

## GIS 기반 CA-Markov 기법을 이용한 토지피복 변화에 따른 미래 유출량 전망 분석

박진혁<sup>1</sup> · 노선희<sup>2</sup> · 이근상<sup>3\*</sup>

### Outlook Analysis of Future Discharge According to Land Cover Change Using CA-Markov Technique Based on GIS

Jin-Hyeog PARK<sup>1</sup> · Sun-Hee NO<sup>2</sup> · Geun-Sang LEE<sup>3\*</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 금강유역 내 용담댐 및 대청댐을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 미래 유출량 전망에 지배적인 인자로 작용하는 토지피복 변화에 따른 유출량 변화를 분석하였다. Landsat TM 위성영상을 이용하여 과거 1990년 및 1995년 토지피복 자료를 관측 자료로 사용하여 CA-Markov 연쇄기법에 의한 2000년 토지피복도를 모의하여 비교·검증을 한 후 향후 2050년과 2100년의 토지피복변화를 모의하였다. 이를 SWAT모형의 입력 자료로 이용하여 A1B 시나리오 하에서 토지피복 변화 전·후의 유출량을 비교 분석 하였다. 금강유역에 대한 토지피복에 대한 경년별 추세 분석결과 산림과 논은 꾸준히 감소하고 주거지, 나지, 초지 등은 증가하는 경향을 나타내었다. 미래 토지피복의 변화를 고려한 유출 변화 분석결과, 토지피복의 변화를 고려한 유출량이 토지피복의 변화를 고려하지 않았을 때보다 전체적으로 1.83~2.87%로 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 토지피복, CA-Markov기법, 유출량, SWAT 모형

#### ABSTRACT

In this study, the change of the discharge according to the land cover change which acts as one of dominant factors for the outlook of future discharge was analyzed using SWAT(Soil and Water Assessment Tool) model for Yongdam and Daecheong Dam

2013년 4월 24일 접수 Received on April 24, 2013 / 2013년 6월 18일 수정 Revised on June 18, 2013 /  
2013년 7월 23일 심사완료 Accepted on July 23, 2013

1 한국수자원공사 Kwater연구원 K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

2 충남대학교 토목공학과 Dept. of Civil Engineering, Chungnam University

3 전주비전대학교 지적부동산과 Dept. of Cadastre and Real Estate, Vision University of Jeonju

\* Corresponding Author E-mail : gslee@jvision.ac.kr

Watershed in the Geum River Basin. The land cover maps generated by Landsat TM satellite images in the past 1990 and 1995 were used as observed data to simulate the land cover in 2000 by CA-Markov serial technique and after they were compared and verified, the changes of land cover in 2050 and 2100 in the future were simulated. The discharge before and after the change of land cover by using input data of SWAT model was compared and analyzed under the A1B scenario. As a result of analyzing the trend in the elapses of year on the land cover in the Geum River Basin, the forest and rice paddy class area steadily decreased while the urban, bare ground and grassland classes increased. As a result of analyzing the change of discharge considering the future change of the land cover, it appeared that the discharge considering the change of land cover increases by 1.83~2.87% on the whole compared to the discharge not considering the change of land cover.

**KEYWORDS** : Land Cover, CA-Markov Technique, Discharge, SWAT Model

## 서론

최근 이상기후 및 기후변화로 인해서 연간 강수량의 변동 폭이 커지고 강우강도가 증대되어 홍수와 가뭄 등 자연재해의 발생빈도와 규모가 점차 증대되고 있다. 따라서 홍수, 가뭄 등의 자연재해에 대한 능동적 대처와 적절한 대응 방안을 마련하고 보다 효율적인 수자원 및 하천유역관리가 필요하게 되었다. 특히 하천유역 관리에서 유출 산정 시 필수 입력 자료인 토지이용의 변화를 예측하여 여러 분야에 적용하는 것이 필요하나 지금까지 우리나라의 수자원계획은 미래의 수문조건이 과거와 같다는 가정에서 이루어져 왔다(Ministry of Construction & Transportation, 2000). 토지피복의 변화는 증발산을 비롯하여 지구온난화의 직접적 원인이 되는 온실가스의 발생원과 흡수원 등에도 영향을 미치므로 수자원 및 재해관리 측면에서 많은 연구가 필요하다(IPCC, 2007). 이러한 측면에서 미래의 토지이용 변화를 지역적인 차원에서 예측하고 평가하는 시스템이 필요하게 되었으며, 수문환경의 변화가 유출에 미치는 영향을 예측하여 유출특성 변화를 정량적으로 규명하는 것이 하천유역관리 측면에서 매우 중요한 업무로 대두되고 있다(Kim and Lee, 2007).

기후변화가 수문현상에 미치는 영향에 관해 현재 대기, 수자원, 농업, 생태계, 해양 등 다양한 분야에 걸쳐 연구가 이루어지고 있다. Kim *et al.*(2004)은 SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Process) 모형을 이용하여 기후변화가 용담댐유역의 유출량과 수자원에 미치는 영향을 평가하였으며, Kim *et al.*(2004)은 5종류의 GCM(General Circulation Model) 2CO<sub>2</sub> 시나리오를 이용하여 미래 100년간의 일 유출량을 모의하였다. 또한 Bae *et al.*(2007)은 A2 시나리오의 GCM 결과를 다운스케일링한 후 PRMS(Precipitation and Runoff Modeling System) 모형을 통해 기후변화에 따른 유출량을 모의하였으며, Park *et al.*(2011)은 공간해상도 27km 지역규모의 A1B 시나리오를 기반으로 RCM(Regional climate model) 모형과 SWAT 모형을 이용하여 미래 유출량을 전망한 바 있다. 그리고 Lee *et al.*(2010)은 미래 기후변화에 따른 안동호와 임하호의 부유사 변화량을 모의하였으며, Joh *et al.*(2011)은 기후변화 시나리오를 적용하여 미래의 강설량을 예측하는 연구를 수행하였다.

기존의 기후변화 연구들을 살펴보면, 미래의 토지피복 변화가 없다는 가정에서 유출량, 부유사량 그리고 적설량 등을 전망한 연구가 대부분

분임을 알 수 있다. 최근 이러한 한계를 보완하기 위하여 시간적 변화를 고려할 수 있는 셀룰라 오토마타(Cellular Automata, CA) 기법과 토지이용의 변화된 경향을 공간적으로 반영할 수 있는 Markov Chain 모델을 이용하여 미래 토지피복 변화를 예측하기 위한 연구들이 진행된 바 있다. 먼저 Lim *et al.*(2006)은 IPCC에서 제시하는 CCCma CGCM2 모의값과 미래 토지피복변화를 CA-Markov 기법을 이용하여 소양강댐의 수문영향을 분석하였으며, Kim and Lee(2007)은 CA-Markov 기법을 이용하여 경안천의 토지이용변화를 예측하였다. 또한 Lee and Kim(2007)은 미래 토지이용변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov기법을 제시한 바 있으며, Lee *et al.*(2004)은 CA 기법을 이용하여 도시성장 모형에 활용하는 연구를 수행하였다. 외국의 사례를 살펴보면, 먼저 Turner(1987)는 공간상의 한 셀은 인접한 토지이용의 잠재적인 영향을 받아 변화한다는 공간영향 알고리즘을 제시하였으며, Clark *et al.*(1997)은 CA와 델타트론(Deltatron)모형을 결합하여 시간의 변화에 따른 도시성장을 모의하였다. 또한 Mundia and Aniya(2006)는 케냐 지역에서 급격하게 확장하는 도시지역을 Landsat 영상을 이용하여 미래 토지이용 변화를 예측한 바 있다.

