

## 오염총량관리제의 시공간적 미래 토지이용 변화분석을 위한 CLUE-S 모델의 적용 및 평가

류지철 · 안기홍 · 한미덕 · 황하선 · 최재완\* · 김용석 · 임경재\*\*†

국립환경과학원 유역총량연구과

\*강원대학교 지역건설공학과

## Evaluation and Application of CLUE-S Model for Spatio-Temporal Analysis of Future Land use Change in Total Water Pollution Load Management System

Jichul Ryu · Ki Hong Ahn · Mideok Han · Hasun Hwang · Jaewan Choi\* · Yong Seok Kim · Kyoung Jae Lim\*\*†

Watershed and Total Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research

\*Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(Received 31 May 2014, Revised 18 July 2014, Accepted 22 July 2014)

### Abstract

The purpose of this study is to predict the spatio-temporal changes in land uses and to evaluate land-based pollutant loads in the future under Total Water Pollution Load Management System using CLUE-S model. For these ends, sensitive parameters of conversion elasticities in CLUE-S model were calibrated and these calibrated parameters of conversion elasticities, level II land cover map of year 2009, and 7 driving factors of land use changes were used in predicting future land uses in 2020 with two scenarios(Scenario 1: non area restriction, Scenario 2: area restriction). This projected land use map of 2020 was used to estimate land-based pollutant loads. It was expected that urban areas will increase in 2020 from both scenarios 1 and 2. In Scenario 1, urban areas are expected to increase within greenbelt areas and deforest would be expected. Under Scenario 2, these phenomena were not expected. Also the results of estimation of BOD and TP pollutant loads, the BOD difference between scenarios 1 and 2 was 719 kg/day in urban areas and TP difference was 17.60 kg/day in urban areas. As shown in this study, it was found that the CLUE-S model can be useful in future pollutant load estimations because of its capability of projecting future land uses considering various socio-economic driving factors and area-restriction factors, compared with conventionally used land use prediction model.

**Key words** : Area restriction, Driving factor, Land use change, Land pollutant load

### 1. Introduction

현재 우리나라에서는 유역단위로 하천의 수질오염을 방지하고 개선시키기 위해 오염총량관리제를 시행하고 있다. 이에 따라 최근 2010년 1단계 오염총량관리 계획이 종료되고 2단계 계획을 수립하여 현재까지 제도가 시행 중에 있으며, 1단계 평가 결과, 3대강(낙동강, 금강, 영산강)수계 모두 제도가 시행되기 전 대비 약 50~80% 범위의 수준으로 하천 수질이 개선되는 성과를 나타냈다(Lee, 2013).

이렇게 우리나라 하천 수질환경 개선에 많은 도움을 주고 있는 오염총량관리제는 계획을 수립할 시 장래 목표수질을 설정하고 목표수질을 달성 및 유지하기 위한 장래 할당부하량을 산정하여, 해당 총량관리 단위유역 내에서 배출되는 오염물질의 총량이 목표수질을 달성 할 수 있도록 규제 또는 관리 하는 제도이다(Park, 2011).

특히 장래에 대한 할당부하량을 예측하기 위해 오염원을 총 6가지(생활계, 축산계, 토지계, 산업계, 매립계, 양식계)로 분류하여 오염부하량을 산정하며 이 중 토지계 장래 오염부하량은 목표년도의 미래 토지면적 변화를 예측하여 오염부하량 산정에 반영한다.

오염총량관리제 계획 수립 시 미래 토지이용 변화는 계획수립년도 기준 과거 5년 이상의 연속지적도에서 측정된 28개 토지 지목별 면적 자료를 이용하여 5가지 지목으로 재분류 한 후 지목별 증감량을 산정하여 미래 토지이용 변화를 공간적 변화 예측이 아닌 수치적으로만 예측을 한다.

하지만 토지의 변화는 다양한 사회 경제적 요소, 인구분포, 인구밀도, 토지이용정책 등 여러 요인에 영향을 받을 수 있기 때문에(Oh et al., 2011) 여러 복합적인 영향을 고려하지 않고 단순한 모델이나 이론을 이용하여 미래 토지이용 변화를 예측하기 어렵고(Lee et al., 2011), 이에 따라 과거 면적 증감 경향으로만 미래 토지이용 예측을 할 경우 불확실성이 높아질 수 있다.

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

또한 차기 오염총량관리제 수립 시 유역모델을 고려할 수 있도록 명시되어 있기 때문에(NIER, 2012) 향후 오염총량관리제 계획 수립 시 미래 토지 지목 변화 자료에 대한 공간적 자료도 필요할 것으로 예상된다.

이와 더불어 수치적으로만 존재하는 미래 토지이용에 대해 시공간적 자료로 구축하여 오염총량관리제 계획에 이용한다면 토지계 오염부하량의 대부분을 차지하는 비점오염원에 대한 공간적 해석이 용이 할 수 있으며 오염원이 심각하게 발생될 수 있는 우심지역 선정에도 유용할 수 있다.

하지만 아직까지 오염총량관리제의 미래 토지이용 변화에 대해 인구 밀도, 인구 분포 등 다양한 토지이용 변화요소를 고려한 시공간적 토지 지목 변화 예측 및 이에 따른 영향을 평가한 연구가 많이 진행되어 있지 않았다.

현재 미래 토지 지목 변화에 대해 공간적으로 예측할 수 있는 기법으로 Cellular Automata(CA) 기법, Markov chain 기법, CA와 Markov Chain이 결합된 기법, CLUE-S (Conversion of Land Use Change and its Effects at Small regional extent)모델을 이용한 기법 등이 있다. 이 중 Markov 기법은 GIS 데이터를 연산하여 현재 토지이용의 변화된 경향을 잘 예측하는 장점이 있지만 시간이 변화되더라도 전이 확률이 항상 일정하고 모든 위치에 동일하게 적용되는 단점이 있으며(Kim and Lee, 2007), CA 기법 또한 시계열 자료의 변화양상을 공통적으로 적용시켜 인접격자의 상태를 지속적으로 변화시키기 때문에 다양한 토지이용정책이나 사회 경제적 요인을 반영하기에는 한계가 있다(Oh et al., 2011)

하지만 이러한 기법 중 CLUE-S 모델을 이용한 기법은 CA 및 Markov 기법과 달리 환경변화, 토지이용정책 및 사회 경제적 변화를 반영하여 토지이용변화를 예측 할 수 있으며(Verburg et al., 2002), 전 세계적으로 다양한 토지이용 예측 분야에 활용되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 오염총량관리제에서 효과적인 미래 토지이용별 시공간적 분포 자료를 적용하기 위해 진위A 단위유역에 CLUE-S 모델을 적용하여 2020년 미래 토지이용 변화를 시공간적으로 예측하고 이에 따른 2020년의 토지계 발생부하량 변화를 분석하는 것이다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. 연구대상지역

연구대상지역은 가장 최근 시행계획이 수립되었으며 상류영향을 받지 않는 진위A 단위유역을 선정하였다(Fig. 1).

진위A 단위유역은 도시와 농촌이 혼재(시가화지역 23.9%, 농업지역 33.8%)되어 있는 지역으로서, 도시지역의 밀집현상 및 농촌지역의 경작 형태 변화가 동시에 존재하는 단위유역이며(Ryu, Kim et al., 2014) 그린벨트와 같은 특별 토지이용정책이 고려된 유역이고 가장 최근 오염총량관리제 시행계획이 승인된 단위유역이기 때문에 본 연구의 연구대상지역으로 선정하였다.

