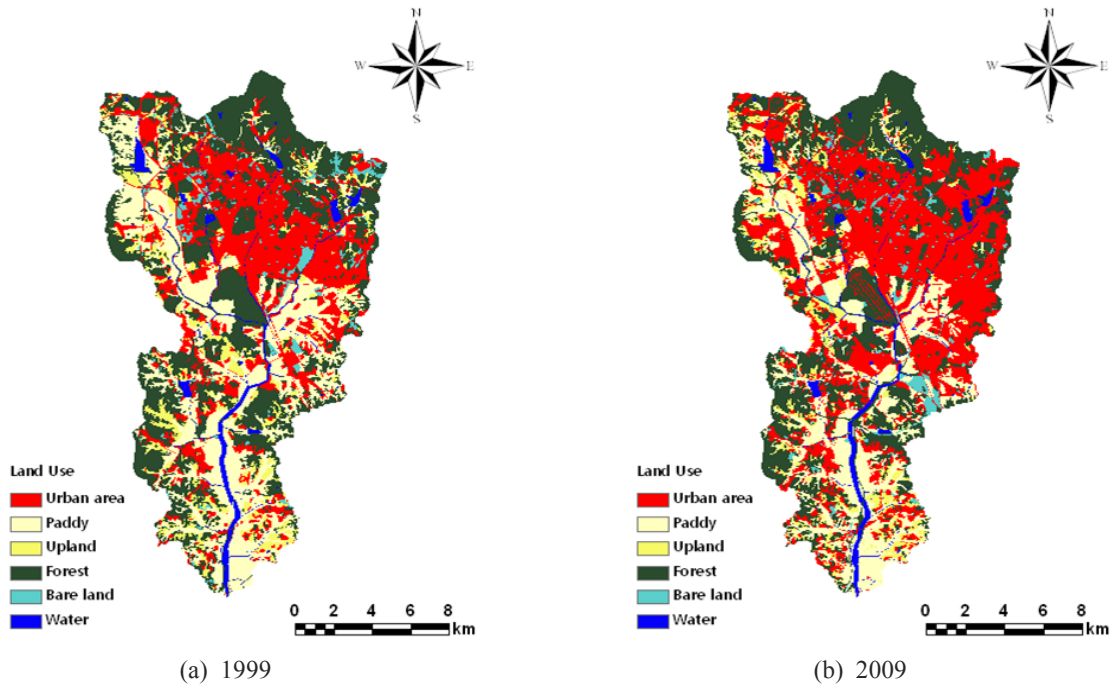


Figure 4. Land use maps of the study watershed

국가지리정보원의 1:25,000 수치지형도로로부터 등고선, 도로망, 주요 기관의 위치 등을 추출하였다. 등고선으로부터 30 m × 30 m 격자의 수치표고모형 (Digital Elevation Map, DEM)을 생성하였고, 도로망과 주요 기관의 위치는 구동요인의 구축에 활용하였다.

나. 토지이용변화의 구동요인

토지이용변화의 구동요인으로는 지형 특성, 토양 특성, 접근성, 인구밀도분포가 있다. 지형 특성은 수치표고모형으로부터 경사, 향을 분석하여 고도, 경사, 향 등의 구동요인을 구축하였다. 토양 특성은 개략토양도에 포함된 각종 토양 속성 정보들을 격자 자료로 변환하여 토양 배수 등급 지도, 토양 깊이 등급 지도, 토양 종류 지도

등을 구축하고 구동요인으로 활용하였다. 접근성은 토지이용도에서 시가화건조지역과 수역으로 분류된 지역에 대해 각각 유클리디안 거리 (Euclidean distance)를 산정하여 도시 접근성 및 수역 접근성 지도를 구축하고, 토지이용변화 모의를 위한 구동요인으로 활용하였다. 국가지리정보원의 수치지도로부터 대상 수역의 도로망을 추출하고 이를 통해 도로에서부터 유클리디안 거리를 산정하여 도로 접근성 지도를 구축하고 토지이용변화의 구동요인으로 적용하였다. 또한 대상 구역 내의 도청, 시청, 구청, 주민센터, 읍면사무소, 초·중·고등학교 위치를 추출하고 이로부터 유클리디안 거리를 산정하여 주요 기관에 대한 접근성 지도를 구축하고 토지이용변화의 구동요인으로 사용하였다. 인구밀도분포는 황구지천 구역 내의

Table 2. Descriptions for maps of driving factors

Data	Source	Driving factors
Land cover map (1:25,000)	Ministry of environment	Distance to cities
		Distance to water bodies
Reconnaissance soil map (1:50,000)	Rural development administration	Soil depth
		Soil drainage
		Soil type
Digital map (1:25,000)	National geographic information institute	Digital elevation model
		Slope
		Aspect
		Distance to roads
Population	Korean statistical information service	Distance to public institutions
		Population density