본 연구에서는 금강유역을 대상으로 기후변화가 수자원에 미치는 유출측면에서의 영향을 평가하기 위하여 IPCC에서 제시하고 있는 A1B시나리오 기반의 RCM모의 결과값을 수문기상자료로 사용하여 SWAT모형에 적용함으로써 기후변화에 따른 장기적인 유출영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 과거 1990년 및 1995년 토지피복 자료를 관측자료로 사용하여 토지이용의 변화된 경향을 공간적으로 반영할 수 있는 Markov Chain 모델과 시간변화를 고려할 수 있는 CA기법을 결합한 CA-Markov 연쇄기법을 통해 2000년 토지피복도를 모의하여 비교·검증 한 후 향후 2050년과 2100년의 토지피복변화를 모의하였다. 그리고 이와 같이 모의한 결과를 SWAT 모형의 입력 자료로

활용하여 A1B 기후변화 시나리오하에서 토지피복 변화 전·후의 유출량을 비교분석 하였다.

## 기본 이론

### 1. GCM 및 시나리오 선정

GCM은 전 지구차원의 대기순환모델로서 지구의 대기를 3차원의 불연속 격자시스템으로 구성하고 각 격자점에서의 대기 상태를 지배하는 방정식을 시간 적분하여 지구의 대기상태를 재현 및 예측하는 모형이다. GCM을 이용한 수문기상학적 분석을 실시하기 위해서는 통계적인 방법을 통한 상관분석을 이용하여 작은 규모의 유역에 대한 분석을 실시하거나, GCM결과를 경계조건으로 한 후 RCM모형을 사용하여 국지규모에 대한 분석을 실시하는 방법 등이 주로 이용되고 있다(Park *et al.*, 2011). 기상청 국립기상연구소는 독일 막스플랑크 기상연구소에서 도입한 대기-해양 결합모형인 전지구 기후모형인 ECHO로부터 전지구 규모의 기후예측을 산출하였는데, ECHO-G는 대기모형과 해빙-해양모형 그리고 두 모형의 결합을 위하여 OASIS라는 소프트웨어를 이용하였다. 대기모형과 해양모형의 해상도는 각각 약 400km와 300km이며 전지구 기후모형에서 산출된 결과를 이용하여 동아시아지역 및 한반도의 미래기후를 예측하게 되는데 이 때 사용되는 지역기후모형으로는 미국 펜실베이니아 대학에서 개발한 MM5 라는 역학적 규모축소법이 적용되며 약 400km를 약 27km로 상세화하여 한반도 미래 기후 예측자료를 작성하게 된다(Kwon *et al.*, 2009).

본 연구에서는 기후변화시나리오의 신뢰성을 위하여 국립기상연구소 기후연구팀에서 “기후변화 협약대응 지역기후시나리오 활용기술개발”(2005~2007)의 일환으로 생산한 A1B 시나리오자료를 이용하였다. A1B시나리오는 현재 이산화탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하는 시나리오로 대기 중 이산화탄소의 농도는 2100

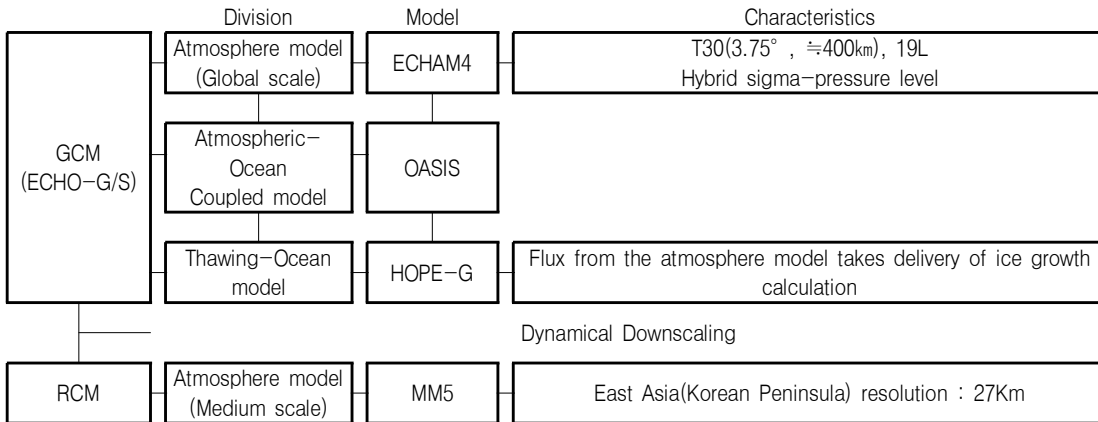


FIGURE 1. GCM and RCM of NIMR(National Institute of Meteorological Research)

년경 720 ppm까지 도달할 것으로 예상되는 시나리오로써, 화석에너지 및 고효율 에너지원이 균형 있게 사용된다고 가정하며 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오이다.

2. SWAT모형

본 연구에서는 기후변화시나리오에서의 일 단위 유출모의를 위해 기존 국내외의 연구성과나 유출모형의 인지도, GIS자료의 활용성, 그리고 연구의 적합성 등을 고려하여 준분포형 모형인 최신 버전의 SWAT 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모델이다 (Arnold *et al.*, 1998). SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기 강우-유출모형으로서 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 부모형으로 구성되어 있다. SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확하게 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 지표유출, 측방 지표하 유출, 침투, 지하수, 수로손실, 증발산 등으로 구성하며 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있게 유역을 구분한다. 물수지 방정식은 다음과 같다(식 1).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 는 최종의 토양수분량(mm),  $SW_0$ 는  $i$ 일의 초기토양수분량(mm),  $R_{day}$ 는  $i$ 일에서의 강수량(mm),  $Q_{surf}$ 는  $i$ 일에서의 지표 유출량(mm),  $E_a$ 는  $i$ 일에서의 증발산량(mm),  $W_{seep}$ 는  $i$ 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm),  $Q_{gw}$ 는  $i$ 일의 회귀량(mm),  $t$ 는 시간(일)이다.

SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확하게 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 HRU별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서는 지표면 유출을 평가하기 위해 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 SCS 유출곡선법을 선택하여 유출모의에 이용하였다. SCS 유출곡선법은 다양한 토지이용과 토양형태 하에서 유출량을 추정하기 위한 일관성 있는 기준을 제공하기 위하여 개발되었으며, SCS 유출곡선식은 식 (2)와 같다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

여기서,  $Q_{surf}$ 는 누기유출량,  $R_{day}$ 는 일 강우량,  $I_a$ 는 유출 이전의 지면 저류 차단과 침투를 포함하는 초기손실,  $S$ 는 저류 매개변수를 나타낸다.

### 3. CA-Markov Chain기법

CA-Markov기법은 Markov Chain 모델과 CA의 이론적 체계를 결합한 기법이다. Markov Chain은 다양한 경영시스템을 모형화하는 수학적 기법으로 과거에 있었던 변화를 토대로 어떤 상태에서 다른 상태로 연속적으로 전개되는 동적성격을 파악하는 방법으로 미래에 있을 변화를 연속적으로 예측하는 확률과정 모형으로 설명한다. 예를 들어, 확률과정  $[x(t_1)]$ 가 있을 때, 시점  $t_1 < t_2 < t_3 \cdots t_n < t$ 에 관해서 아래와 같은 관계가 성립하면 이 과정을 Markov process라고 하며 이 때, 시간모수  $t$ 와 상태공간이 이산적인 경우를 Markov Chain 으로 설명한다.

$$P = [x(t) = x | x(t_1) = x_1, x(t_2) = x_2,$$

$$\begin{aligned} x(t_3) &= x_3 \cdots x(t_n) = x_n \\ &= [x(t) = x | x(t_n) = x_n] \end{aligned} \quad (3)$$

Markov Chain에서 현재 상태는 바로 이전의 상태에 의존하고 과거 경로에는 무관하다는 것을 나타낸다. CA는 비선형 동적모형으로써 시계열 공간자료의 변화양상을 인접한 격자에 거리, 방향에 의해 공통적으로 적용시킴으로써 지역적인 인접격자의 상태를 지속적으로 변화시킨다. 변화된 인접격자의 상태는 시공간상에서 반복적으로 실행되어 복잡한 특성과 형태를 분석 및 모의할 수 있다(Kim and Lee, 2007).

CA-Markov기법을 이용한 토지피복 변화 추정과 관련해서는 그림 2와 같이 인접셀이 미치는 영향력의 범위를 8개의 이웃으로 설정한 후 2차원의 정방형 셀에 토지피복이 가지는 값을 부여하고, 이전시기에서 다음시기의 토지이용 클래스의 전환 상태를 구한 후 계산된 전환 확률에 의한 규칙을 시간에 따라 적용함으로써 공간상의 셀 변화를 시뮬레이션 하게 된다.

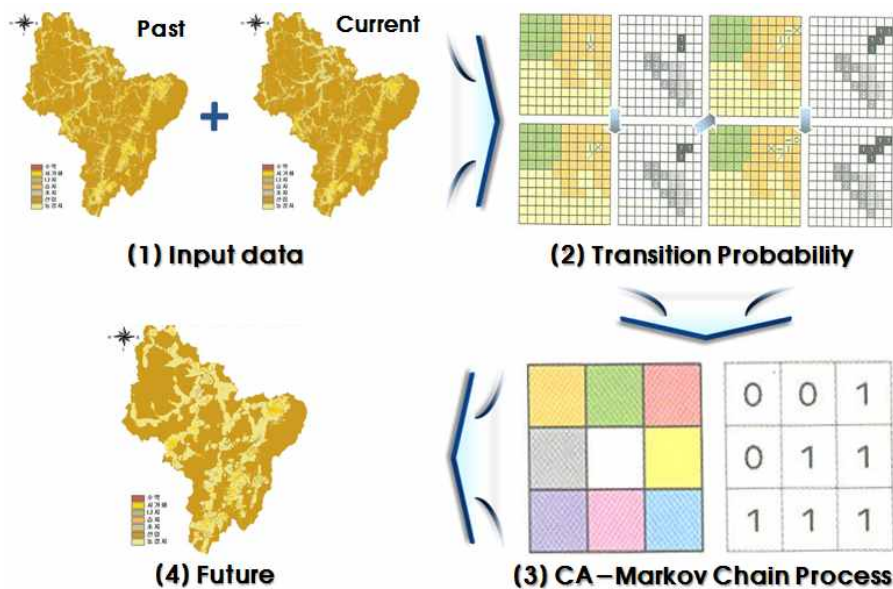


FIGURE 2. Concept of CA-Markov technique

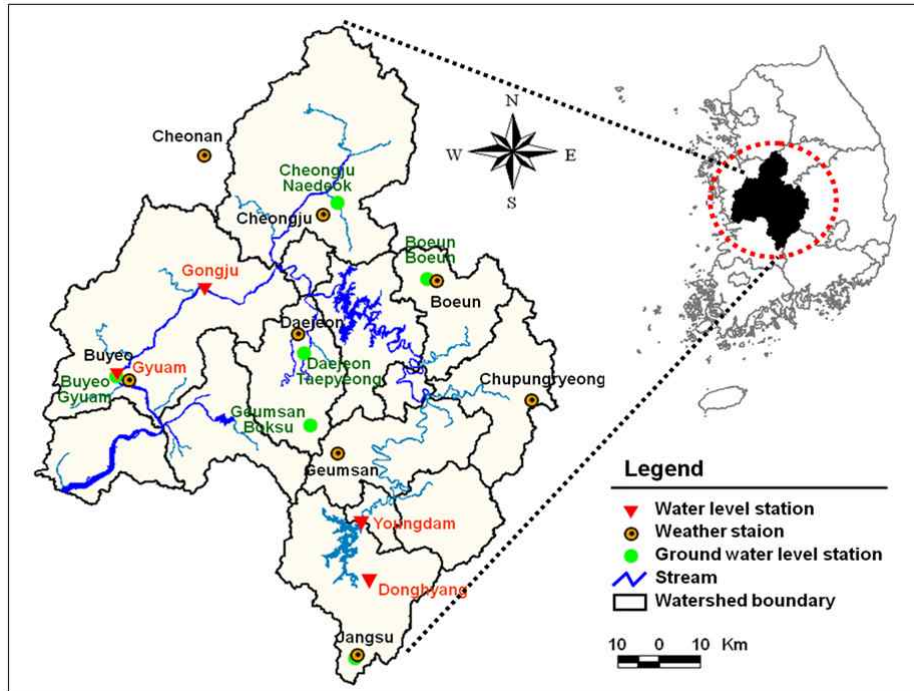


FIGURE 3. Study area

## 연구대상지 및 토지피복 현황 분석

### 1. 연구대상지

본 연구의 대상유역인 금강유역은 금강분류 구간에 대청 다목적댐과 용담 다목적댐이 설치되어 홍수조절에 활용되고 있고, 하구에 금강하구둑이 설치되어 운영되고 있다. 금강유역은 북위 35°35′~37°05′, 동경 126°41′~128°25′에 걸쳐 우리나라의 중앙부 서쪽에 위치하고 있고, 유역면적은 9,914.013km<sup>2</sup>, 유로연장은 388.45km으로 한강, 낙동강에 이어 3번째로 큰 유역이다. 유역의 북쪽은 차령산맥을 끼고 우리나라에서 제일 큰 한강유역과 접해 있고, 동쪽은 소백산맥을 경계로 낙동강유역과 접하며, 남쪽은 섬진강 및 만경강 유역이 접하고 있고, 서쪽으로는 서해와 접해 있다. 금강유역의 동서장은 약 120km 정도이고 남북장은 약 160km이다(Ahn *et al.*, 2010). 본 유역은 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 대권역의 유역둘레