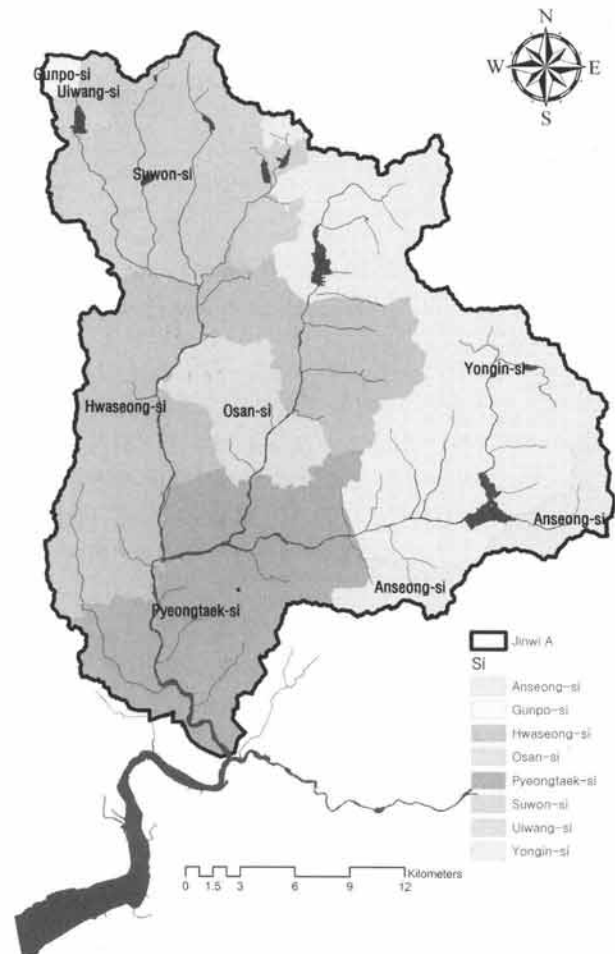


Fig. 1. Study area in JINWI A (Ryu, Kim et al., 2014).

### 2.2. CLUE-S 모델의 개요

토지이용 변화의 공간적 모델은 가까운 미래의 토지이용 변화의 변화가능성을 분석하는데 있어 매우 중요하며 토지이용 모델의 결과들은 정책과 사회경제적 및 자연 내 토지이용 변화의 영향을 산정 하는데 있어 중요하다.

CLUE(Conversion of Land Use and its Effects modeling framework; Veldkamp and Fresco, 1996; Verburg et al., 1999) 모델은 토지이용 간 동적 모델링과 토지이용과 토지이용의 변화요소(Driving Factor) 간 경험적 정량화를 이용한 토지이용 변화를 모의하기 위해 개발되었으며 연구지역의 스케일을 대륙 또는 국가 정도 수준을 고려할 수 있게 설정되었고 미중부, 에콰도르, 중국 및 인도네시아의 자바 등에 적용되어 토지이용변화 분석을 모의하였다.

하지만 기존의 CLUE 모델은 지역단위의 작은 스케일에 바로 적용을 못하는 제한점이 있기 때문에 이를 해결하기 위해 네덜란드 Wageningen 대학에서 기존의 CLUE 모델을 개선한 CLUE-S(Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent)모델을 개발 하였다(Verburg et al., 2002).

CLUE-S 모델은 비 공간적 모듈과 공간적 모듈로 구성되어 있으며(Fig. 2) 비 공간적 모듈은 총괄적으로 모든 토지이용 유형에 대한 지역의 변화를 계산하고 공간적 모듈에서 이를 레스터자료 기반 시스템을 사용하여 연구지역 내

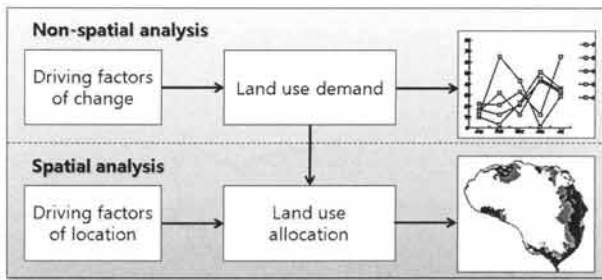


Fig. 2. Overview of the modeling procedure (Verburg et al., 2002).

다른 위치로 토지이용유형을 할당하는 구조를 지닌다. 하지만 CLUE-S 모델은 비공간적 모듈을 제외한 공간적 모듈만 사용자 인터페이스(User-Interface)로 제공하기 때문에 비공간적 모듈에 필요한 자료와 결과는 사용자가 직접 엑셀이나 SPSS와 같은 통계 프로그램을 이용하여 작성하여야 한다.

2.3. CLUE-S 모델의 입력자료 구축

CLUE-S 모델의 구동을 위해 필요한 자료는 총 5가지로 구분되며 토지이용 자료(Land use map), 특별토지이용정책 자료(Spatial policies and restriction), 토지이용요구 자료(Land use requirements), 지역 특성 자료(Location characteristics), 토지이용 변화 매개변수 자료(Land use type specific conversion settings)로 구분된다(Fig. 2).

2.3.1. 토지이용지도 및 토지이용요구 자료 구축

CLUE-S 모델에 적용하기 위한 토지이용지도 자료는 환경부에서 자료를 제공하고 있는 2001년과 2009년 진위A 단위구역 중분류 토지피복 자료를 이용하였고, 오염총량관

Table 1. Classifications of Land use category

Total water pollution load management system	CLUE-S	Level II
Urban area	Urban area	Residential area
		Manufacturing area
		Commercial area
		Recreational facility area
		Traffic area
		Regional public facility area
Paddy	Paddy	Paddy
Upland	Upland	Upland
		Plastic house
		Orchard
		Other cultivation area
Forest	Forest	Coniferous
		Broad-leaved
		Mixed stand forest
Others	Pasture	Natural pasture
		Golf
		Artificial pasture
	Wetland	Inland wetland
		Coastal wetland
	Bare land	Mining area
		Bare land
	Water	Inland Water
		Sea Water

리제 및 CLUE-S모델의 입력자료로 사용할 수 있도록 23개 중분류 토지피복 분류를 8개로 재분류 하여 모델의 입력자료로 사용하였다(Table 1).

이와 같은 이유는 23개의 토지피복 종류로 구성되어 있

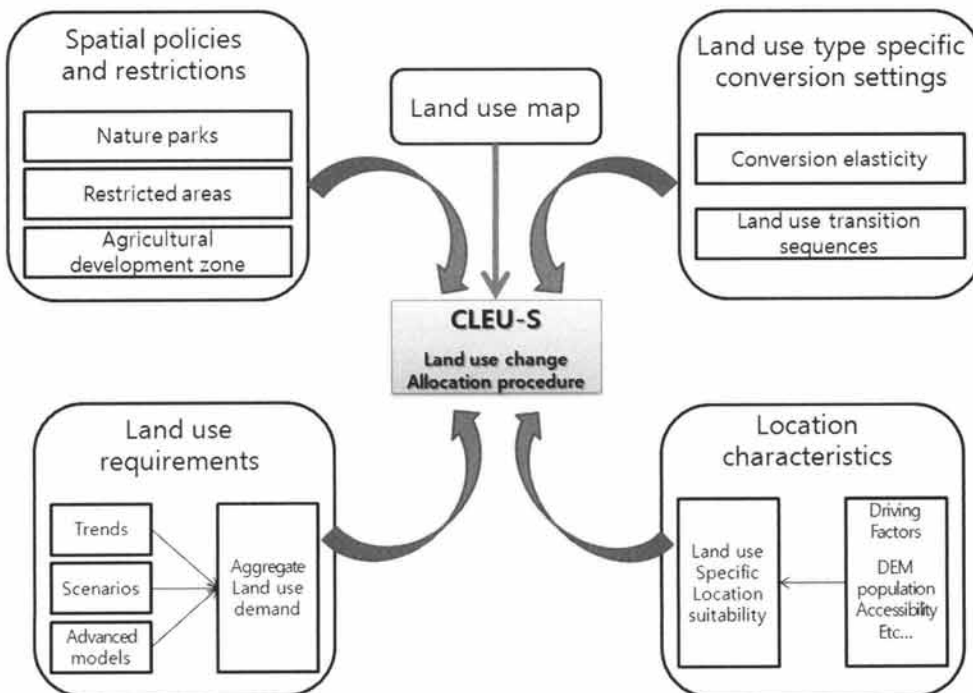


Fig. 2. Overview of the information flow in the CLUE-S model.

