

# SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문 - 수질에 미치는 영향 분석

## The Analysis of Future Land Use Change Impact on Hydrology and Water Quality Using SWAT Model

박종윤\* · 이미선\*\* · 이용준\*\*\* · 김성준\*\*\*\*

Park, Jong-Yoon · Lee, Mi Seon · Lee, Yong Jun · Kim, Seong Joon

### Abstract

This study is to assess the impact of future land use change on hydrology and water quality in Gyungan-cheon watershed (255.44 km<sup>2</sup>) using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. Using the 5 past Landsat TM (1987, 1991, 1996, 2004) and ETM<sup>+</sup> (2001) satellite images, time series of land use map were prepared, and the future land uses (2030, 2060, 2090) were predicted using CA-Markov technique. The 4 years streamflow and water quality data (SS, T-N, T-P) and DEM (Digital Elevation Model), stream network, and soil information (1:25,000) were prepared. The model was calibrated for 2 years (1999 and 2000), and verified for 2 years (2001 and 2002) with averaged Nash and Sutcliffe model efficiency of 0.59 for streamflow and determination coefficient of 0.88, 0.72, 0.68 for Sediment, T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorous) respectively. The 2030, 2060 and 2090 future prediction based on 2004 values showed that the total runoff increased 1.4%, 2.0% and 2.7% for 0.6, 0.8 and 1.1 increase of watershed averaged CN value. For the future Sediment, T-N and T-P based on 2004 values, 51.4%, 5.0% and 11.7% increase in 2030, 70.5%, 8.5% and 16.7% increase in 2060, and 74.9%, 10.9% and 19.9% increase in 2090.

**Keywords :** SWAT, CA-Markov, future land use change, long-term runoff, non-point source pollution

### 요 지

본 연구에서는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 경안천 유역(255.44 km<sup>2</sup>)을 대상으로 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. Landsat TM(1987, 1991, 1996, 2004), ETM<sup>+</sup>(2001) 위성영상으로부터 시계열 토지이용도를 작성하고, CA-Markov 기법을 이용하여 2030, 2060, 2090년도의 미래 토지이용변화를 예측하였다. 모형의 입력 자료인 수문·기상자료와 지형자료(DEM, 토양도, 하천도 등), 수질자료(SS, T-N, T-P)를 구축하고 1999, 2000년 자료를 이용하여 모형의 보정을 실시하였으며, 2001, 2002년에 대하여 검증하였다. 검토 결과, 유출량에 대해 모형 효율성 계수는 0.59, 수질항목(Sediment, T-N, T-P)에 대한 결정계수는 0.88, 0.72, 0.68로 분석되었다. 미래 토지이용변화에 따른 유출량과 비점오염 부하량의 변화를 분석한 결과, 도시화가 진행되면서 2004년을 기준(76.3)으로 유역 평균 CN값이 2030년 76.9, 2060년 77.1, 2090년 77.4로 증가하면서 유출량이 1.4%, 2.0%, 2.7% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 비점오염원의 증가로 유사량과 T-N, T-P 부하량은 2004년을 기준으로 2030년 51.4%, 5.0%, 11.7% 증가하였으며, 2060년 70.5%, 8.5%, 16.7% 2090년에 74.9%, 10.9%, 19.9% 증가하는 것으로 분석되었다.

**핵심용어 :** SWAT, CA-Markov, 미래 토지이용변화, 장기유출, 비점오염원

### 1. 서 론

최근 급격한 도시화·산업화가 진행되고 인구가 증가하면서 토지이용의 변화를 가져왔다. 그로인한 도심지의 증가와 산림 및 농경지의 감소는 우수의 불투수지역 확대와 우수기능을 저하 시키며, 물순환 체계 왜곡에 따른 하천 유출량의 변화와 함께 비점오염원에 의한 수질악화 등의 문제를 야기

시킨다. 이와 같은 현상은 해당유역의 치수대책 및 하천정비 계획에 직접적인 영향을 미치게 되므로, 과거로부터 현재 그리고 미래 토지이용의 변화에 따른 하천유역의 유출특성 변화를 정량적으로 구명하여야만 효율적인 하천유역관리에 능동적으로 대처할 수 있다(이용준 등, 2007). 또한 수질악화는 많은 재원을 투자하여 하수처리장을 건설하고, 각종 수질규제를 운용하고 있음에도 불구하고 수질은 개선의 기미를

\*정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 (E-mail : bellyon@konkuk.ac.kr)

\*\*정회원 · 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 박사수료 (E-mail : misun03@konkuk.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 (E-mail : dydwms@konkuk.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 교수저자 · 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr)

보이지 않고 있다(김범철 등, 2003). 이렇게 수질이 더 이상 개선되지 않는 주원인으로서 비점오염원의 관리부재를 꼽을 수 있는데, 유출량과 비점오염 부하량은 강우시 토지이용상태에 따라 큰 영향을 받으므로 보다 정확한 토지이용상태의 파악이 중요하다.