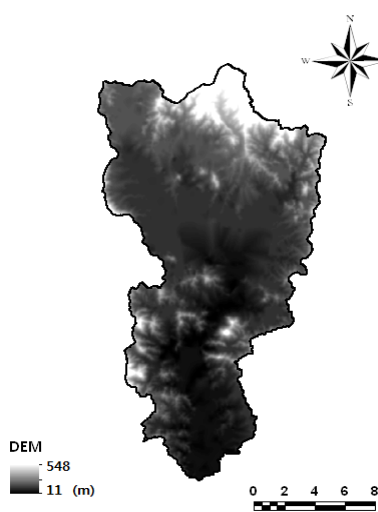


Figure 5 DEM of the study watershed

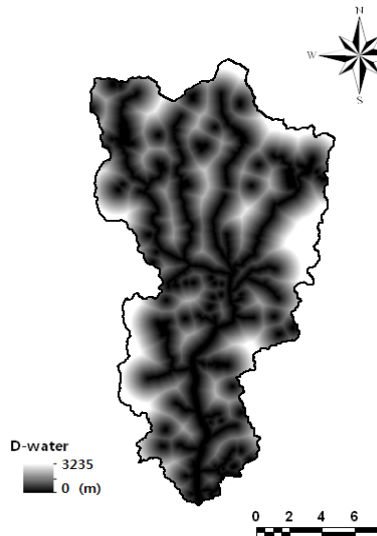


Figure 6 Distance to water bodies of the study watershed

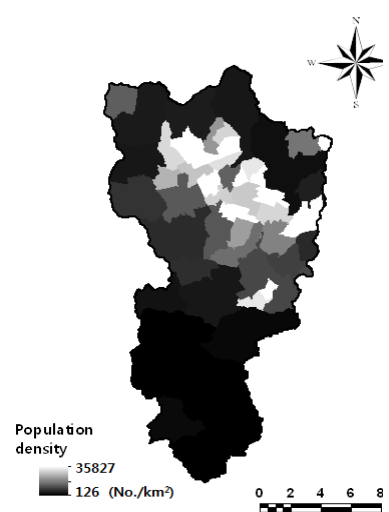


Figure 7 Population density of the study watershed

58개 동에 대해 인구밀도를 산정하여 인구밀도분포도를 구축하고 토지이용변화의 구동요인으로 적용하였다. Table 2와 Figure 5~Figure 7은 이상의 구동요인에 대한 기초 자료 및 지도를 나타내고 있다.

다. 토지이용변화의 제한조건

토지이용변화의 제한조건은 농업진흥 및 보호 구역도와 상수원 보호 구역도가 있다. 농업진흥 및 보호 구역도는 한국농어촌공사의 농업진흥 및 보호 구역도를 이용하여 토지이용변화의 제한 조건 지도를 구축하였다 (Figure 8). 농업진흥 및 보호 구역 중, 2009년 토지이용도와 비교하여 실제 농경지에 해당하는 구역을 추출하여 제한 조건으로 적용하였다. 상수원 보호 구역도는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 제공하는 상수

원 보호 구역도를 토지이용변화의 제한 조건으로 적용하였다 (Figure 9).

III. 미래 토지이용변화 모의

1. 모형의 구축

가. 위치 적합성

Table 3은 시가화건조지역, 논, 밭, 산림, 나지, 수역 등 6 개 토지이용과 고도, 경사, 향, 도로 접근성, 하천 접근성, 도시 접근성, 주요 기관 접근성, 토양 배수, 토양 깊이, 토양 종류, 인구 밀도 등 11 가지 구동 요인의 관

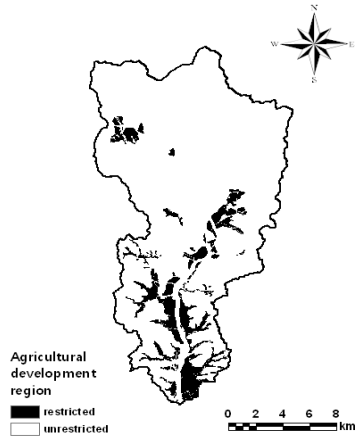


Figure 8. Agricultural development area

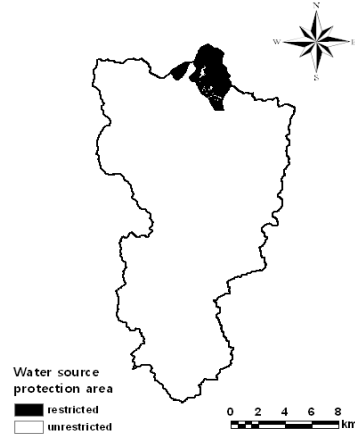


Figure 9. Water source protection area

Table 3. Results of logistic regression for driving factors

Driving factor	Coef.	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Bare land	Water
Elevation	β_1	-0.005983	-0.025005	-0.002604	0.017499	-0.010993	-0.005203
Slope	β_2	-0.069266	-0.108348	-0.113767	0.163671	-	-0.364494
Aspect	β_3	0.000699	0.000575	0.001168	-0.001724	0.001006	0.001443
Soil depth	β_4	0.202331	0.667016	-0.186570	-0.092749	-	0.204552
Soil drainage	β_5	-0.039195	-0.615425	0.147993	0.399362	0.144984	-0.320219
Soil type	β_6	-	0.022855	-0.139006	-0.145011	0.094741	0.751749
Distance to cities	β_7	-	0.004630	0.000127	0.003705	0.001276	0.003410
Distance to roads	β_8	-0.001064	0.000302	0.000124	-	-0.000254	0.000048
Distance to public institutions	β_9	-0.000079	-0.000105	-0.000035	-	-0.000582	-
Distance to water bodies	β_{10}	0.000814	0.000155	-	-0.000072	0.000463	-
Population density	β_{11}	0.000070	-0.000100	-0.000104	-0.000007	0.000019	-0.000051
Constant	β_0	-0.680693	-0.538799	-1.294022	-3.104091	-3.692866	-5.644485
ROC curve		0.770	0.872	0.664	0.845	0.668	0.858