는 중분류 토지피복 자료가 오염총량관리제의 5가지 토지이용 분류에 비해 좀 더 세분화되어 분류되어 있기 때문에 본 연구의 오염총량관리제 토지계 발생부하량 산정 시 산정 불가능한 토지가 발생할 수 있으며, CLUE-S모델 내 23개의 토지를 모두 입력하였을 경우 모델이 구동되지 않는 제한점이 발생 할 수 있기 때문이다.

따라서 23개의 중분류 토지피복종류를 오염총량관리제에 맞춰 5개로 재분류해야 하지만 현재 오염총량관리제의 5개 토지이용 중 기타 지목에는 초지, 수역, 습지 등 다양한 토지이용이 존재하기 때문에 5개 토지이용으로만 미래의 시공간적인 토지이용 변화를 분석하기에는 기타 지목에 대한 불확실성이 매우 커지는 한계가 있어 본 연구에서는 기존 오염총량관리제의 기타 토지이용을 초지, 습지, 나지, 수역으로 구분하여 Table 1과 같이 총 8개의 토지이용으로 재분류 하였고 이를 CLUE-S 모델에 적용하였다.

또한 중분류 토지피복 자료를 재분류 한 후, CLUE-S 모델의 입력자료 중 비 공간적 모듈 자료에 해당하는 토지이용요구 자료(Land Requirement)에 대해 구축하였다. 토지이용요구 자료란 현재 토지이용면적이 특정 경향에 따라 미래에 어떻게 증감될 것인가에 대해 작성하는 것으로 여러 미래 토지이용 시나리오에 따라 사용자에 의해 주관적으로 작성될 수 있는 자료이다.

따라서 본 연구에서는 토지이용요구 자료를 구축하기 위해 과거 토지이용이 미래토지이용 경향에 기인하는 것을 전제로 2001과 2009년 중분류 토지피복 면적 자료를 이용하여 2001부터 2009년 사이의 토지이용별 면적을 추세를 이용한 방법에 따른 연평균 증감율을 적용하여 산정하였고 2009년부터 2020년 사이의 토지면적 또한 같은 방법으로 산정하였다(Table 2).

2.3.2. 지역 특성 자료 구축 및 회귀분석

토지이용 및 면적을 변화시킬 수 있는 요소는 지역기후 또는 기상조건(온도, 강수량, 적설량, 풍속 등), 지역 지형조건(경사도, 경사향), 토양종류, 수자원(지표수, 지하수, 물이용 접근성)과 도로망의 접근성 또는 기타 교통수단(공항, 기차역)과의 접근성, 시장과의 접근성, 인구밀도 등 다양한 요소를 통해 결정되며(Briassoulis, 2009), 이에 따라 공간적 토지변화에측에서도 이러한 변화요소 반영이 필요하다.

CLUE-S 모델은 토지이용 면적 증감에 따른 경향 뿐 만 아니라 토지이용 또는 면적을 변화시킬 수 있는 다양한 토지변화요소(Driving Factor)와 이에 따른 각 토지이용별 회귀분석 결과를 모델에 고려하여 토지변화에측에 고려할 수 있다.

본 연구에서는 총 7가지(경사향:  $X_1$ , 경사도:  $X_2$ , DEM:  $X_3$ , 도로까지의 거리:  $X_4$ , 하천까지의 거리:  $X_5$ , 인구:  $X_6$ , 인구밀도:  $X_7$ )의 토지변화요소 자료를 생성한 후(Fig. 3), SPSS 통계 프로그램을 이용하여 1)대지는 도로까지의 거리, 인구, 인구밀도에 대해, 2)논과 전에 대한 지목은 경사향, 경사도, DEM, 하천까지의 거리, 3)산림은 경사향, 경사도, DEM, 4)초지는 경사도와 DEM, 5)습지는 경사도, DEM, 하천까지의 거리, 6)나지는 DEM, 하천까지의 거리, 인구밀도, 7)수역은 DEM, 하천까지의 거리에 대해 회귀분석을 실시하였다.

따라서 회귀분석으로부터 도출된 각 Driving Factor별 회귀계수( $\beta$ )를 식 (1)에 대한 회귀식에 적용하였고 이를 CLUE-S 모델의 입력자료로 사용하였다.

$$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_K X_K \quad (1)$$

Table 2. Land requirement (km<sup>2</sup>)

Year	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Wetland	Land	Water	비고
2001	147.35	195.69	70.02	255.07	20.26	4.51	15.65	24.99	Level II
2002	150.54	190.99	68.72	253.03	21.92	4.92	19.03	24.39	
2003	153.72	186.29	67.42	251	23.58	5.33	22.40	23.80	Prediction
2004	156.9	181.59	66.12	248.97	25.24	5.73	25.78	23.20	
2005	160.08	176.89	64.82	246.93	26.91	6.14	29.15	22.61	
2006	163.27	172.19	63.51	244.9	28.57	6.55	32.53	22.01	
2007	166.45	167.49	62.21	242.86	30.23	6.96	35.91	21.42	
2008	169.63	162.79	60.91	240.83	31.90	7.37	39.28	20.82	Level II
2009	172.81	158.09	59.61	238.8	33.56	7.78	42.66	20.23	
2010	175.73	158.72	58.41	242.09	31.82	5.23	41.30	20.23	
2011	176.65	157.76	58.41	241.50	32.01	5.35	41.63	20.23	Prediction
2012	177.56	156.81	58.41	240.91	32.20	5.46	41.95	20.23	
2013	178.48	155.86	58.41	240.32	32.39	5.58	42.27	20.23	
2014	179.40	154.92	58.40	239.73	32.58	5.69	42.59	20.23	
2015	180.32	153.98	58.40	239.14	32.77	5.80	42.91	20.23	
2016	181.24	153.04	58.39	238.55	32.95	5.90	43.22	20.23	
2017	182.17	152.12	58.38	237.96	33.14	6.01	43.54	20.23	
2018	183.10	151.19	58.36	237.37	33.32	6.11	43.86	20.23	
2019	184.02	150.27	58.35	236.78	33.50	6.21	44.17	20.23	
2020	184.95	149.36	58.33	236.19	33.67	6.31	44.49	20.23	