한편, GIS(Geographic Information System)와 RS(Remote Sensing)의 발전은 그 활용범위가 확대되면서 수문모형의 필수 입력 자료인 토지이용도를 작성할 수 있게 되었고, 주기적인 데이터 획득에 의한 정보갱신과 수치화, 시계열분석에 용이하다는 장점을 이용함으로써 과거 수십년간의 인공위성 영상자료를 이용한 토지이용의 경년변화 추정이 가능하게 되었다. 이러한 위성자료는 넓은 지역을 일시에 일관되고 반복적으로 스캐닝하여 다양한 정보를 제공한다. 따라서 시간적 변화에 따른 토지이용 자료를 구축하고 토지이용의 변화 예측을 효과적으로 할 수 있을 것이다. 토지이용의 변화는 그 변화 패턴을 예측하여 여러 분야에 적용할 수 있다. 하지만 현재의 토지이용 상태를 조사하고 이를 과거의 형태와 비교하여 어떤 변화가 있었는지를 조사하기 위해서는 막대한 인력과 시간이 소요된다. 따라서 GIS와 RS 기법을 활용한 다양한 분석방법을 통해 미래의 토지이용이 지역적인 차원에서 예측되고 평가되는 시스템이 필요하다(김성준 등, 2007).

토지이용변화에 관한 국내의 연구동향을 보면, 임창호(2002)는 CA(Cellular Automata) 모형을 이용하여 토지이용 변화 예측을 연구하였다. 주용진 등(2003)은 Landsat 위성데이터를 바탕으로 Markov Chain 개념에 기초한 토지이용변화를 예측하였으며, 김성준 등(2007)은 면적규모 및 공간해상도가 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용 예측결과에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 국외에서 토지이용변화와 관련하여 Turner(1987)는 공간상의 한 셀은 인접한 토지이용의 잠재적인 영향을 받아 변화한다는 공간영향 알고리즘을 제시하였으며, Clake(1996)는 대상지역의 도시성장을 모델링하기 위해 CA 모형을 적용하였다. 또한 토지이용변화에 따른 유역의 수자원 영향평가를 위한 연구로는 김성준 등(2003)이 WMS HEC-1 수문모형을 이용하여 토지이용이 유출에 미치는 영향을 파악하기 위한 방법을 제시하였으며, 국외 연구사례로는 Fohrer 등(2002)이 GIS기반의 모델링을 통하여 경제, 사회구조의 변화로 인한 토지이용의 변화가 생태환경과 수문현상에 미치는 영향을 분석하는 등 국내외에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 본 연구에 사용된 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 국내외에서 대규모 유역의 수질 및 수문현상 뿐만 아니라 응설, 가뭄 등의 해석을 위해 적용된바 있다. SWAT 모형을 이용한 그 동안의 연구사례로는 국내에서 김남원 등(2006)이 SWAT 모형을 이용하여 충주댐 유역의 응설 영향 평가를 하였으며, 김철겸 등(2004)은 산림식생에 따른 유역의 물수지 영향 평가를 하였다. 유철상 등(2005)은 소유역의 규모와 강우계 밀도의 변화에 따른 유출의 변화양상을 분석하였다. 국외에서 Kirsch 등(2000)은 Rock River 유역에서의 SWAT 모형을 통해 침식과 인 부하량을 추정한 바 있으며, Marlos 등(2003)은 SWAT 모형을 이용하여 농업유역에서의 클로로필의 농도와