계를 로지스틱 회귀분석으로 분석한 결과를 보여주고 있다. 밭과 나지의 ROC 곡선 면적은 0.7 보다 낮으나, 이외의 토지이용은 대부분 0.8 이상의 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 시가화건조지역은 구동 요인 중 토양 깊이와 가장 밀접한 관계를 가지며 산림은 토양 배수 및 경사와 가장 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다. 논과 밭의 경우 토양 깊이, 배수, 종류 등의 구동 요인에 대해 반대의 관계를 갖는 것으로 나타났다.

Table 4는 주변 격자와의 관계를 로지스틱 회귀분석으

로 분석한 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 ROC 곡선의 면적은 0.9 이상으로 높게 나타났다. 논외의 경우 주변 격자의 토지이용이 논인 경우를 제외하면 주변 격자와의 관계가 나타나지 않았으며, 시가화건조지역과 나지의 경우 주변에 다른 토지이용이 있는 경우 음의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

Figure 10은 위치 적합성 분석을 토대로 작성한 각 토지이용별 확률분포도를 나타내고 있다.

Table 4. Results of logistic regression for enrichment factors

Enrichment factors	Coef.	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Bare land
Urban area	β_1	3.076398	-	-	-	-
Paddy	β_2	-	2.246389	0.118610	-0.061419	-0.151775
Upland	β_3	0.015502	-	0.911051	-	-0.074573
Forest	β_4	-0.034340	-	0.090583	3.166067	-
Bare land	β_5	-0.050947	-	-	-	1.496321
Water	β_6	-0.014202	-	-	0.011455	-
Constant	β_0	-5.000088	-5.993738	-6.033996	-5.160029	-6.478674
ROC curve		0.990	0.995	0.992	0.990	0.996

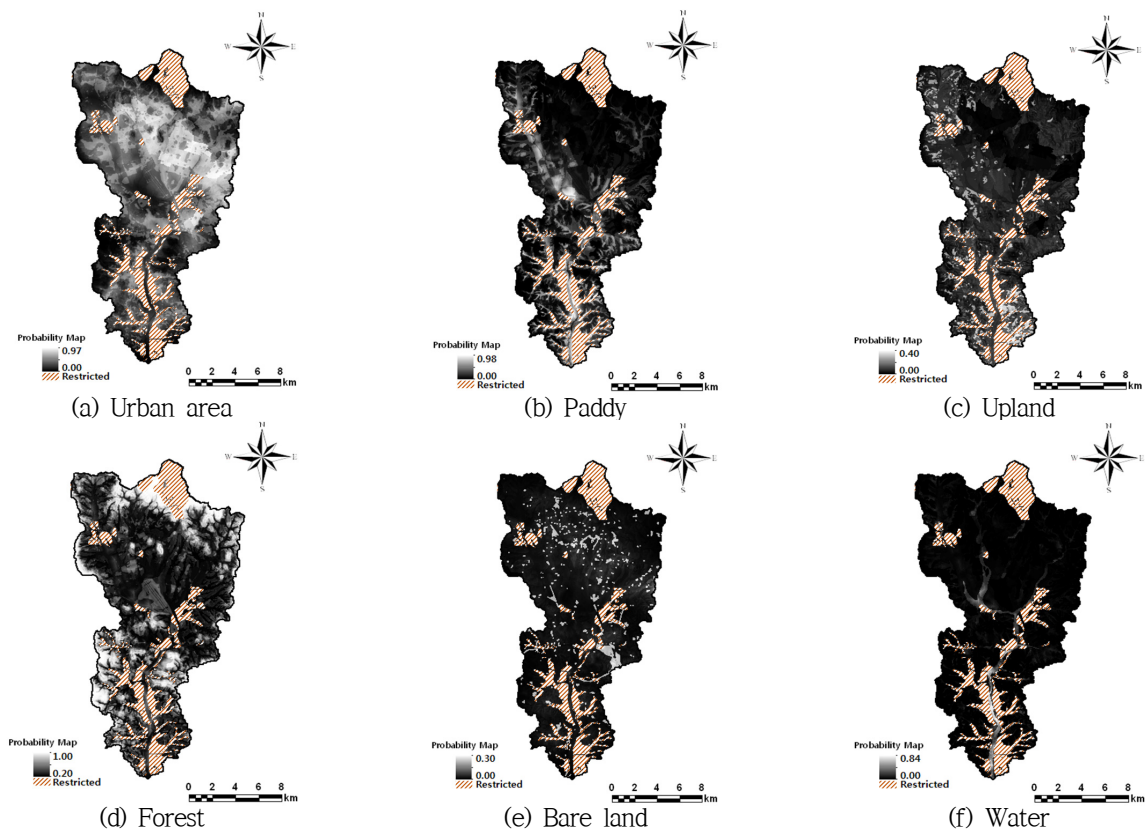


Figure 10. Probability maps based on location suitability

나. 토지이용변화 요구량

대상 유역의 면적은 127°경선을 기준으로 0.44 (왼쪽), 0.56 (오른쪽)의 비율로 구분되며, 이를 각 격자의 시나리오 값에 적용하여 유역 단위의 토지이용변화 시나리오로 상세화하였다.