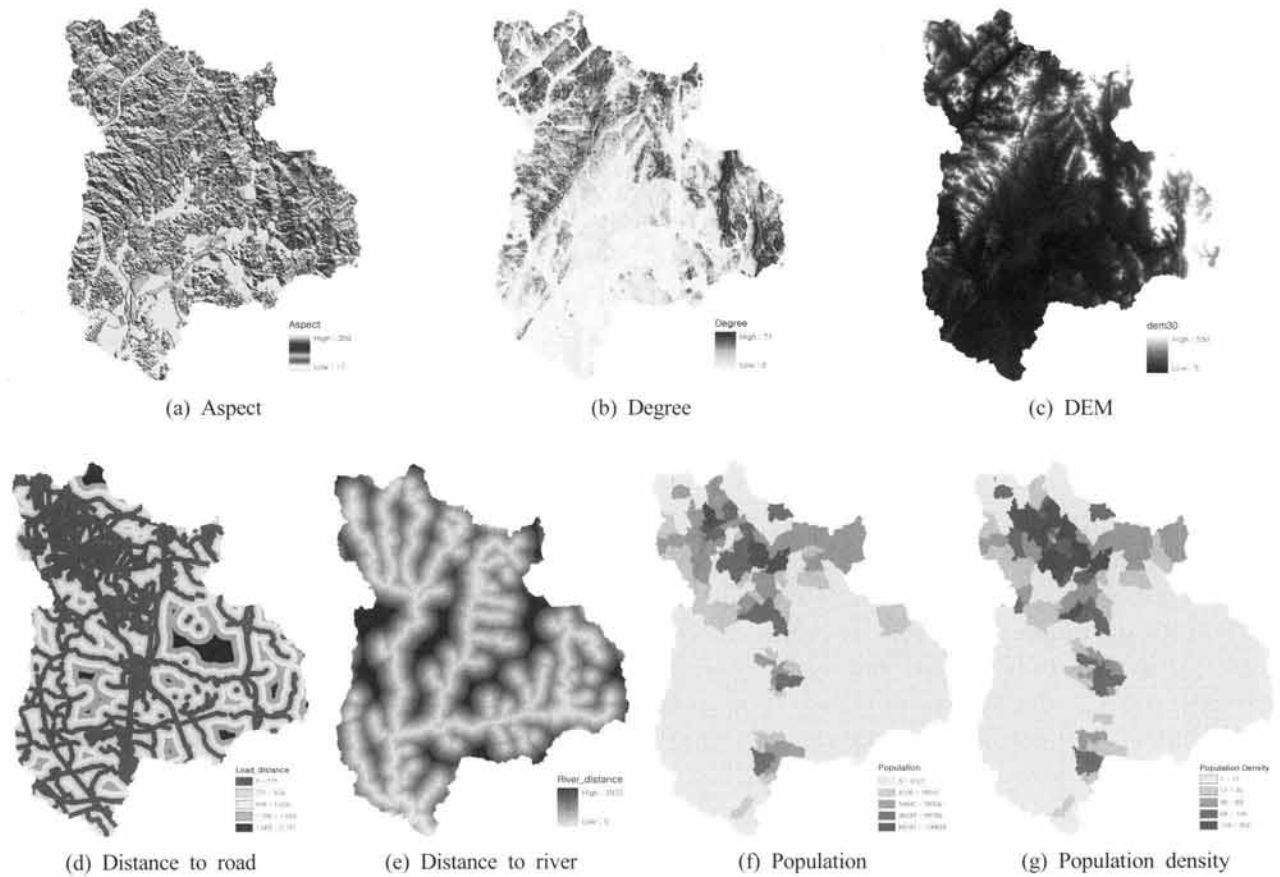


Fig. 3. Driving factors.

식 (1)에서  $\beta$  는 회귀계수,  $X_k$ 는 독립변수,  $P(x)$ 는 발생확률,  $\frac{P(x)}{1-P(x)}$  는 Odds 값이며, Odds 값이란 통계학적으로 어떤 사건이 일어날 확률과 일어나지 않을 확률의 비를 의미한다. 하지만 모든 회귀식이 적합하지 않을 수 있으며 이를 검증해야 하는 단계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 토지이용별 회귀분석에 대한 적합성을 검증하기 위해 ROC (Receiver Operating Characteristic) curve 분석을 실시하였고 분석 결과에 따라 적합한 회귀분석만 도출하여 CLUE-S 모델에 적용하였다.

2.3.3. 특별 토지이용정책지역 구축

CLUE-S 모델은 토지이용정책에 대한 영향을 모델 내 반영할 수 있도록 설계되어 있다. 특히 우리나라 그린벨트와 같은 정책을 모델 내 적용할 수 있기 때문에 CA 기법이나 Markov 기법과는 다르게 토지이용규제 지역 같은 경우 지목 변화를 제한할 수 있는 특징을 지니고 있다.

본 연구에서는 진위A 단위구역 내 그린벨트 지역을 Fig. 4 와 같이 구분하여 CLUE-S 모델에 적용하였고 이를 통해 그린벨트 지역의 토지이용 변화를 제한하였다.

2.3.4. 토지이용 변화 매개변수 자료 구축

토지이용 변화에 대해 예측하기 위해서는 CLUE-S 모델에서 사용자가 매개변수에 대해 임의로 지정해 주어야 하며



Fig. 4. Greenbelt area in JinwiA.

이러한 매개변수들 중 모델에 제일 민감한 부분이 변환탄성 (Conversion Elasticity)계수와 변환행렬(Conversion Matrix)

을 지정해주는 것이다.

변환탄성이란 각 토지이용별 변환될 수 있는 확률을 수치화 시킨 매개변수이며 0에서 1사이의 값을 지닌다. 0의 변환탄성 계수는 이동경작과 같이 한 장소에서 현재 토지이용이 제거되고 동시에 다른 장소에 이 토지이용이 할당될 수 있음을 의미하며 1의 의미는 한개 셀 중 한개 토지이용에 대해 동시에 다른 토지이용이 전혀 추가가 되거나 제거 되지 않음을 의미한다. 예를 들면 도시화에 따른 벌목현상(Deforestation)이 일어나게 되면 동시에 다른 지역에 산림이 조성될 확률이 거의 없어지는 경우와 재조림(Reforestation)이 일어나게 되면 동시에 기존 산림지역에 대한 벌목현상이 일어나지 않는 경우이다. 또한 0과 1사의 값의 의미는 토지이용 변화가 허용 되지만 높은 값일수록 1의 의미에 가까워지는 것을 의미한다.

변환행렬이란 각 토지 간 변화될 수 있는 가능성을 0과 1로 구분한 것으로서 CLUE-S 모델에서는 0일 경우 토지이용 간 변화가 되지 않는 것으로 판단하며 1일 경우는 변화가 가능한 것으로 판단한다.

변환행렬에 대해서는 사용자가 현재 토지이용현황의 특성을 파악 한 후 결정해야 하며, 본 연구에서는 대지의 경우, 타 토지이용으로 변환될 수 있는 가능성이 거의 존재하지 않을 것으로 판단하여 변환행렬을 모두 0으로 설정하였고, 기타 나머지 항목에 대해서는 Table 3과 같이 변환행렬을 설정하여 CLUE-S 모델에 적용하였다.

이와 반대로 변환탄성 계수는 모델의 보정을 통해 결정해야 하기 때문에 Table 4와 같이 기본 값으로 구성한 후 CLUE-S 모델의 매개변수 보정을 통해 값을 수정 하였다.

