

CA-Markov 모형을 이용한 수자원 보호 목적의 입지규제 효과 분석

송철민*

*특별대책지역 수질보전정책협의회 정책국
e-mail:kaii4@nate.com

Analysis of the Effects of Local Regulation for the Preservation of Water Resource Using CA-Markov Model

Chul Min Song*

*Dept. of Policy, Policy Council for the Paldang Watershed

요약

본 연구는 대한민국의 수질 보호 목적의 입지규제 효과를 분석하고자 하였다. 이를 위해 CA-Markov 모형을 이용하여 입지규제의 미시행을 조건으로 한 토지이용 변화를 모의하였으며, 현재 토지이용과의 차이를 분석하였다. 또한, 원단위를 활용하여 토지이용의 변화에 따른 수질 오염부하량의 변화를 도출하였다. 본 연구를 통해 CA-Markov 모형을 이용한 입지규제 효과 분석 방법론은 인간활동이 내재된 토지이용 변화의 예측을 통해 좀 더 직관적이며 효율적인 규제 효과 분석 도구로 제시할 수 있었으며, 충분히 역할 수행이 가능한 것으로 판단하였다.

1. 서론

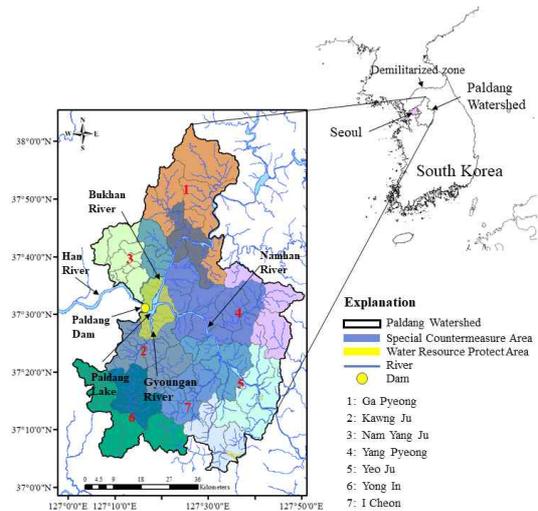
팔당호는 대한민국의 중요 수자원 중 하나이며, 그 중요성이 타 수자원에 비해 매우 높기 때문에 팔당호의 수질관리는 대한민국 중앙정부에서의 최고 중요 정책 분야 중 하나로 평가된다 [1]. 그동안 대한민국 중앙정부는 팔당호 수질을 BOD 기준으로 1 mg/L로 국가 목표로 설정하여, 1990년에 팔당수계에 특별대책지역이라는 입지규제와 2013년부터 수질오염총량관리 제도를 시행해왔다. 그러나, 대한민국 정부는 아직 입지규제의 성과자료를 제시하고 있지 못하며, 이러한 정부의 대응은 오히려 입지규제의 무용론에 관한 여론 형성의 원인으로 작용하고 있다. 이에, 본 연구에서는 팔당수계의 입지규제를 적용하지 않았을 경우의 토지이용/피복 (Land Use/Land Change, LULC)를 모의하여 입지규제의 효과를 나타내고자 한다.

2. 연구재료

2.1 연구지역

연구지역은 그림 1과 같이 팔당호를 둘러싸고 있는 7개 시군인 팔당수계로 설정하였다. 팔당호는 그림 1과 같이 3개의 유입하천 (남한강, 북한강 및 경안천)을 갖는데, 이 3개 하천은 팔당수계를 관통하여 팔당호로 유입되기 때문에 팔당수계의 토지이용 변화에 따라 수질오염이 될 경우 팔당호의 안정적 수질보전이 불가하다. 이에, 중앙정부는 팔당수계의 토지이용을 최대한 억제하고 있어 팔당수계가 수도권에 속해 있음에도

타 수도권에 비해 토지이용의 변화가 적은 것이 특징이다. 연구지역의 대부분 61.2 %의 산림과 18.6 %의 농업지역으로 구성되어 있으며, 도심지역은 5.8 %로 산림과 농업지역과 비교하면 매우 적은 면적이 분포되어 있다.