는 737.89km이고, 유역 평균폭은 25.52km, 유역평균표고는 EL.85.31m, 유역평균 경사는 16.74%이다. 연평균 기온은 11.5 °C이며 추후 소별 증발량은 1,070~1,292mm 정도이다. 그림 3은 금강유역 유역도 및 관측소 현황을 나타내고 있다.

### 2. 토지피복 현황 분석

과거 토지피복의 변화를 살펴보기 위해 금강유역을 대상으로 1975년부터 2000년까지 5년 단위의 Landsat TM 위성영상을 사용한 토지피복도 자료를 수자원정보종합시스템(WAMIS, Water Management Information System)을 통하여 수집하였다. 표 1의 6개의 항목(수역, 시가화, 산림, 나지 및 습지, 초지, 농지)에 대한 금강유역 토지피복 비율을 살펴보면, 급격한 도시화로 인하여 수역의 비율이 증가하는 반면 산림은 점차 감소하는 경향을 알 수 있다. 금강유역 전체면적 중 수역의 면적은 1975년에

TABLE 1. Change of land cover area in the Geum River Basin(WAMIS)

Year	Classification of Land Cover(km <sup>2</sup> [%])						
	Water	Urban	Forest	Bare	grassland	Paddy	Total
1975	118.5 [1.2]	100.5 [1.0]	6696.0 [67.5]	79.7 [0.8]	145.4 [1.5]	2774.0 [28.0]	9914 [100]
1980	101.9 [1.0]	128.4 [1.3]	6545.5 [66.0]	136.0 [1.4]	273.9 [2.8]	2728.3 [27.5]	9914 [100]
1985	190.6 [1.9]	183.1 [1.8]	6334.7 [63.9]	90.3 [0.9]	244.5 [2.5]	2870.8 [29.0]	9914 [100]
1990	230.4 [2.3]	282.0 [2.8]	6286.3 [63.4]	131.6 [1.3]	305.5 [3.1]	2678.3 [27.0]	9914 [100]
1995	241.3 [2.4]	359.2 [3.6]	6123.5 [61.8]	114.7 [1.2]	304.1 [3.1]	2771.2 [28.0]	9914 [100]
2000	228.7 [2.3]	460.2 [4.6]	6070.4 [61.2]	117.1 [1.2]	317.8 [3.2]	2719.9 [27.4]	9914 [100]

1.2%, 2000년에는 2.3%로 약 2배정도 증가한 것으로 나타났고, 산림의 면적은 67.5%에서 61.2%로 소폭 감소한 것으로 나타났다. 권역별로 살펴보면 전반적으로 시가지가 증가하기는 했으나, 10%가 넘는 지역은 갑천 유역 한곳으로 나머지 유역은 시가지 비율이 현저히 낮음을 알 수 있었다.

## 적용 및 결과

### 1. CA-Markov을 이용한 미래 토지피복 변화 예측

본 연구에서는 금강유역전체 및 금강유역 내 용담댐유역 및 대청댐유역에 대하여 5년 단위의 시계열 토지피복도를 작성하여 경년별 추세를 분석하고, 미래 토지피복 변화를 예측하기 위하여 1990년과 1995년 자료를 기본 입력 자료로 선정하여 CA-Markov 연쇄기법을 이

용하여 2000년도의 토지피복을 예측하였다. 토지피복 자료는 WAMIS 토지피복 분류 기준에 따라 8분류로 설정하였으며 비교 토지피복도의 이미지 시간주기(5년)와 동일하게 예측하기 위해, 미래 토지피복 변화의 시간주기를 5년으로 지정하였다. 1990년과 1995년의 기본 자료로부터 2000년 자료를 추출하고, 이를 실제 분류한 2000년 토지피복도와 비교하여 검증한 뒤 다시 1995년 자료와 2000년 자료로부터 2005년의 미래 토지피복 변화 양상을 추출하는 과정을 반복하여 각각 5년 단위(2000, 2005, 2010, 2015... 2090년)의 미래 토지피복도를 예측하였다. 표 2는 용담댐 유역의 토지피복 모의 결과를 나타낸 것으로서, 2000년도를 볼 때 실제 토지피복 현황과 모의한 결과가 90% 이상 유사한 것으로 나타났다. 미래의 토지피복 변화 예측에서는 산림과 논은 꾸준히 감소하고 시가지 지역 등은 증가하는 경향을 나타내었다.

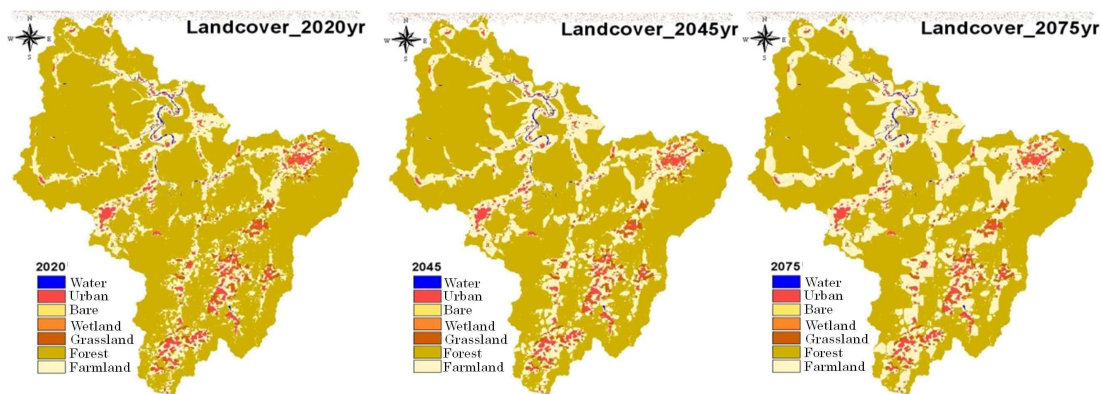


FIGURE 4. Outlook of future land cover change using CA-Markov technique

TABLE 2. Land cover change per year and future outlook (Yongdam Watershed) Unit : m<sup>2</sup>