## 2.4. CLUE-S 모델의 매개변수 보정 및 적용

### 2.4.1. CLUE-S 모델의 매개변수 보정

본 연구에서는 변환탄성 계수를 보정하기 위하여 위에서 8가지로 재분류되어 구축된 2001년 토지이용 자료와 Driving Factor 자료, 그린벨트 구축자료, 변환행렬을 이용하여 2009년의 토지이용 변화를 CLUE-S 모델로 예측하고 실제 2009년의 토지이용 면적과 비교하는 시행착오법을 이용하여 토지이용별 변환탄성 계수에 대한 보정을 실시하였다.

### 2.4.2. 미래 지목변화 시나리오 작성 및 2020년 미래토지이용 변화 예측

CLUE-S 모델을 이용하여 2020년의 미래 토지이용 변화를 예측하기 전, 미래에 대한 토지이용정책이 변화할 수 있기 때문에 미래 토지이용변화 시나리오를 2가지로 나누어 작성하였다. 시나리오 1은 그린벨트 지역이 2020년까지 존재하지 않을 경우이며 시나리오 2는 그린벨트 지역이 2020년까지 존재할 경우에 대한 시나리오 이다.

따라서 각 시나리오 별 위에서 보정된 변환탄성 계수와 재분류된 2009년 토지이용자료, 변환행렬, Driving Factor 자료를 이용하여 2020년의 미래 토지이용 변화를 공간적으로 예측하였다.

## 2.4. 오염총량관리제의 토지계 발생부하량 산정

오염총량관리제에서는 오염부하량을 6가지로 나누어 계획하고 관리하고 있으며 이 중 토지계 오염부하량은 비점오염원 관리에 있어 매우 중요한 오염원 중 하나이다(Ryu, Park et al., 2014). 또한 미래 토지 지목변화에 따른 오염부하량 변화를 총량제 내 반영할 수 있는 오염원이기 때문에 본 연구에서는 2가지의 시나리오별 예측된 미래 토지이용변화 결과를 식 (2)와 발생부하원단위(Table 5)에 적용하여 2020년 미래 토지계 BOD, TP에 대한 발생부하량을 산정 하였고 각 시나리오별 토지계 발생부하량을 비교하였다.

$$\text{토지계발생부하량} = \sum (\text{지목별면적} \times \text{지목별연평균발생부하원단위}) \quad (2)$$

**Table 5.** Unit area load in total water pollution load management system (kg/km<sup>2</sup>/day)

Land category	BOD	TP
Upland	1.59	0.24
Paddy	2.30	0.61
Forest	0.93	0.14
Urban area	85.90	2.10
Others	0.960	0.027

**Table 3.** Default values of Conversion Matrix

	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Wetland	Bare land	Water
Urban area	1	0	0	0	0	0	0	0
Paddy	1	1	1	0	1	1	1	0
Upland	1	1	1	1	1	0	1	0
Forest	1	1	1	1	1	1	1	0
Pasture	1	1	1	1	1	1	1	1
Wetland	1	1	1	0	1	1	1	1
Bare Land	1	1	1	0	1	1	1	1
Water	0	0	0	0	1	1	1	1

**Table 4.** Default values of Conversion Elasticity

	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Wetland	Bare land	Water
Value	1	1	1	1	1	1	1	1

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. 토지이용별 토지이용변화와의 회귀분석 결과

본 연구에서는 CLUE-S 모델의 사회 경제적 및 지형인자 등을 고려하기 위하여 7가지의 토지변화요소에 대해 회귀 분석을 실시하였고 그 결과를 바탕으로 Table 6과 같이 각 토지이용별 회귀분석 식을 구성하였다.

또한 본 연구에서는 각 토지이용과 토지변화요소의 회귀 분석에 대한 적합성을 판단하기 위해 ROC (Receiver Operating Characteristic) curve를 이용하였다.

ROC curve는 true positive (=Sensitivity, 민감도)와 true negative (=Specificity, 특이도)를 동시에 나타내는 그래프이며 이 때 x축은 false positive rate (=1-true negative), y축은 true positive rate가 된다. ROC curve는 그래프가 Fig. 5(i)에서와 같이 왼쪽 모서리에 가깝게 그려질수록 회귀분석이 우수하다고 판단하며 이는 ROC curve 면적(Area under the ROC curve: AUC)이 1에 가까울수록 우수하다는 의미와 같다. 또한 AUC 값을 좀 더 세분화 하면 AUC가 0.5 또는 0.5 이하일 경우 전혀 사용될 수 없는 부적합 회귀식이고 0.5에서 0.7 사이면 덜 적합함, 0.7에서 0.9 사이면 비교적 높은 적합, 0.9에서 1사이면 매우 적합, 1이면 완벽한 적합으로 구분할 수 있다(Song, 2009).

ROC curve 분석 결과, 대지, 습지, 수역에 대해서는 0.7 이상으로 비교적 높은 적합성이 나타났고 논, 나지는 0.6 이상, 밭, 초지, 산림은 0.5이상으로 보다 덜 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 5).

따라서 본 연구에서는 부적합에 가깝게 AUC 결과가 나타난 밭, 초지, 산림을 제외한 대지, 습지, 수역, 논, 나지에 대한 회귀분석 결과를 선택하여 CLUE-S 모델에 반영하였다.

#### 3.2. CLUE-S 모델 적용 결과

##### 3.2.1. 매개변수 보정 결과

실제 2009년 중분류 토지피복자료와 비교한 최적의 2009년 토지이용변화의 결과와 이에 따라 보정된 변환탄성 계

수는 Fig. 6과 Table 7과 같다.

2009년에 대한 실제 토지이용 면적과 예측된 토지이용 면적 결과를 비교하면, 대지, 논, 밭, 산림, 초지, 나지, 수역에 대해서는 모두 오차율이 0.1 이하로 매우 낮게 나타났으며 예측된 토지이용이 실제토지이용을 비교적 잘 예측한 것으로 판단된다.

습지에 대해서는 오차율이 0.34로 다른 토지이용에 비해 높게 나타났지만 습지에 대한 토지이용 면적이 다른 토지 피복 면적 보다 매우 낮은 비율을 차지하며 하천 주변부에 습지가 상당부분이 위치하고 있기 때문에 다른 토지이용이 습지로 전환되는 확률이 매우 낮을 수 있고 건기 혹은 우기에 따라 습지 면적이 현저하게 다를 수 있는 부분이 존재할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 2001년의 습지에 대한 토지이용 면적은 4.51 km<sup>2</sup>으로서 2009년과 이미 약 43% 정도 차이가 존재하였기 때문에 CLUE-S 모델로 예측하는데 있어 어려움이 있는 것으로 나타났다.

하지만 습지는 다른 토지이용에 비해 그 면적 비율이 매우 낮으며 다른 토지이용의 면적 비율이 전체 토지 면적 비율의 99.3% 이상을 차지하고 있기 때문에 전체적인 예측이 잘 맞는 것으로 판단하였다.

따라서 이러한 보정결과에 따른 변환탄성 계수는 산림에서 가장 작은 값인 0.4로 보정이 되었고 대지, 나지, 수역은 0.9, 논, 밭, 초지, 습지에서는 0.8로 보정되었다(Table 8). 이와 같은 결과는 산림이 가장 급속도로 변화되는 면적이 큰 것을 의미하며 산림에서 다양한 토지이용으로 변화될 수 있음을 나타낸다. 이와 반대로 대지와 수역 같은 경우는 타 토지이용으로 변환되는 확률이 상대적으로 매우 적음을 나타낸다.