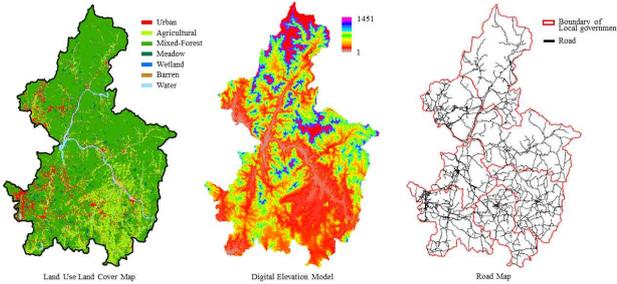


[그림 1] 연구지역

2.2 자료수집

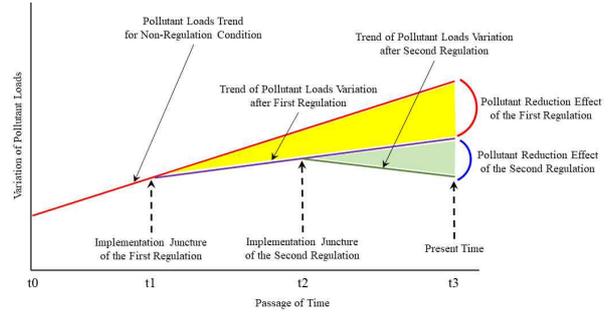
본 연구에서 요구되는 자료는 연구지역의 LULC map, Digital Elevation Model (DEM), Road map, Slope 등 4개 항목이다. LULC map은 환경공간정보서비스에서 수집하였다. EGIS에서 제공하는 LULC map은 대분류, 중분류, 세분류로 구분되나, 본 연구에서는 Urban, Agricultural, Mixed Forest, Meadow, Wetland, Barren 및 Water 등 7개 항목으로 구분된

대분류 LULC map을 사용했다. EGIS의 LULC map은 환경부의 “토지피복도 작성 지침”에 근거하여 작성된 raster 자료이다 [그림 2].



[그림 2] 토지이용도, DEM 및 도로지도

TMDL 계획을 수립할 때 사용하는 수질오염물질 원단위 (pollutant unit-loads)를 사용하였다.



[그림 3]. 규제효과 개념도

3. 연구방법

3.1 본 연구의 입지규제 대상 및 효과 분석 방법론

시기별 팔당수계의 입지규제 변화에 따라 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 수립하고자 하였다. 우선, 본 연구에서 살펴보고자 하는 입지규제는 특별대책지역과 수질오염총량제 등의 두 개 규제로 설정하였다. 특별대책지역의 지정은 1990년이나, 특별대책지역의 실질적인 영향력이 미치기 시작한 연도는 1999년으로 설정했으며, 수질오염총량제도의 시행연도는 앞서 언급한 바와 같이 2013년으로 설정하였다. 두 개의 규제가 시작연도는 각기 다르기 때문에 규제의 영향도 시간의 변화에 따라 고려해야 하는데, 시간 변화에 따른 두 개의 입지규제의 효과에 관한 개념은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3에서 빨간색 선은 입지규제를 시행하지 않았을 경우의 수질오염 부하량의 변화를 의미하며, 보라색 선은 첫 번째 입지규제의 영향으로 인한 수질 오염부하량의 변화로, 녹색 선은 두 번째 입지규제에 의한 수질오염부하량의 변화로 나타낼 수 있다. 이를 연구지역에 적용하면, 그림 3의 x축의 t1은 특별대책지역 제도가 시행된 1999년으로, t2는 수질오염총량제가 시행된 2013년으로, t3은 현재로 가정할 수 있다. 또한, 이러한 가정을 통해 빨간색 호는 특별대책지역 지정에 의한 입지규제 효과로, 파란색 arc는 두 번째 수질오염총량제도의 입지규제 효과로 판단할 수 있다.