Type	1990yr	1995yr	2000yr(Cal)	2000yr(Obs)	2020yr	2045yr	2075yr
Water	2.88	2.88	2.88	2.56	2.88 (▲12.50)	2.70 (▽6.25)	2.14 (▽20.74)
Urban	20.84	24.84	26.7	29.44	32.1 (▲9.04)	40.89 (▲27.38)	67.08 (▲64.05)
Bare	6.05	4.65	4.94	2.66	1.21 (▽54.51)	1.21 ( - )	0.93 (▽23.14)
Wetland	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00 ( - )	0.00 ( - )	0.00 ( - )
Grassland	23.73	19.73	20.84	22.06	28.75 (▲30.33)	27.82 (▽ 3.23)	25.21 (▽9.38)
Forest	758.21	742.86	733.46	743.57	735.14 (▽1.13)	704.24 (▽4.20)	615.48 (▽12.60)
Farmland	118.72	135.47	141.61	130.13	130.35 (▲0.17)	153.57 (▲17.81)	219.59 (▲42.99)
Total	930.43	930.43	930.43	930.43	930.43	930.43	930.43

## 2. 모형 적용성 검토

금강유역 내 대청댐 및 용담댐 유역의 기후 변화 영향평가를 위하여 SWAT모형을 이용하여 수문 입력 자료를 구축하였다. SWAT 모형의 장기유출 해석을 위한 기본 GIS 자료는 DEM, 토지이용도 및 토양도자료가 필요하며 이 자료들은 WAMIS에서 입수하여 GIS를 이용하여 각종 수문매개변수들을 생성하였다(그림 5).

또한 기상자료는 유출량 산정에 사용되는

기본적인 데이터로 강우, 최고·최저 기온, 태양 복사량, 상대습도, 풍속 자료를 기상청과 WAMIS로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다. 이 자료들은 토양에 대한 다양한 증발산을 반영하기 위하여 유역을 분할하는 SWAT 모형에서 각 소유역의 입력 자료로 사용된다.

각각의 매개변수들 중 CN2, ESCO, SOL\_AWC는 지표수 흐름 모의, GW\_REVAP,

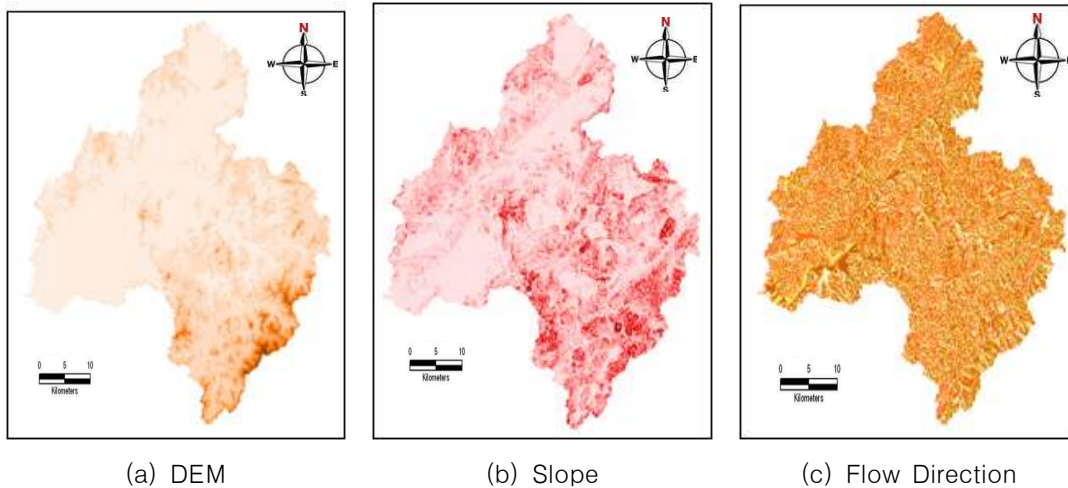


FIGURE 5. GIS hydrological parameters



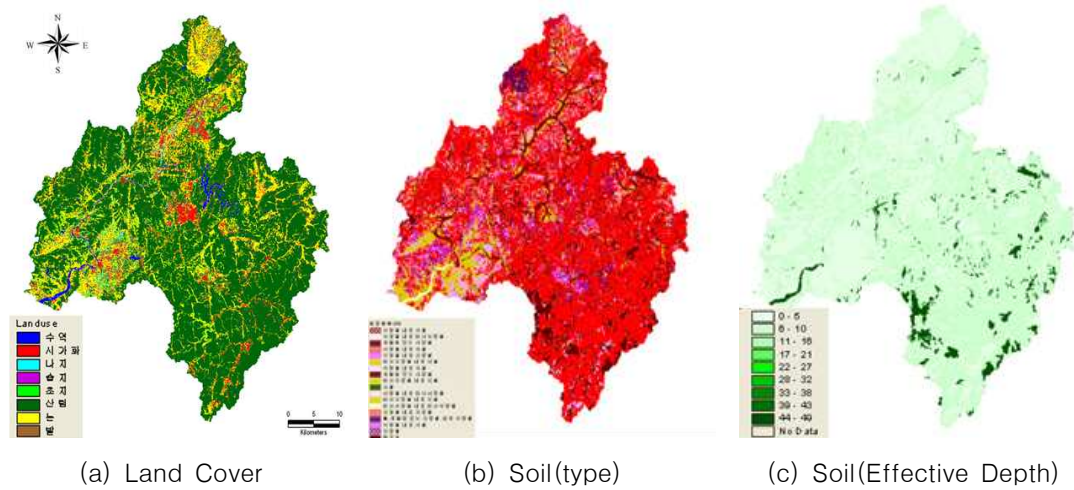


FIGURE 5. Continued

REVAPMIN, GWQMN, GW-DELAY, ALPHA\_BF, RCHRG\_DP는 지표하 흐름, SURLAG, CH\_K2, TIMP, SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN는 지하수 흐름 모의에 지배적인 영향을 미친다(Van Liew *et al.*, 2007). 본 연구에서는 유출량 분석결과 관측값보다 모의값이 크게 모의되어 유출량을 감소시킬 수 있는 매개변수의 범위에서 지표수 흐름 모의와 관련된 매개변수를 참고로 하여 CN2, ESCO, SOL\_AWC를 선택하여 허용범위 내에서 변화시키면서 보정을 수행하는 시행착오법을 사용하였다(표 3). 최적의 보정기간을 설정하기 위해 2004년부터 보정 시작기간으로 3개년간(2004년~2006년)을 설정하여 매개변수를 보정하였다.