토지이용변화 시나리오를 보정하기 위해 황구지천 유역의 1995~2009년 지적공부등록 지목별 면적과 RCP4.5와 8.5 토지이용변화 시나리오를 비교하고 Table 5와 같이 변화 항목별 가중치를 적용하였다. 시나리오 상의 시가지, 농경지, 1차 토지 및 목초지는 토지이용도의 시가화건조지역, 논과 밭, 산림으로 분류된다. 2차 토지의 면적은 1995~2009년 지적공부등록 지목별 면적에 따라 시가화건조지역과 산림에 각각 9%, 90%로 분배하였고, 나머지 1%의 면적은 토지이용도의 나지로 분류하였다.

시나리오의 보정 결과, R²는 0.816~0.856, nRMSE는 6.15~9.27%의 범위로 시나리오의 보정 결과가 실제 면적을 잘 반영하는 것으로 분석되었다 (Table 6).

Table 7은 2010년을 기준으로 미래의 토지이용변화율을 나타내고 있다. RCP4.5 시나리오의 경우 2100년에 시가화건조지역의 면적이 12% 가량 증가하고 산림이 16% 가량 감소하는 것으로 나타났으며, RCP8.5 시나리오의 경우 시가화건조지역의 면적이 16% 가량 증가하고 산림이 18% 가량 감소하는 것으로 나타났다.

다른 지역과의 비교 검토를 위해 Oh et al. (2011)이 행정구역을 대상으로 CLUE 모형을 이용하여 미래 토지이용변화를 모의한 결과를 Table 8에 정리하였다. 이천시에 대해 분석한 결과를 살펴보면, 기준년도인 2000년도 비해 SRES B1 시나리오 (RCP4.5와 대응)의 경우 2100년에 시가화건조지역의 면적이 1% 가량 증가하고 농경지가 28% 가량 감소하고 산림이 21% 가량 증가하는 것으로 나타났으며, SRES A2 시나리오 (RCP8.5와 대응)의 경우 시가화건조지역의 면적이 5% 가량 증가하고 농경지가 39% 가량 감소하고 산림이 29% 가량 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구의 대상 유역인 황구지천의 결과와 비교했을 때 미래의 농경지와 산림의 토지이용변

Table 5. Weighting factors for adjusting the land use scenario

Land use (t)		Land use (t+1)	Year (t+1)			
		Urban land	Crop land	Primary land	Pasture	Secondary land
Year (t)	Urban land		0.01	0.01	-	1
	Crop land	5		0.01	-	0.01
	Primary land	20	0.01		-	1
	Pasture	-	-	-		4
	Secondary land	6	0.01	0.01	-	

Table 6. Statistics (R², nRMSE) of land use area between the modified scenario and land registration

Class	Urban area	Crop land	Forest
R ²	0.831	0.856	0.816
nRMSE (%)	7.99	6.15	9.27

Table 7. Future land use changes relative to baseline (2010)

(unit: km²)

Scenario	Year	Urban area	Crop land	Forest	Bare land
RCP4.5	2040	+3.73 (+3.96%)	+0.07 (+0.10%)	-4.22 (-5.24%)	+0.41 (+5.47%)
	2070	+7.34 (+7.79%)	+0.09 (+0.13%)	-8.25 (-10.26%)	+0.82 (+10.76%)
	2100	+11.18 (+11.87%)	+0.06 (+0.09%)	-12.49 (-15.53%)	+1.24 (+16.38%)
RCP8.5	2040	+8.90 (+9.45%)	-1.20 (-1.71%)	-8.06 (-10.03%)	+0.36 (+4.74%)
	2070	+11.94 (+12.67%)	-1.14 (-1.62%)	-11.50 (-14.30%)	+0.70 (+9.20%)
	2100	+14.71 (+15.61%)	-1.15 (-1.64%)	-14.55 (-18.09%)	+0.98 (+12.94%)

화율이 다르게 나타나는 이유를 살펴보면, 이천시외의 기준년도인 2000년의 토지이용 비율 (시가화건조지역 10.1%, 논 30.2%, 밭 22.5%, 산림 32.8%)이 황구지천 유역의 기준년도인 2009년의 토지이용 비율 (시가화건조지역 36%, 논 19%, 밭 7%, 산림 31%)과 차이에서 기인하는 것으로 사료된다.

다. 변화 특성

1999년, 2009년 토지이용도를 통해 Table 9와 같이 변환 행렬을 구성하였다.

황구지천 유역에 적용한 농업진흥 및 보호구역과 상수원보호구역 등의 제한 조건은 Figure 8~Figure 9에 제시한 바와 같다.

2. 모형의 평가

CLUE 모형을 평가하기 위해, 1999년 토지이용도로부터 2009년의 토지이용변화를 모의하고 2009년 토지이용도와 비교하였다.