또한, LUCC에 따른 수질 오염부하량의 변화를 살펴보고자 하였는데, 수질 모의를 위해 일반적으로는 개념적 모형을 사용한다. 그러나 개념적 모형은 LULC에 따른 수질 오염부하량을 모의하더라도, 개념적 모형의 특성상 수질 오염부하량의 유달음, 자정작용 및 하수처리장의 영향 등을 계산하는 모듈 때문에, 순수한 LUCC에 따라 발생하는 수질 오염부하량을 산정하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 표 2와 같이 LUCC에 따른 수질 오염부하량의 변화를 살펴보고자 대한민국에서

[표 2] LULC에 따른 수질오염물질 원단위

LULC	Biochemical Oxygen Demand (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)	Total Nitrogen (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)	Total Phosphorus (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)
Urban	85.90	13.69	2.10
Agricultural	1.95	8.00	0.425
Mixed Forest	0.93	2.20	0.14
Miscellaneous Land	0.960	0.759	0.027

3.2 CA-Markov Model

본 연구에서는 토지이용 변화 예측을 위해 CA-Markov 모형을 이용하였다. CA-Markov는 Markov Chain에 의한 변환 확률 행렬 (transition probability matrix, TPM)과 Cellular Automata (CA)가 결합된 형태의 모형을 [2] 이용하였다. Markov chain은 시간 t1과 t2 사이의 공간적 변화를 특정하여 그 경향을 확률로 결정하는 방법으로 [3], 경험적 모형의 성격을 갖는다. 또한, Markov Chain을 LULC에 적용하면 공간적 변화의 특성을 행렬로 도출시킬 수 있다. 이 행렬은 앞서 언급한 TPM이며, 식 1과 같이 나타낼 수 있는데, TPM은 정확히 얼마나 많은 LULC가 발생하는가를 결정하며, 변환 확률 (transition probability)이 낮을수록 0에 가까워지며 높을수록 1에 가까워지는 특성을 갖는다. 또한, Markov chain은 식 4와 같이 예측을 위해 특정 시간 사이의 LULC 변화의 묘사가 가능하다 [4].

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad 0 < P_{ij} < 1, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$S(t, t+1) = P_{ij} \times S(t) \quad (4)$$

여기서, S는 유한한 셀의 상태 집합을 나타내며, t와 t+1은 앞선 시점과 이후의 시점을 의미한다. 또한, N은 cell의 neighbor를, f는 지역적 공간에서의 변환 규칙에 관한 함수를 의미한다. 세포 물질로서 CA는 Markov transition

regulation과 인접한 (contiguity) neighbor를 근거로 이전 상태를 고려하여 그 상태 변화를 변화시킨다. 본 연구에서도 Equation (6)과 같은 standard contiguity filter (5×5 matrix)를 이용하여 CA 모형에 활용하였다.

$$\text{Standard contiguity filter} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. 연구결과

4.1 도출된 TPM의 결과

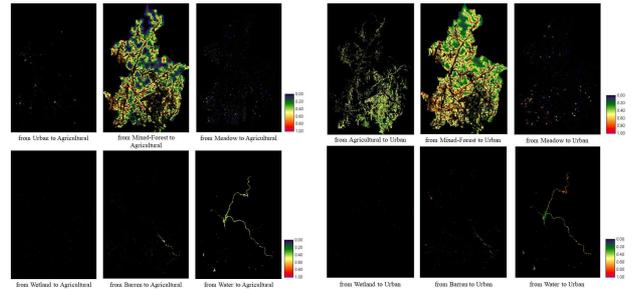
CA-Markov를 이용하여 도출된 TPM은 표3과 같다. TPM은 LULC column의 item이 Probability of Change column의 item으로 변화할 수 있는 확률 (probability)를 의미하며, 각 행의 확률의 합은 1이 된다. LULC column의 item 중 'sum'은 Probability of Change column의 각 item의 합을 나타낸다. TPM 1989-1999에서, LULC column의 Probability of Change는 대부분 Agricultural과 Mixed-Forest에서 높게 나타났다. LULC column 중 SUM을 통해 Probability of Change 중 타 item에 비해 Agricultural이 2.660, Mixed-Forest가 2.179로 높게 나타났음을 직관적으로 알 수 있다.