SWAT 모형을 이용해서 미래 유출량을 전망하기 위해서는 우선 과거 관측값을 이용해서 계산된 유출량과의 비교를 통해 신뢰할 만한 결과를 제시해 주는지에 대한 모형의 적용성

검토가 필요하다. 강우유출해석의 결과로부터 모형의 적합성을 평가하기 위하여 총 유출량 오차 외에 체적오차의 백분율(VER)과 침투유량 오차의 백분율(QER)을 산정하였다. 각각의 계산식은 다음과 같다.

$$VER = \left| \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})}{\sum Q_{obs}} \right| \times 100 < 15 \quad (4)$$

$$QER = \left| \frac{\sum (Q_{pobs} - Q_{pcal})}{\sum Q_{pobs}} \right| \times 100 < 15 \quad (5)$$

여기서,  $Q_{obs}$ : 관측유량(CMS),  $Q_{cal}$ : 계산유량(CMS),  $Q_{pobs}$ : 관측침투유량,  $Q_{pcal}$ : 계산침투유량 이다.

표 4는 SWAT모형을 이용하여 용담댐 및 대청댐유역을 대상으로 VER, QER, 그리고 계

TABLE 3. Calibrated parameter values for the SWAT model

Parameter	Description	Input File	Value
CN2	Initial SCS runoff curve number for AMC II	.MGT	▽2
ESCO	Soil evaporation compensation factor	.HRU	0.5
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	.SOL	▽0.1

TABLE 4. Assessment of applicability for SWAT model

Division	VER(%)	QER(%)	Total Discharge Error(%)
Yongdam	15.37	11.29	9.9
Daecheong	17.88	4.38	15.7
Average	16.63	7.84	12.80

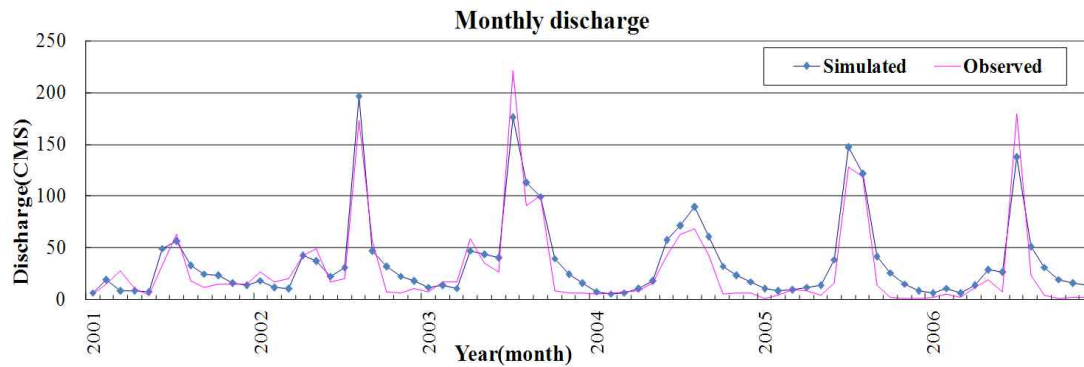


FIGURE 6. Comparison between simulated and observed hydrograph (Yongdam Watershed)

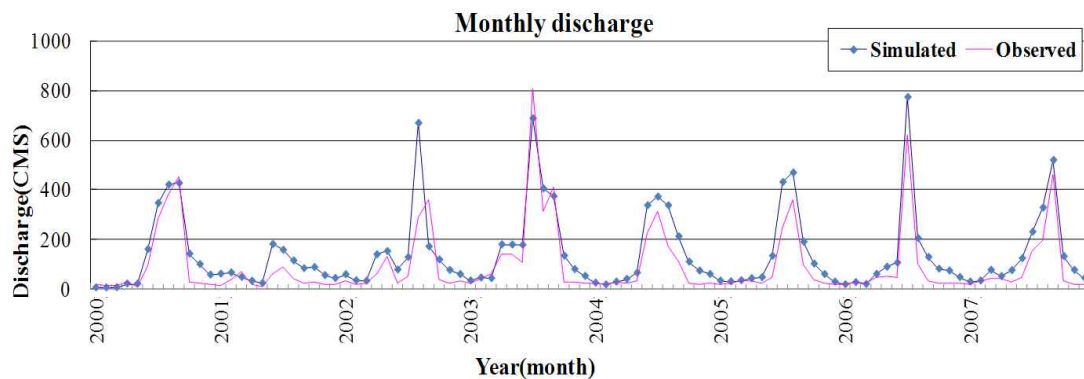


FIGURE 7. Comparison between simulated and observed hydrograph (Daecheong Watershed)

산유량의 합계와 관측유량의 합계를 나눈 총유출량 오차를 비교하여 나타낸 것이다. 적합성 평가 결과 VER, QER 및 총유출량오차 지표의 평균 오차가 20%미만으로 나타났으며, 모의치와 실측치에 대한 상관관계도 각각 90.1%, 84.3% 일치하는 것으로 나타나 SWAT모형의 적용가능성은 충분한 것으로 판단되었다(그림 6, 그림 7).

한편 용담댐 유역내의 천천 수위관측소 지점

의 유량을 모형결과로 비교분석 한 결과 91.3% 일치하는 것으로 나타났으며, 동향수위 관측소 지점의 유량은 82.8% 일치하는 것으로 나타났다.

그림 8은 분포형모형의 주된 장점중 하나인 전 유역에 대하여 유역 내 임의의 지점에 대한 유출량을 파악하기 위하여 첨두(Peak)유량시 하천유출량을 분포형 유출모형의 계산 결과 값을 이용하여 격자마다의 유출량을 GIS와 연계

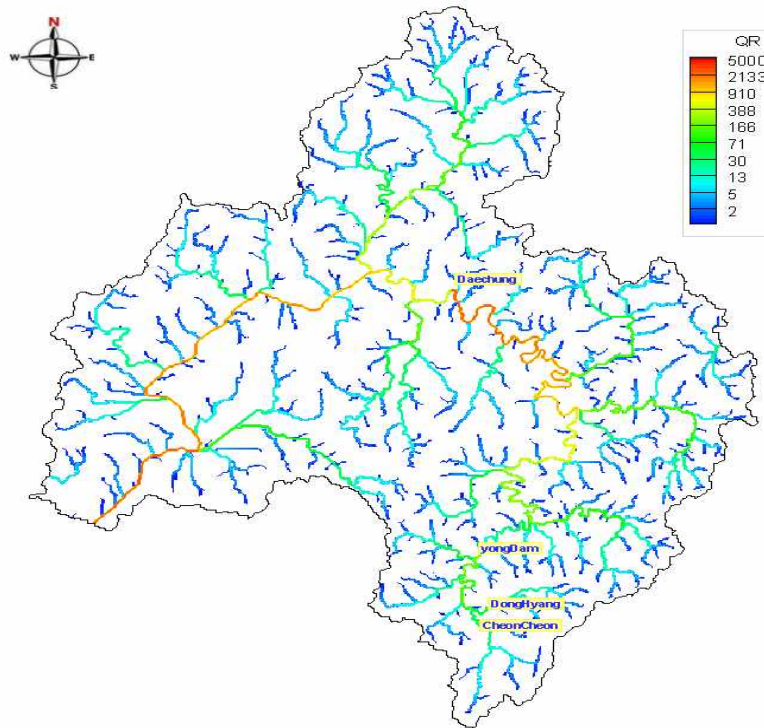


FIGURE 8. Spatial distribution map for the discharge of the peak time

하여 시·공간적 분포로 나타낸 것이다.