Kappa 값의 경우 0.61로 0.7보다 낮게 나타나 모의 결과가 다소 미흡한 것으로 분석되었다. Figure 11은 다중 해상도 절차에 의해 윈도우 크기에 따른 일치 정도를 산정한 결과를 나타내고 있다. 윈도우 크기가 1일 때에는 일치 정도가 0.7 이하에 머물렀으나, 윈도우 크기가 늘어

날수록 일치 정도가 점차 증가하여 윈도우 크기가 50 개 일 때에는 일치 정도가 0.86으로 나타났다. F_w 를 윈도우 크기에 대해 가중 평균한 결과 F_t 의 값이 74.03%로 나타났다.

각 토지이용별 전이 특성 값을 0과 1사이에서 조절하면서 가장 최적의 값을 도출한 결과, 시가화건조지역은 0.4, 논은 0.2, 밭은 0.0, 산림은 0.2, 나지는 0.0, 수역은 1.0의 값으로 나타났다.

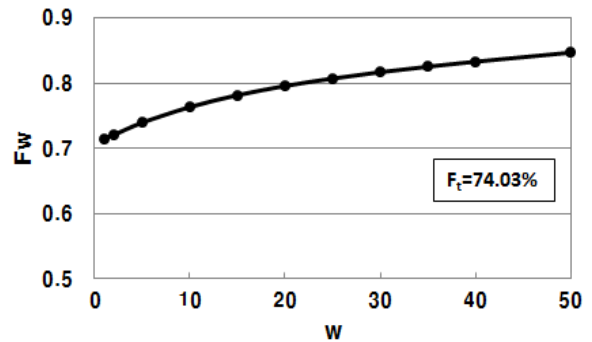


Figure 11. Result of multiple resolution procedure

3. 미래 토지이용변화 모의 결과

2010년으로부터 2040, 2070, 2100년의 토지이용변화를

Table 8. Land-cover change according to administration boundary (Oh et al., 2011) (unit: km²)

Region	Scenario	Year	Urban area	Crop land	Forest
Icheon	Baseline	2000	46.69	242.4	150.99
	SRES B1 (correspond to RCP4.5)	2100	+0.33 (+0.70%)	-34.24 (-28.40%)	+31.19 (+20.70%)
	SRES A2 (correspond to RCP8.5)	2100	+2.54 (+5.40%)	-47.48 (-38.80%)	+43.57 (+28.90%)

Table 9. Land use conversion matrix from 2011 to 2100 (conversion from left to top)

Land use (2010) \ Land use (2011)	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Bare land	Water
Urban area	1	0	1	0	1	0
Paddy	1	1	1	1	1	0
Upland	1	1	1	0	1	0
Forest	1	1	1	1	1	0
Bare land	1	0	0	0	1	0
Water	0	0	0	0	0	1

모의한 결과는 Figure 12~Figure 13과 같다. Table 7의 토지이용변화 요구량에서 설정하였듯이, RCP4.5 시나리오의 경우 2100년에 시가화건조지역의 면적이 12% 가량 증가하고 산림이 16% 가량 감소하는 것으로 나타났으며, RCP8.5 시나리오의 경우 시가화건조지역의 면적이 16% 가량 증가하고 산림이 18% 가량 감소하는 것으로 나타났다. Figure 12~Figure 13의 시가화건조지역 (빨간

색)과 산림 (초록색)에서 대부분의 토지이용변화가 발생하였으며 이는 대부분 소유역 1~5에서 해당한다.

Table 10은 토지이용변화에 따른 CN (III)의 변화를 나타내고 있다. 소유역 3, 5에서 2100년까지 CN (III) 값이 1 증가하고, 소유역 7의 경우 감소하였다가 다시 증가하며, 그 외의 소유역에서는 변화가 일어나지 않는 것으로 나타났다. CN (III)의 증가율을 살펴보면 -1.14~