[표 3] 1989-1999 및 1999-2013 동안의 Transition probability matrix 결과

TPM	LULC	Probability of Change							
		Urban	Agri-cultural	Mixed-Forest	Meadow	Wetland	Barren	Water	
TPM 1989-1999	Urban	0.232	0.465	0.139	0.063	0.000	0.087	0.015	
	Agricultural	0.057	0.526	0.304	0.062	0.000	0.046	0.005	
	Mixed-Forest	0.012	0.159	0.777	0.037	0.000	0.013	0.003	
	Meadow	0.041	0.412	0.448	0.057	0.000	0.036	0.006	
	Wetland	0.090	0.446	0.237	0.058	0.000	0.056	0.114	
	Barren	0.088	0.482	0.199	0.084	0.000	0.099	0.048	
	Water	0.021	0.171	0.075	0.022	0.001	0.046	0.665	
	Sum	0.541	2.660	2.179	0.382	0.001	0.382	0.855	
Sum-Itself	0.309	2.134	1.402	0.325	0.001	0.283	0.190		
TPM 1999-2013	Urban	0.736	0.134	0.005	0.048	0.013	0.050	0.014	
	Agricultural	0.091	0.728	0.085	0.043	0.010	0.029	0.014	
	Mixed-Forest	0.005	0.033	0.923	0.031	0.000	0.008	0.000	
	Meadow	0.116	0.232	0.271	0.326	0.001	0.048	0.006	
	Wetland	0.539	0.087	0.000	0.082	0.084	0.051	0.157	
	Barren	0.260	0.288	0.052	0.125	0.042	0.165	0.069	
	Water	0.000	0.000	0.001	0.006	0.012	0.016	0.965	
	Sum	1.747	1.503	1.336	0.662	0.162	0.365	1.226	
Sum-Itself	1.010	0.775	0.413	0.336	0.077	0.200	0.260		

그림 4는 TPM을 raster로 표현한 것으로 그림 4(a)는 1989-1999의 모든 LULC가 Agricultural로 변화하는 TPM을, 그림 5(b)는 1999-2013의 다양한 LULC가 Urban로 변화하는 TPM을 나타낸다. 그림 4(a)에서 Agricultural의 TPM이 타 지역에 비해 활발한 TPM의 변화를 보여주고 있는데, 이는 Mixed-Forest가 연구지역의 많은 부분을 차지하기 때문이기도 하며, 이는 앞서 언급한 표 3의 TPM 1989-1999의 결과에 대응되기 때문으로 판단된다. 그림 4(b)에서는 Agricultural

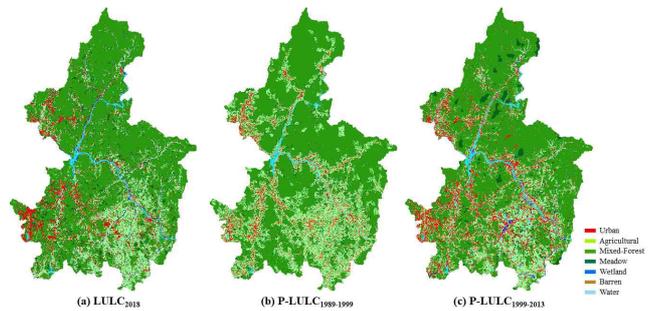
및 Mixed-Forest가 Urban으로 변화하는 TPM이 활발한 것으로 나타나는데, 이 또한 표 3의 TPM 1999-2013의 결과에 대응되기 때문으로 판단된다. 특히, Mixed-Forest가 그림 4(a)의 TPM과는 다르게 좀 더 복잡한 형태의 TPM을 보여지고 있다. 이는 그림 2의 도로지도 형태와 유사한 것으로 나타나, Urban의 개발은 도로의 영향에 의한 일반적인 도심 개발 현상과 매칭되는 것으로 판단할 수 있다.