### 3. 토지피복변화에 따른 미래 유출량 변화 분석

물순환에 영향을 미치는 가장 중요한 두 가지 인자는 기후와 토지이용인데 과거 대부분의 연구들은 기후변화 또는 토지이용 변화에 대한 유출 특성 변화에 대한 분석이 주를 이루고 있지만 본 논문에서는 이를 동시에 고려하고자 하였다. Landsat TM 위성영상을 이용하여 과거 1990년 및 1995년 토지피복 자료를 관측 자료로 사용하여 CA-Markov 연쇄기법에 의한 2000년 토지피복도를 모의하여 비교·검증을 한 후 향후 2050년과 2100년의 토지피복 변화를 모의하였다. 미래 토지피복의 변화를 고려한 유출 변화 분석결과(표 5), 토지피복의 변화를 고려한 유출량이 토지피복의 변화를 고려하지 않았을 때보다 전체적으로 1.83~2.87%

로 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 이는 도시화에 따른 시가화 면적이 미래에 증가하고 산림 면적이 감소함에 따라 전체적으로 불투수면적이 증가하기 때문인 것으로 판단되나, 예상보다 전체적인 유출량 증가가 두드러지지 않은 이유는 원자료로 활용한 1990년과 2000년 사이에 금강 유역이 타 유역에 비해 상대적으로 급격한 토지피복의 변화가 나타나지 않아 과거에 있었던 변화를 토대로 미래에 있을 변화를 연속적으로 예측하는 CA-Markov 기법의 특성이 가지는 한계 때문인 것으로 판단된다. 그림 9는 미래 토지이용변화에 따른 용담댐 및 대청댐유역의 유출량 변화를 토지피복을 고려하지 않았을 경우(Landcover\_2000)와 토지피복 변화를 고려하였을 경우(CA-Markov)를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.

TABLE 5. Comparison of future discharge considering land cover change using SWAT model

Basin	Scenario	Period(year)	Landcover_2000 (CMS)	Ca_Markov (CMS)	Rate of Change(%)
Yongdam	Obs.	2001	22.10	-	-
	A1B (Sim.)	2011~2030	26.88	27.41	▲ 1.96
		2031~2060	28.77	29.36	▲ 2.06
		2061~2090	29.68	30.42	▲ 2.51
Daechung	Obs.	2001	79.62	-	-
	A1B (Sim.)	2011~2030	104.04	105.95	▲ 1.83
		2031~2060	114.52	117.76	▲ 2.83
		2061~2090	119.53	122.96	▲ 2.87

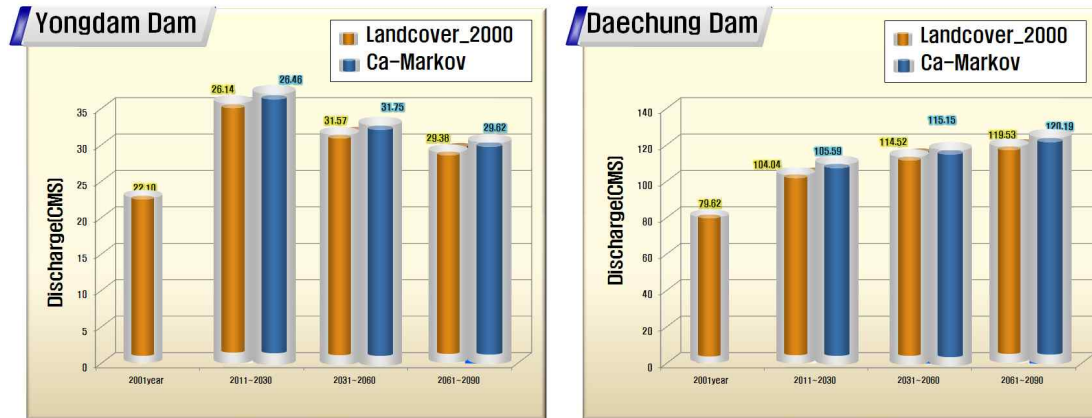


FIGURE 9. Comparison of future discharge considering land cover change

### 결론

본 논문에서는 금강유역 내 용담댐 및 대청댐유역을 대상으로 기존 연구사례에서는 기후변화에 따른 미래유출량을 전망할 때 미래에도 토지피복의 변화가 없다는 비현실적인 가정에서 미래 유출량을 전망한 연구가 대부분인 상황에서 토지피복의 시공간적 변화경향을 반영할 수 있는 Markov Chain 모델과 시간변화를 고려할 수 있는 CA기법을 결합한 CA-Markov 연쇄기법과 SWAT 모형을 이용하여 A1B 기후변화 시나리오 하에서 토지피복 변화를 고려하기 전·후의 미래 유출량을 비교분석 하였다. 본 연구의 주요 결과 및 결론은 다음과 같다.

첫째, 1975년부터 2000년까지 5년 단위의 Landsat TM 위성영상을 사용한 토지피복에

대한 경년별 추세 분석결과 산림과 논은 꾸준히 감소하고 주거지, 나지, 초지 등은 증가하는 경향을 나타내었다. 금강유역 전체면적 중 시가지의 면적은 1975년에 1.2%, 2000년에는 2.3%로 약 2배 정도 증가한 것으로 나타났고, 산림의 면적은 67.5%에서 61.2%로 소폭 감소한 것으로 나타났다. 권역별로 살펴보면 전반적으로 시가지가 증가하기는 했으나, 10%가 넘는 지역은 갑천 유역 한곳으로 나머지 유역은 시가지 비율이 현저히 낮음을 알 수 있었다.

둘째, 1995년 자료와 2000년 자료로부터 2005년의 미래 토지피복 변화 양상을 추출하는 과정을 반복하여 각각 5년 단위(2000, 2005, 2010, 2015... 2090년)의 미래 토지피복도를 예측하였으며, 실제 2000년의 피복현황과 비교한 결과 90% 이상 유사한 것으로 나타

났다. 미래 토지피복 변화를 분석한 결과, 전체적으로 산림과 논은 꾸준히 감소하고 시가지 지역 등은 증가하는 경향을 나타내었다.

셋째, GIS 자료를 기반으로 SWAT 모형을 이용하여 2001년부터 2006년까지의 과거 일 유출모의를 실시하여 최종 방류부의 관측 유출량과 비교해 본 결과 SWAT 모형의 모의 유출량이 용담댐 및 대청댐유역 각각 90.1% 및 84.3%로 일치하는 등 관측치를 비교적 잘 재현하여 모형의 적용가능성은 충분한 것으로 판단되었다.