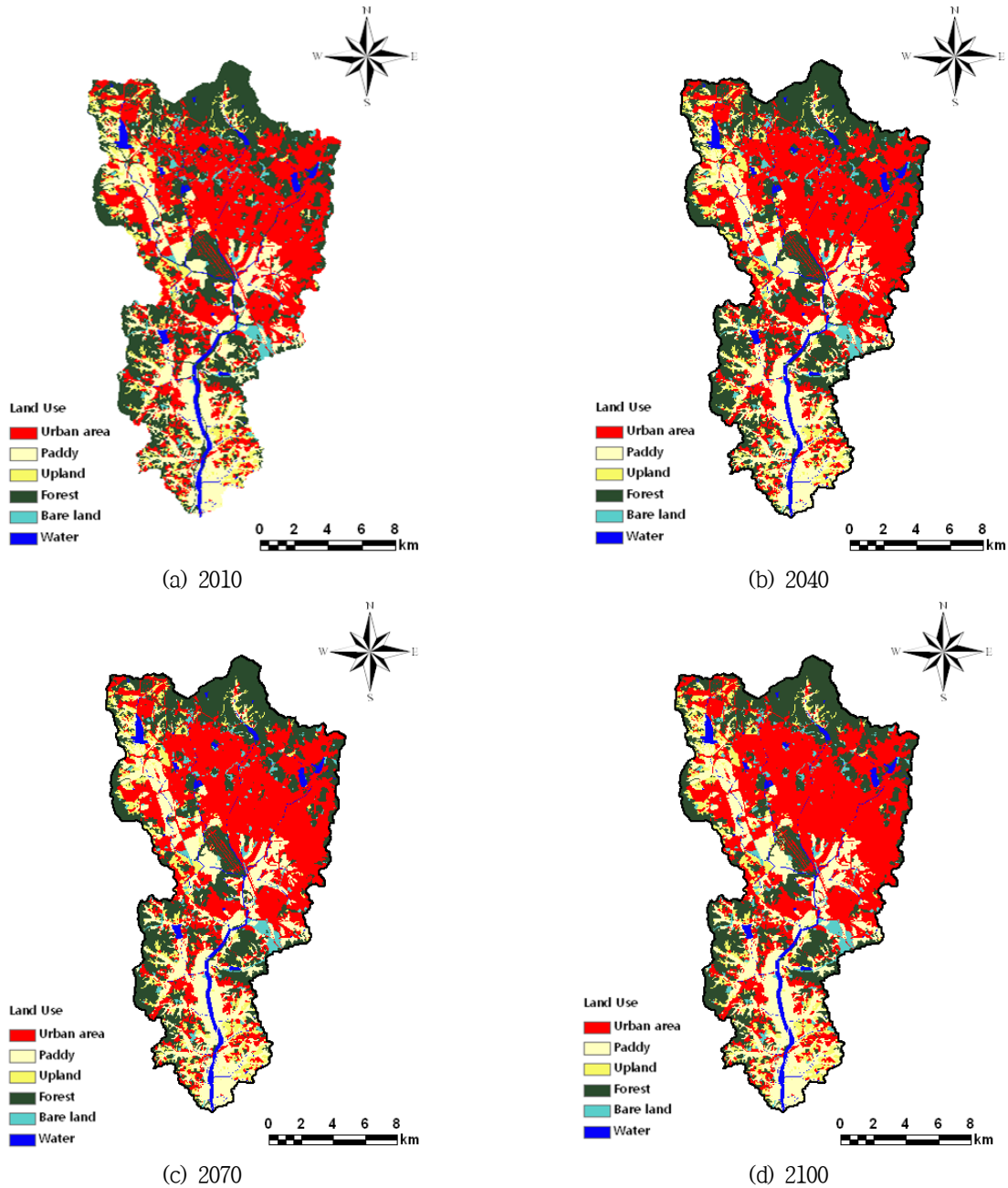


Figure 12. Predicted land use maps under the RCP4.5 scenario

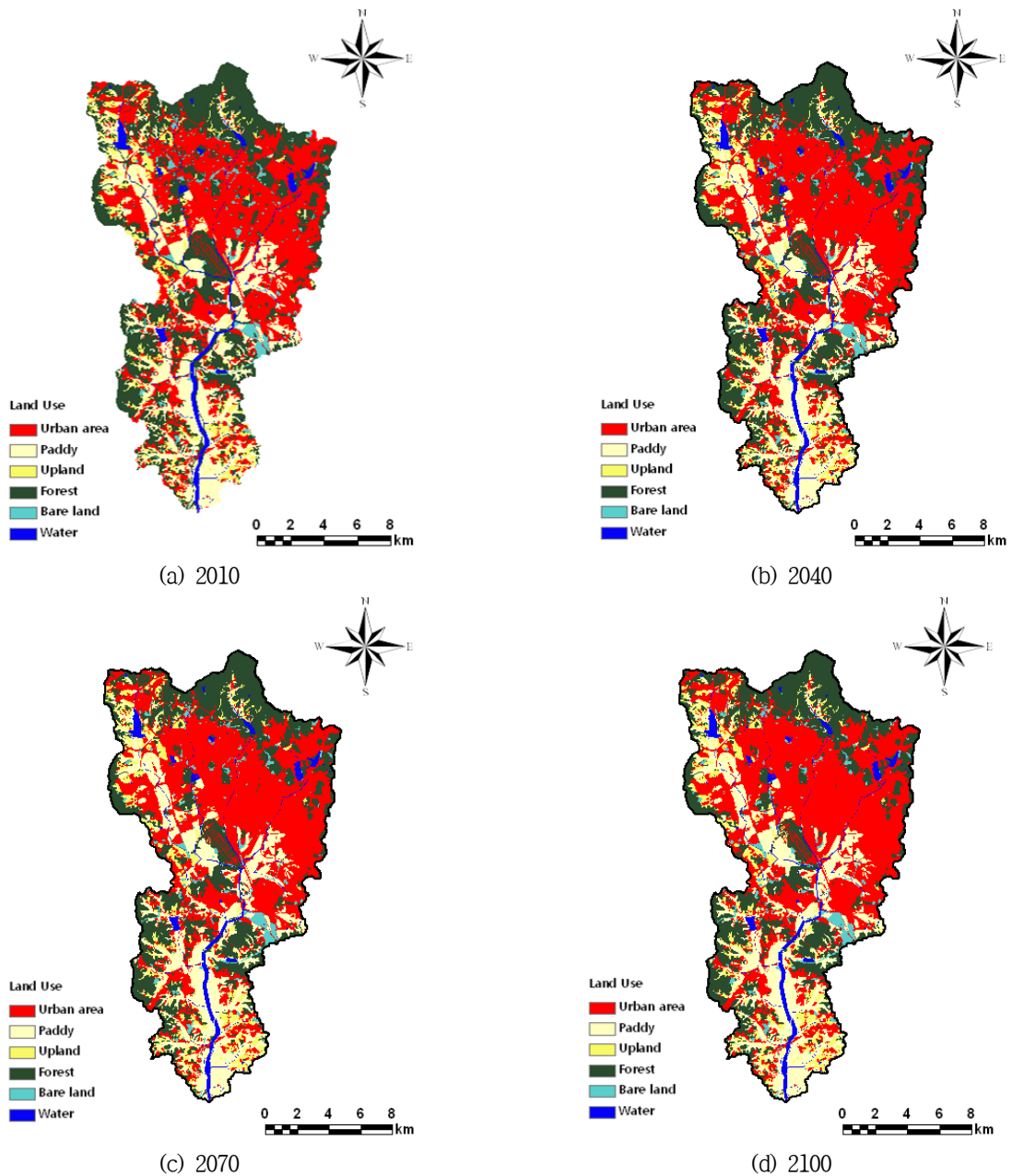


Figure 13. Predicted land use maps under the RCP8.5 scenario

1.12%로 미미한 변화를 나타내고 있다. RCP4.5와 8.5 시나리오 모두 2100년까지 시가화건조지역은 12~16% 증가하고 산림은 16~18% 감소하는 결과가 산정되었다. 이로 인해 소유역별 평균 CN (III)를 산정한 결과 CN (III)의 변화량이 매우 적게 나타난 것으로 사료된다.

Table 11은 토지이용변화에 따른 불투수율의 변화를 나타내고 있다. 시가화건조지역의 증가율이 비교적 높게 나타났던 RCP8.5 시나리오에서 불투수율도 높게 나타났

다. 2010년과 대비하여 불투수율의 변화를 살펴보면 소유역 2에서 가장 큰 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 소유역 1~5에서 미래기간으로 갈수록 불투수율이 증가하는 경향이 나타났으며, 소유역 6~8에서는 불투수율이 감소하거나 변화가 미미하게 나타났다. 불투수율의 증가율 범위를 살펴보면 -1.92~24.09%로 이는 소유역과 미래 기간에 따른 시가화건조지역과 산림 면적의 변화에 상응하여 산정된 것으로 사료된다.

Table 10. Curve number (III) from 2010 to 2100 under the RCP4.5 and 8.5 scenarios

Subbasins	2010	2040		2070		2100	
		RCP4.5 (Δ)	RCP8.5 (Δ)	RCP4.5 (Δ)	RCP8.5 (Δ)	RCP4.5 (Δ)	RCP8.5 (Δ)
1	91	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)
2	90	90 (0.00)	90 (0.00)	90 (0.00)	90 (0.00)	90 (0.00)	91 (1.11)
3	89	90 (1.12)	90 (1.12)	90 (1.12)	90 (1.12)	90 (1.12)	90 (1.12)
4	92	92 (0.00)	92 (0.00)	92 (0.00)	92 (0.00)	92 (0.00)	92 (0.00)
5	90	91 (1.11)	91 (1.11)	91 (1.11)	91 (1.11)	91 (1.11)	91 (1.11)
6	91	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)
7	88	87 (-1.14)	88 (0.00)	87 (-1.14)	88 (0.00)	88 (0.00)	88 (0.00)