(a) Transition Potential of Agricultural from 1989 to 1999 (b) Transition Potential of Urban from 1999 to 2013
[그림 4] 1989-1999 and 1999-2013 동안의 Transition Potential

4.2 LULC 예측 결과

LULC 예측 결과는 그림 6과 같으며, 표 4와 같이 TPM 1989-1999에 의한 2018년의 LULC 예측은 P-LULC₁₉₈₉₋₁₉₉₉으로, TPM 1989-1999에 의한 2018년의 LULC 예측은 P-LULC₁₉₉₉₋₂₀₁₃으로, 현재 2018년 LULC는 LULC₂₀₁₈으로 칭하고 각 LULC 간의 차이를 비교하였다. 표 4의 Difference_1은 P-LULC₁₉₈₉₋₁₉₉₉과 P-LULC₁₉₉₉₋₂₀₁₃과의 차를 나타내는데, Urban 및 Agricultural은 각각 -271.05 km² 및 317.21 km²로 면적의 차이를 보이면서 Urban보다 Agricultural의 발전이 두드러진 것으로 나타났다. 표 4의 Difference_2는 LULC₂₀₁₈과 P-LULC₁₉₉₉₋₂₀₁₃와의 차를 나타내는데, Urban, Agricultural, Mixed-Forest 및 Meadow가 각각 -169.21 km², -61.76 km², 63.60 km² 및 158.78 km²의 면적 차이를 나타냈다.



[그림 5] LULC 예측 결과

[표 4] LULC 예측 결과 및 현재 LULC와의 비교

LULC	(a) LULC 2018	(b) P-LULC 1989-1999	(c) P-LULC 1999-2013	Difference_1 (km ²) (b) - (c)	Difference_2 (km ²) (a) - (c)
------	---------------	----------------------	----------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------

	(km ²)	(km ²)	(km ²)		
Urban	248.71 (5.8 %)	146.87 (3.4 %)	417.92 (9.8 %)	-271.05	-169.21
Agricultural	790.68 (18.6 %)	1169.65 (27.5 %)	852.44 (20.0 %)	317.21	-61.76
Mixed-Forest	2607.42 (61.2 %)	2595.3 (60.9 %)	2543.82 (59.7 %)	51.48	63.60
Meadow	361.56 (8.5 %)	185.61 (4.4 %)	202.78 (4.8 %)	-17.17	158.78
Wetland	42.69 (1.0 %)	0.21 (0.0 %)	26.56 (0.6 %)	-26.35	16.13
Barren	105.71 (2.5 %)	113.14 (2.7 %)	73.17 (1.7 %)	39.97	32.54
Water	104.13 (2.4 %)	50.12 (1.2 %)	144.21 (3.4 %)	-94.09	-40.08
SUM	4260.9	4260.9	4260.9	0	0

Mixed-Forest	-59.2	-139.9	-8.9
Meadow	-152.4	-120.5	-4.3
Wetland	-15.5	-12.2	-0.4
Barren	-31.2	-24.7	-0.9
Water	38.5	30.4	1.1
SUM	14,435.7	2543.6	368.2