##### 3.1.2. 시나리오별 2020년 미래토지이용 변화 예측 결과

토지이용정책(그린벨트)이 적용된 것과 적용되지 않은 시나리오에 대해 보정된 변환탄성 계수를 CLUE-S 모델에 적용하여 2020년의 미래 토지이용 변화에 대해 각각 예측하였고 그 결과 Fig. 7과 Table 9와 같이 나타났다.

Table 6. Equations of Logistic regression

Land use	Equation of logistic regression
Urban area	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = 0.223 - 0.002X_1 + 0.000X_6 + 0.01X_7$
Paddy	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -1.109 - 0.022X_2 - 0.03X_5$
Upland	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -2.623 - 0.001X_1 - 0.014X_2 - 0.002X_3$
Forest	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -1.494 - 0.025X_2 + 0.006X_3$
Pasture	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -4.020 - 0.012X_2 + 0.001X_3$
Wetland	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -4.370 - 0.029X_2 - 0.012X_3 - 0.001X_5$
Bare land	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -4.261 + 0.004X_6$
Water	$\ln\left(\frac{P(x)}{1-P(x)}\right) = -2.755 - 0.02X_3 - 0.001X_5$

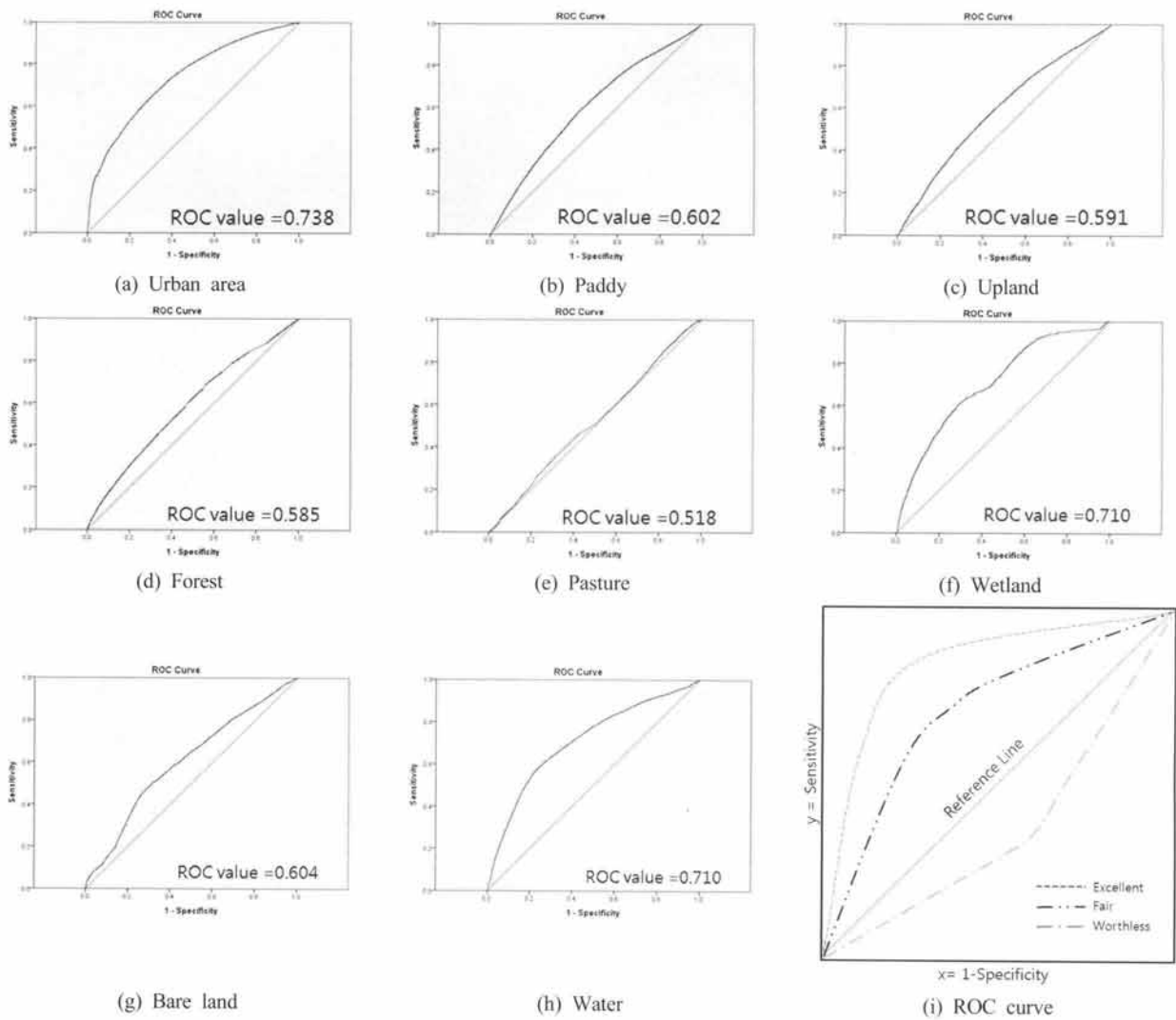


Fig. 5. ROC Curve value.

그린벨트 지역을 미적용한 시나리오 1의 미래 토지이용 변화 패턴은 대지가 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 이에 비해 산림이 급격히 감소하고 그 뒤를 이어 논과 밭 지역이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 나지의 경우도 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 그린벨트 지역을 적용한 시나리오 2는 시나리오 1과 비슷한 경향으로 대지가 급격히 증가하고 논과 밭이 감소하였지만 산림의 급격한 감소는 일어나지 않고 나지의 경우는 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

각 시나리오별 그린벨트 지역의 유무에 따른 대지의 증가율을 좀 더 자세히 나타내면 2009년 실제 토지이용과 각각 0.18%(시나리오 1), 0.13%(시나리오 2) 차이가 있는 것으로 나타났으며, 나지의 경우, 그린벨트 지역을 미적용한 시나리오 1에서 상당부분 산림이 나지로 개간되는 것으로 나타났고, 대지 또한 그린벨트 지역 안에서 증가하는 것으로 나타났다.

하지만 그린벨트 지역을 적용한 시나리오 2에서는 그린벨트 지역 내 산림이 개간되고 대지가 증가하는 경향이 나타나지 않았고 이에 따라 그린벨트 지역 외에서 토지피복별 변환이 이루어졌기 때문에 시나리오 1과 2의 각 토지피

복별 면적 및 공간분포가 차이가 있는 것으로 판단된다.

따라서 우리나라와 같이 토지이용정책이 다양하게 존재하는 지역일수록 CLUE-S 모델이 아닌 토지이용정책을 반영할 수 없는 토지이용변화 예측 모델을 사용한다면, 미래 토지이용변화의 공간적 및 정량적 예측에 있어 상당한 오차가 있을 것으로 예상된다.

### 3.2. 오염총량관리제 토지계 발생부하량 산정 결과

위의 예측된 2가지 시나리오와 추세분석을 이용한 2020년 토지이용의 면적을 이용하여 오염총량관리제의 BOD 및 TP에 대한 토지계 발생부하량을 산정하였고 산정결과는 Table 10과 같이 나타났다.

시나리오 1과 2의 토지계 BOD 발생부하량 산정 결과, 발생부하원단위가 가장 큰 대지에서 719.99 kg/day의 부하량 차이를 나타냈고 총 면적에 대한 BOD 발생부하량 차이는 712.68 kg/day로 나타났다. 토지계 TP 발생부하량 또한 발생부하원단위가 가장 큰 대지에서 17.60 kg/day 차이가 나타났고 총 면적에 대한 TP 발생부하량은 14.87 kg/day로 나타났다.