8	91	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)	91 (0.00)

Table 11. Impervious area from 2010 to 2100 under the RCP4.5 and 8.5 scenarios

(unit: %)

Subbasins	2010	2040		2070		2100	
		RCP4.5 (Δ)	RCP8.5 (Δ)	RCP4.5 (Δ)	RCP8.5 (Δ)	RCP4.5 (Δ)	RCP8.5 (Δ)
1	25.33	26.20 (3.43)	28.19 (11.29)	27.57 (8.84)	29.93 (18.16)	29.59 (16.82)	31.17 (23.06)
2	33.37	36.97 (10.79)	39.09 (17.14)	38.73 (16.06)	40.50 (21.37)	40.28 (20.71)	41.41 (24.09)
3	34.14	35.46 (3.87)	37.41 (9.58)	37.02 (8.44)	38.74 (13.47)	38.62 (13.12)	39.98 (17.11)
4	44.65	46.54 (4.23)	48.00 (7.50)	47.76 (6.97)	48.65 (8.96)	48.63 (8.91)	49.31 (10.44)
5	19.74	19.80 (0.30)	20.23 (2.48)	20.03 (1.47)	20.58 (4.26)	20.72 (4.96)	21.16 (7.19)
6	31.59	32.29 (2.22)	33.57 (6.27)	33.25 (5.25)	34.21 (8.29)	34.16 (8.14)	34.67 (9.75)
7	15.08	14.79 (-1.92)	15.37 (1.92)	14.87 (-1.39)	15.61 (3.51)	15.13 (0.33)	15.78 (4.64)
8	20.15	19.95 (-0.99)	20.51 (1.79)	20.06 (-0.45)	20.76 (3.03)	20.41 (1.29)	21.06 (4.52)

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 황구지천 지역의 미래 토지이용변화를 분석하기 위하여 RCP4.5와 8.5 기후변화 시나리오를 바탕으로 토지이용변화를 예측하였다. 토지이용변화의 모의에는 토지이용과 구동 요인 및 이웃 격자와의 관계를 바탕으로 피드백 과정을 통해 토지이용변화를 모의하는 Dyna-CLUE 모형을 적용하였다. 모형의 보정은 1995~2009년의 지적공부등록 지목별 면적과 과거 토지이용변화 모의 결과를 비교하여 수행하였으며, 미래 토지이용변화 결과를 황구지천 지역에 적용하여 토지이용변화에 따른 CN과 불투수율의 변화를 분석하였다.