5. 결론

본 연구는 CA-Markov 모형을 이용하여 특별대책지역 및 수질오염총량제 등의 입지규제 미시행을 조건으로 한 LULC를 모의하여 입지규제의 효과를 도출하였다. 그 결과 특별대책지역을 시행하지 않는 조건에서는 Agricultural이, 수질오염총량제도를 시행하지 않는 조건에서는 Urban이 두드러지게 발달한 모의결과가 나타났다. 이와 함께 LUCC에 따른 수질 오염부하량의 변화를 살펴보았는데, 특별대책지역의 미시행 조건에 의해 현재 대비 수질오염부하량이 감소하는 것으로 나타났으며, 수질오염총량제도의 미시행 조건에서는 현재 대비 수질 오염부하량이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구와 같이 CA-Markov 모형을 이용한 입지규제 효과 분석 방법론은 사회과학적 영역에서의 분석방법이 아닌 공학적 영역에서의 분석방법으로, 인간활동이 내재된 토지이용 변화의 예측을 통해 좀 더 직관적이며, 간편하고 효율적인 규제효과 분석도구로 생각되며, 충분히 역할 수행이 가능한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Hwang, J.H.; Park, S.H.; Song, C.M. "A Study on an Integrated Water Quantity and Water Quality Evaluation Method for the Implementation of Integrated Water Resource Management Policies in the Republic of Korea", *Water* 12, pp. 2346, 2020.
- [2] Singh, S.K.; Mustak, S.; Srivastava, P.K.; Szabó, S.; Islam, T. "Predicting spatial and decadal LULC changes through cellular automata Markov chain models using earth observation datasets and geo-information", *Environ. Process.* 2, pp. 61 - 78, 2015.
- [3] Murugesan, S.; Zhang, J.; Vittal, V. Finite state Markov chain model for wind generation forecast: A data-driven spatiotemporal approach. *In Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, USA, 16 - 20 January* pp. 1 - 8, 2012.
- [4] D Behera, M.; Borate, S.N.; Panda, S.N.; Behera, P.R.; Roy, P.S. Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA)-Markov model - A geo-information based approach. *J. Earth Syst. Sci.* 121, pp. 1011 - 1024, 2012.

4.3 수질오염 원단위를 이용한 입지규제의 효과 분석

입지규제 시행 조건에서 LUCC에 따른 수질 오염부하량의 배출 변화를 파악하고자 표 2를 이용하여 수질 오염부하량의 차이를 표 5와 같이 나타냈다. 표 5의 (a)는 P-LULC₁₉₈₉₋₁₉₉₉의 수질 오염부하량에서 P-LULC₁₉₉₉₋₂₀₁₃의 수질 오염부하량을 뺀 값을 의미한다. 여기서, Agricultural 및 Mixed-Forest의 면적이 증가함에 불과하고, BOD, TN 및 TP의 수질 오염부하량의 합계가 모두 마이너스 값으로 나타났다. 이는 표 2에서 나타난 바와 같이 Urban에서 배출되는 BOD, TN 및 TP 수질오염물질 원단위가 타 토지이용에 비해 BOD는 44-92배, TN는 8-18배 및 TP는 5-78배 수준의 차이가 나기 때문으로 판단된다. 표 5의 (b)는 P-LULC₁₉₉₉₋₂₀₁₃의 수질 오염부하량에서 LULC₂₀₁₈의 수질 오염부하량을 뺀 값을 나타낸다. 이는 표 5의 (a)의 양상과는 다르게 BOD, TN 및 TP의 수질 오염부하량의 합계가 모두 플러스 값으로 나타나, TMDL 규제에 의한 수질 보전의 긍정적 효과는 분명하게 나타난 것으로 판단된다. 이는 표 4와 같이 Urban 및 Agricultural의 면적이 증가하였기 때문으로 판단되며, 주요 원인으로 앞서 언급한 Urban의 수질오염물질 원단위 때문으로 생각된다.

[표 5] Variation of pollutant load difference

LULC	(a) Pollutant Load Difference between P-LULC1989-1999 and P-LULC1999-2013		
	Biochemical Oxygen Demand (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)	Total Nitrogen (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)	Total Phosphorus (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)
Urban	-23283.2	-3710.7	-569.2
Agricultural	618.6	2537.7	134.8
Mixed-Forest	47.9	113.3	7.2
Meadow	-16.5	-13.0	-0.5
Wetland	-25.3	-20.0	-0.7
Barren	38.4	30.3	1.1
Water	-90.3	-71.4	-2.5
SUM	-22710.5	-1133.9	-429.8
LULC	(b) Pollutant Load Difference between P-LULC1999-2013 and LULC2018		
	Biochemical Oxygen Demand (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)	Total Nitrogen (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)	Total Phosphorus (kg·km ⁻² ·day ⁻¹)
Urban	14,535.2	2316.5	355.3
Agricultural	120.4	494.1	26.3