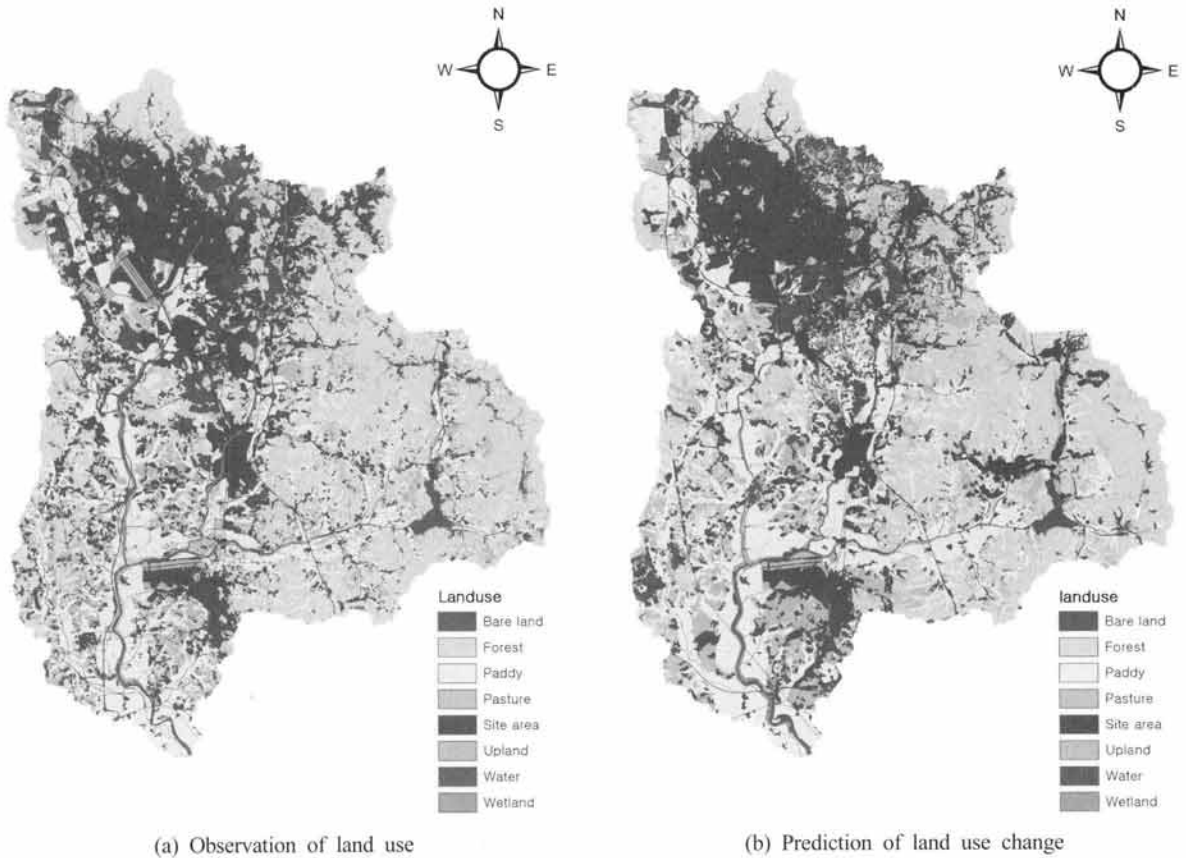


Fig. 6. Comparison of land use map in 2009.

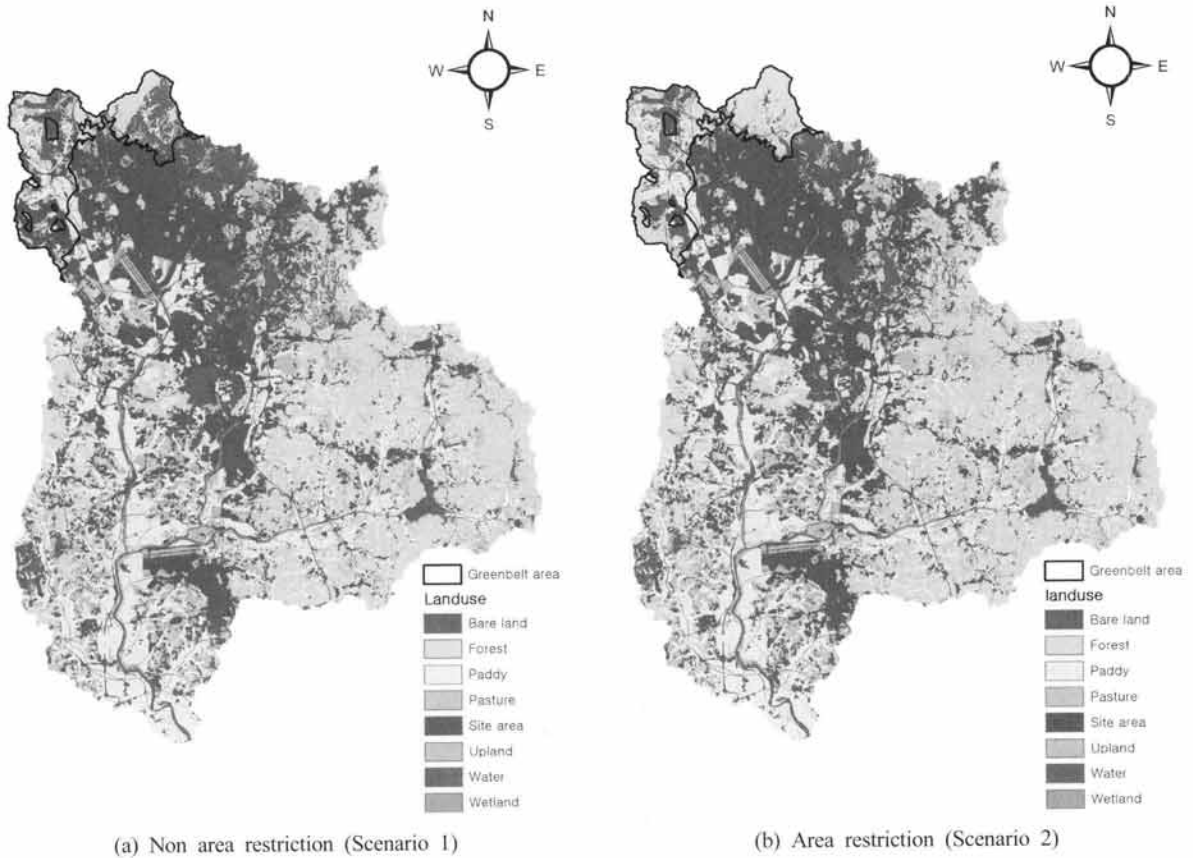


Fig. 7. Comparison of Predicted land use map in 2020.