RCP4.5와 8.5 토지이용변화 시나리오를 기반으로 2040년, 2070년, 2100년의 토지이용변화 요구량을 결정하고 변환 행렬을 구성하였다. 토지이용과 구동요인 및 주변 격자와의 관계를 이분형 로지스틱 모형으로 분석하였고, 토지이용변화의 제한 구역을 설정하였다. 미래 토지이용

변화를 모의한 결과, 2100년까지 시가화건조지역은 12~16% 증가하고 산림은 16~18% 감소하였으며 RCP8.5 시나리오에서 변화 폭이 비교적 크게 나타났다. 토지이용변화에 따른 소유역별 CN (III)는 2100년까지 0~1 만큼 증가하는 것에 그쳤으며, 2010년의 CN (III)과 비교하였을 때 최대 1.12%의 증가율을 보인다. 소유역별 불투수율은 0~8% 가량 증가하는 것으로 나타났으며, 2010년의 불투수율과 비교하였을 때 최대 24.09%의 증가율을 보인다.

미래 토지이용변화를 분석한 결과 시가화건조지역의 증가와 산림의 감소가 같은 기간에 발생함에 따라 소유역별 평균 CN (III)의 변화량이 미미하게 산정되었다. 대부분의 수문 모형에서 CN과 불투수율은 토지이용변화를 반영하는 매개변수로 사용하고 있으며, CN은 민감도가 높은 매개변수로 수문 모형의 결과에 상당한 영향을 미친다. 본 연구에서 적용한 농촌 소유역을 대상유역으로 한정한다면 미래 토지이용변화를 고려하지 않고 수문 모

형을 모의하여도 수문 순환 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 RCP 시나리오 기반 CLUE 모형을 적용하여 소유역의 미래 토지이용변화를 예측하는 방법론을 정립하였으며, 본 연구를 통해 도출된 결과는 미래의 극한 홍수에 대비함에 있어 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A2009313).

References

1. Clarke, K.C., Hoppen, S., and Gaydos, L., 1997, A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area, *Environment and Planning B* 24: 247-261.
2. Costanza, R., 1989, Model goodness of fit: a multiple resolution procedure, *Ecological Modelling* 47: 199-215.
3. Cuo, L., Beyene, T.K., Voisin, N., Su, F., Lettenmaier, D.P., Alberti, M., and Richey, J.E., 2011, Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, *Washington, Hydrological Processes* 25: 1729-1753.
4. Erdogan, N., Nurlu, E., and Erdem, U., 2011, Modelling land use changes in Karaburun by using CLUE-s, *ITU AIZ* 8(2): 91-102.
5. Hagen, A., 2002, Multi-method assessment of map similarity, 5th AGILE Conference on Geographic Information Science.
6. Hurtt, G.C., Chini, L.P., Frothing, S., Betts, R.A., Feddema, J., Fischer, G., Fisk, J.P., Hibbard, K., Houghton, R.A., Janetos, A., Jones, C.D., Kindermann, G., Kinoshita, T., Goldewijk, K.K., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S. Stehfest, E., Thomson, A., Thornton, P., van Vuuren, D.P., and Wang, Y.P., 2011, Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands, *Climate Change* 109: 117-161.
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000, IPCC special report emissions scenarios.
8. Kim, W.G. and Ryu, T.S., 2011, Strategy of flood control capacity enhancement on existing multipurpose dams to the effect of climate change, *Journal of the Korean Professional Engineers Association* 44(2): 23-28.
9. Mitsova, D., Shuster, W., and Wang, X., 2011, A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation, *Landscape and Urban Planning* 99: 141-153.
10. Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J.P., and Zurek, M., 2008, Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies, IPCC expert meeting report.
11. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2011, Climate change scenario report for IPCC AR5, 17-46.
12. Oh, Y.-G., 2011, An assessment of green house gas emissions in cropland and forest considering land-use change affected by climate change, Ph.D. diss., Seoul National University.
13. Oh, Y.-G., Yoo, S.-H., Lee, S.-H., and Choi, J.-Y., 2011, Prediction of paddy field change based on climate change scenarios using the CLUE model, *Paddy Water Environ* 9:309-323.
14. Pontius, R.G. Jr. and Schneider, L.C., 2001, Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85: 239-248.
15. Veldkamp, A. and Fresco, L.O., 1996, CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects, *Ecological Modelling* 85: 253-270.
16. Verburg, P.H. and Overmars, K.P., 2009, Combining top-down and bottom-up dynamics in land use

modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model, *Landscape Ecology* 24: 1167-1181.

17. Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., and Mastura, S.S.A., 2002, Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model, *Environmental Management* 30(3): 391-405.
18. Wolfram, S., 1984, Cellular automata as models of complexity, *Nature*, 311(5985): 419-424.
19. Yim, C.-H. and Choi, D.-S., 2002, Predicting micro

land use dynamics: a cellular automata modelling approach, *Journal of Korea Planners Association* 37(4): 229-239.

-
- Received 28 January 2015
 - First Revised 13 February 2015
 - Second Revised 21 May 2015
 - Finally Revised 10 June 2015
 - Accepted 10 June 2015