넷째, 미래 토지피복의 변화를 고려한 유출 변화 분석결과, 토지피복의 변화를 고려한 유출량이 토지피복의 변화를 고려하지 않았을 때보다 전체적으로 1.83~2.87%로 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 이는 도시화에 따른 시가지 면적이 미래에 증가하고 산림 면적이 감소함에 따라 전체적으로 불투수 면적이 증가하기 때문인 것으로 판단되나, 예상보다 전체적인 유출량 증가가 두드러지지 않은 이유는 원자료로 활용한 1990년과 2000년 사이에 금강 유역이 타 유역에 비해 상대적으로 급격한 토지피복의 변화가 나타나지 않아 과거에 있었던 변화를 토대로 미래에 있을 변화를 연속적으로 예측하는 CA-Markov 기법의 특성이 가지는 한계 때문인 것으로 판단된다.

CA-Markov 기법은 과거에서 현재까지의 추세를 가지고 미래를 예측하는 일종의 수학적 통계적인 프로세스이므로 논과 밭의 경우처럼 일정부분은 실제와는 달리 증가하는 경향을 보일 수 있다. 따라서 향후 보다 신뢰도 높은 토지피복 상태를 예측하기 위해서는 후속연구를 통해 다양한 인문 사회적인 인자도 포함하여 고려해야 할 것으로 판단된다. **KAGIS**

## 참고문헌

Ahn, S.R., J.H. Park, H.S. Chae and E.H. Hwang. 2010. Characteristic analysis of hydro meteorologic parameters of Geum

River basin considering climate change. Proceedings of the Korean Water Resources Association, pp.1555-1559 (안소라, 박진혁, 채효석, 황의호. 2010. 기후변화를 고려한 금강유역 수문기상인자의 특성분석. 한국수자원학회 학술발표대회논문집. 1555-1559쪽).

Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I : model development. Journal of the American Water Resources Association 34(1):73-89.

Bae, D.H., I.W. Jung and B.J. Lee. 2007. Outlook on variation of water resources in Korea under SRES A2 scenario. Journal of the Korean Water Resources Association 40(12):921-930 (배덕효, 정일원, 이병주 2007. A2시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망. 한국수자원학회논문집 40(12):921-930).

Clark, S., J. Starr, T.W. Foresman, W. Parince and W. Acevedo. 1997. Development of the temporal transportation database for the analysis of urban development in the Baltimore-Washington region. Processing of ASPRS/ACSM Annual Convention and Exhibition, Baltimore. MD, April 22-24. Vol. 3, pp.101-110.

Joh, H.K., S.B. Kim, H. Cheong, H.J. Shin and S.J. Kim. 2011. Projection of future snowfall by using climate change scenarios. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 14(3):188-202 (조형경, 김셋별, 정혁, 신형진, 김성준. 2011. 기후변화 시나리오를 이용한 미래의 강설량 예측. 한국지리정보학회지 14(3):188-202).

- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K and New York, NY, USA.
- Kim, B.S., H.S. Kim, B.H. Seo and N.W. Kim. 2004. Influence of climate change to runoff of Yongdam-Dam basin. Journal of the Korean Water Resources Association 37(3):185-193 (김병식, 김형수, 서병하, 김남원. 2004. 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향. 한국수자원학회 논문집 37(3):185-193).
- Kim, S.J. and Y.J. Lee. 2007. The effect of spatial scale and resolution in the prediction of future land use using CA-Markov technique. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 10(2):57-69 (김성준, 이용준. 2007. 면적규모 및 공간해상도가 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용 예측결과에 미치는 영향. 한국지리정보학회지 10(2):57-69).
- Kim, W.T., D.R. Lee and C.S. Yoo. 2004. Influence analysis of runoff of Daechung-dam basin according to the climate change. Journal of the Korean Water Resources Association 37(4):305-314 (김웅태, 이동률, 유철상. 2004. 기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석. 한국수자원학회 논문집 37(4):305-314).
- Kwon, H.H., B.S. Kim, B.G. Kim and S.Y. Yoon. 2009. Analysis to spatial and temporal characteristic change of extreme valued rainfall according to the climate change. Proceedings of the Korean Water Resources Association, pp.1152-1155 (권현한, 김병식, 김보경, 윤석영. 2009. 기후변화에 따른 극치강수량의 시공간적 특성 변화 분석. 한국수자원학회 학술발표대회논문집. 1152-1155쪽.).
- Lee, G.S., J.Y. Kim, S.R. Ahn and J.M. Sim. 2010. Analysis of suspended solid of Andong and Imha basin according to the climate change. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 13(1):1-15 (이근상, 김정열, 안소라, 심정민. 2010. 기후변화에 따른 안동, 임하호 유역의 부유사량 분석. 한국지리정보학회지 13(1):1-15).
- Lee, S.H., J.M. Yun, K.C. Seo, K.W. Nam and S.C. Park. 2004. A study on the urban growth model of Gimhae city using cellular automata. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 7(3):118-125 (이성호, 윤정미, 서경천, 남광우, 박상철. 2004. 셀룰라 오토마타를 이용한 김해시의 도시성장 모형에 관한 연구 -1987~2001년을 중심으로. 한국지리정보학회지 7(3):118-125).
- Lee, Y.J. and S.J. Kim. 2007. A modified CA-Markov technique for prediction of future land use change. Journal of the Korean Society of Civil Engineering 27(6D):809-817 (이용준, 김성준. 2007. 미래 토지이용변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 제안 및 적용. 대한토목학회 논문집 27(6D):809-817).
- Lim, H.J., H.J. Kwon, D.H. Bae and S.J. Kim. 2006. Analysis of hydrological impact using climate change scenarios and the CA-Markov technique on Soyanggang-dam watershed. Journal of the Korean Water Resources Association 39(5):453-466 (임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준. 2006. CA-Markov 기법을 이용한

- 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석. 한국수자원학회논문집 39(5):453-466).
- Mundia, C.N. and M. Aniya. 2006. Dynamics of landuse/cover changes and degradation of Nairobi city Kenya. Land Degradation & Development 17(1):97-108.
- Ministry of Construction & Transportation. 2000. Influential Evaluation of Water Resource Plan According to the Climate Change (건설교통부. 2000. 기후변화에 따른 수자원계획의 영향 평가).
- Park, J.H., H.H. Kwon and S.H. No. 2011. Outflow of discharge for Daechenong and Yongdam dam watershed using A1B climate change scenario based RCM and SWAT model. Journal of the Korean Water Resources Association 44(12): 929-940 (박진혁, 권현한, 노선희. 2011. A1B기후변화시나리오 기반 RCM과 SWAT 모형을 이용한 대청댐 및 용담댐 유역 유출량 전망. 한국수자원학회논문집 44(12):929-940).
- Turner, M.G. 1987. Spatial simulation of landscape change in Georgia: a comparison of three transition models. Landscape Ecology 1(1):29-36.
- Van Liew, M.W., T.L. Veith, D.D. Bosch and J.G. Arnold. 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. Journal of Hydrologic Engineering 12(2):73-189.

**KAGIS**