**Table 7.** Comparison of land use area in 2009 (km<sup>2</sup>)

	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Wetland	Bare land	Water
Observation	172.84	158.11	59.63	238.82	33.58	7.80	42.68	20.25
Prediction	170.30	169.06	64.93	229.91	31.61	5.11	43.75	18.86
Measuring efficiency	-0.01	0.07	0.09	-0.04	-0.06	-0.34	0.03	-0.07

**Table 8.** Calibration results of Conversion Elasticity

	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Wetland	Bare land	Water
Value	0.9	0.8	0.8	0.4	0.8	0.8	0.9	0.9

**Table 9.** Comparison of land use area in 2020 (km<sup>2</sup>)

	Urban area	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Wetland	Bare land	Water
Observation in 2009	170.30	169.06	64.93	229.91	31.61	5.11	43.75	18.86
Scenario1	201.66	158.99	58.05	203.95	32.17	6.22	52.24	20.25
Scenario2	193.28	159.72	56.12	225.81	32.66	6.11	39.58	20.25

**Table 10.** Results of land pollutant load in 2020 (kg/day)

	Scenario	Upland	Paddy	Forest	Urban area	Others
BOD	1	92.31	365.68	189.67	17322.77	106.44
	2	89.23	367.36	210.15	16602.79	94.66
	Trend extraction method	92.75	343.52	219.66	15887.42	102.46
TP	1	13.93	96.98	28.55	423.49	2.99
	2	13.47	97.43	31.64	405.89	2.66
	Trend extraction method	14.00	91.11	33.07	388.40	2.88

또한 시나리오 2와 추세를 이용한 방법을 이용한 토지계 BOD, TP 발생부하량 산정 결과, 대지 지목에서는 BOD, TP 각각 715.37 kg/day, 17.49 kg/day의 차이로 추세를 이용한 방법이 더 적게 나타났고, 총 면적에서도 BOD, TP 모두 추세를 이용한 방법이 더 적게 산정되었다.

이와 같은 결과는 오염총량관리제 토지계 발생부하량에 대지에 의한 발생부하량의 비율이 높다는 것을 의미하며 이에 따라 대지에 대한 미래 예측의 불확실성을 줄여야 토지계 발생부하량의 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 미래 토지이용 변화에 있어 시나리오1과 같이 그린벨트와 같은 토지이용정책을 적용하지 않거나 추세를 이용한 방법과 같이 다양한 토지변화요소를 고려하지 않고 변화를 예측하게 된다면 대지 면적에 대해 과대 또는 과소 예측이 되어 토지계 발생부하량 또한 불확실성이 높아질 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 기존의 오염총량관리제에서 시공간적으로 미래 토지이용변화를 반영하지 못하는 제한점을 해결하기 위해 CLUE-S 모델을 이용한 미래의 시공간적 토지이용 변화를 실제 오염총량관리지역인 진위A 단위유역에 적용하여 평가하였다.

1) CLUE-S 모델을 이용한 진위A 단위유역의 2020년 미래 토지이용 변화 예측 결과, 대지가 지속적으로 증가하며 산림 및 논과 밭의 면적은 지속적으로 감소되는 것으로

분석되었고, 그린벨트 적용 여부에 따라 적용하지 않은 시나리오 1에서는 그린벨트 지역 내에서 대지의 증가나 산림의 개간이 발생되지 않는 것으로 나타났으며 반영하지 않은 시나리오 2에서는 현재 그린벨트 지역 내에서 대지가 증가 하고 산림이 개간되어 나지로 변환되는 현상이 발생되었음

- 2) 또한 2가지 시나리오 및 추세를 이용한 방법에 따른 토지계 발생부하량을 산정한 결과, 시나리오 1과 2의 대지 BOD, TP 오염부하량이 각각 719 kg/day, 17.60 kg/day 차이가 있는 것으로 나타났고 시나리오 2와 추세를 이용한 방법을 비교한 결과 715.37 kg/day, 17.49 kg/day 차이가 나타났으며 이에 따라 토지이용정책 및 토지변화요소 반영이 시공간적 미래 토지이용 변화 뿐 만 아니라 토지계 발생부하량 산정에도 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 분석되었음
- 3) 따라서 CLUE-S 모델은 다양한 사회경제적 토지변화요소를 통계학적으로 고려 할 수 있으며 토지이용정책을 반영하여 시공간적인 미래 토지이용변화 분석을 할 수 있기 때문에 추세방법 만을 이용한 미래 토지변화예측 방법이나 모델 보다는 오염총량관리제에서 좀 더 효과적으로 미래 토지이용 변화를 예측할 수 있으며 토지계 오염부하량을 산정할 때 불확실성을 줄여줄 수 있을 것으로 판단됨
- 4) 또한 CLUE-S 모델은 향후 오염총량관리제에서 유역모델을 오염총량관리제 계획에 적용할 경우 입력자료 구축에 유용하게 사용될 수 있을 것이라 기대됨
- 5) 하지만 본 연구의 결과는 오염총량관리제가 시행되고

있는 한 개의 단위구역에서 평가한 것이기 때문에 향후 4대강 수계의 대표 단위구역을 선정할 후 추가적으로 다양한 통계학적 추계방법과의 비교 및 검토가 필요할 것으로 판단됨

## References

- Briassoulis, H. (2009). Factors Influencing Land-use and Land-cover Change, *Land use, land cover and soil sciences*, W. H. Verhey, EOLSS(e-book), <http://www.eolss.net>, pp. 1-9.
- Kim, S. J. and Lee, Y. J. (2007). The Effect of Spatial Scale and Resolution in the Prediction of Future Land Use using CA-Markov Technique, *Journal of Korean Association of Geographic Information*, 10(2), pp. 58-70. [Korean Literature]
- Lee, D. K., Ryu, D. H., Kim, H. G., and Lee, S. H. (2011). Analyzing the Future land use Change and its Effects for the Region of Yangpyeong-gun and Yeosu-gun in Korea with the Dyna-CLUE model, *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*, 14(6), pp. 119-130. [Korean Literature]
- Lee, Y. G. (2013). *Analysis and Countermeasure on TMDLs for Sustainable Creating a Water Environment*, Gyeongnam Development Institute, pp. 4-5. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Technical Guidelines for TMDLs*, 11-1480523-001067-01, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Oh, Y. G., Choi, J. Y., Yoo, S. H., and Lee, S. H. (2011). Prediction of Land-cover Change Based on Climate Change Scenarios and Regional Characteristics using cluster Analysis, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(6), pp. 31-41. [Korean Literature]
- Park, S. H. (2011). *A Study of the Result Analysis and Improvement of Total Water Pollution Loading System*, Ph. D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Chonnam National University [Korean Literature]
- Song, S. W. (2009). Using the Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve to Measure Sensitivity and Specificity, *Korean Journal of Family Medicine*, 30, pp. 841-842. [Korean Literature]
- Ryu, J., Kim, E., Han, M., Kim, Y. S., Kum, D., Lim, K. J., and Park, B. K. (2014). Enhancement of Estimation Method on the Land T-P Pollutant Load in TMDLs Using L-THIA, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(3), pp. 162-171. [Korean Literature]
- Ryu, J., Park, Y. S., Han, M., Ahn, K. H., Kum, D., Lim, K. J. and Park, B. K. (2014). Enhancement of Land Load Estimation Method in TMDLs for Considering Climate Change Scenarios, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), pp. 212-219. [Korean Literature]
- Veldkamp, A. and Fresco, L. O. (1996). CLUE-CR: an Integrated Multi-scale Model to Simulate Land use Change Scenarios in Costa Rica, *Ecological modeling*, 91, pp. 231-248.
- Verburg, P. H., Veldkamp, A., de Koning, G. H. J., Kok, K., and Bouma, J. (1999). A Spatial Explicit Allocation Procedure for Modeling the Pattern of land use Change based upon Actual land use, *Ecological modeling*, 116, pp. 45-61.
- Verburg, P., Veldkamp, W. S., Espaldon, R. L., and Mastura, S. S. (2002). Modeling the Spatial Dynamic of Regional Land Use: The CLUE-S Model, *Environmental Management*, 30(3), pp. 391-405.