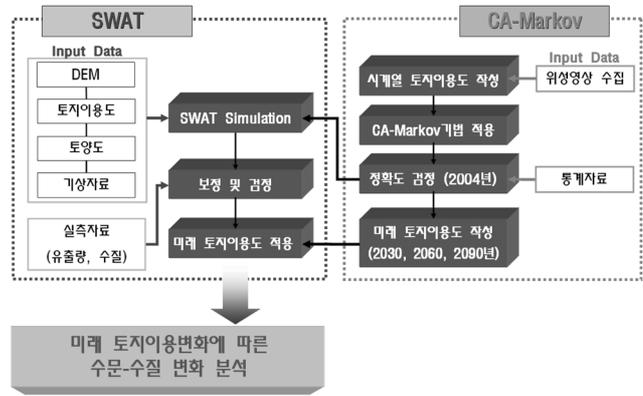


그림 1. 연구 흐름도

T-P 농도를 모의 한바 있다. 본 연구의 목적과 유사한 토지 이용변화에 따른 수문·수질영향 분석의 연구로서 이길성 등(2005)은 도시계획, 하수도계획 등의 문헌통계자료를 통하여 미래 토지이용변화를 예측하고, SWMM과 PLOAD 모형에 적용하여 유출변화 및 비점오염 부하량을 예측하였다. 임혁진(2005)은 CA-Markov 기법을 이용한 미래 토지이용변화와 기후변화 시나리오를 SLURP모형에 적용하여 수문영향을 분석하였다. Eckhardt 등(2003)은 수문현상을 모의하기 위해 토지피복도에서 추정된 불확실한 매개변수를 고려하고, SWAT 모형의 수정 버전인 SWAT-G를 적용하여 토지이용변화에 따른 유출특성을 분석하였다. Miller 등(2002)은 San Pedro 유역과 Cannonsville 유역에 과거 토지이용도의 변화를 분석하고 SWAT 모형과 KINEROS 모형에 각각 적용하여 수문에 미치는 영향을 평가하였다.

최근 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 하는데 있어 토지이용의 변화는 유역의 수문 순환 과정에 직접적인 영향을 미치므로 반드시 고려되어야 할 사항이다. 일반적으로 기후란 매일 매일 나타나는 날씨를 오랜 기간 동안 평균했을 때 나타나는 대기의 상태를 말하며 여기서 오랜 기간이란 보통 30년을 말하는데 이것은 한 세대의 활동기간을 의미하고 있다. 그러므로 기후변화에 대한 언급은 적어도 30년 이상의 자료가 있어야 비로서 의미를 가질 수 있다(김성준, 2002). 이에 본 연구에서는 미래 수자원 영향평가에 기후변화 시나리오를 적용하기 위한 선행연구로서 하천의 유출 및 비점오염 부하량에 직접적인 영향을 미치는 토지이용 정보를 이용하여 미래 토지이용의 변화가 수문·수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 현재를 기준으로 과거 30년 동안의 토지이용변화를 분석하고 향후 기후변화 시나리오 적용을 고려하여 CA-Markov 기법을 이용한 2030, 2060, 2090년의 미래 토지이용변화를 예측하였다. 예측된 미래 토지이용도는 미래 강우, 온도, 습도 등의 수문조건이 현재와 같다는 가정하에 수문·수질모의가 가능한 SWAT 모형에 적용하였다. 과거 선행연구에서는 토지이용변화에 따른 수문영향평가에 중점을 둔 반면 본 연구에서는 CA-Markov라는 수학적통계적 기법을 이용하여 미래 토지이용의 변화를 예측하고 그에 따른 하천 유출량의 변화뿐만 아니라 비점오염 부하량에 미치는 영향을 분석하는데 그 의미가 있다고 하겠다. 그림 1은 본 연구를 수행하기 위한 연구 흐름도를 나타낸 것이다.

## 2. SWAT 모형과 CA-Markov 기법

### 2.1 SWAT 모형의 개요

수문·수질모의를 위한 모형으로 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형으로 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다(Arnold 등, 1998). 이 중 수문 부모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다.

SWAT 모형으로 어떤 유형의 문제에 대해서 연구하든지, 물수지는 유역내에서 발생하는 모든 것 중에서 중요한 요소이다. 유사 또는 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위해서는 모형에 의해 모의되는 수문순환이 유역내에서 발생하는 일들과 일치하여야 한다. 모형에서 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

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

여기서,  $SW_t$ 는 최종의 토양수분량(mm),  $SW_0$ 은  $i$ 일의 초기 토양수분량(mm),  $t$ 는 시간(일),  $R_{day}$ 는  $i$ 일의 강수량(mm),  $Q_{surf}$ 는  $i$ 일의 지표유출량(mm),  $E_a$ 는  $i$ 일의 증발산량(mm),  $w_{seep}$ 는  $i$ 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm),  $Q_{gw}$ 는  $i$ 일의 회귀수량(mm)이다.

SWAT 모형에서 강우와 유출에 의한 침식은 수정범용토양유실공식(MUSLE: Modified Universal Soil Loss Equation, Williams, 1975)에 의해 계산된다. MUSLE는 Wischmeier와 Smith(1965, 1978)에 의해 개발된 범용토양유실공식(USLE: Universal Soil Loss Equation)의 수정 버전이다. USLE에서는 강우에너지의 함수로서, 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체된다. 이로서 유사량 예측을 개선하고, 운송비가 불필요하게 되며, 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능해진다. 수정범용토양유실공식(Williams, 1995)은 다음 식 (2)와 같다.

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFRG \quad (2)$$

여기서,  $sed$ 는 주어진 날의 유사량(ton),  $Q_{surf}$ 는 지표유출량(mm/ha),  $q_{peak}$ 는 첨두유출율( $m^3/s$ ),  $area_{hru}$ 는 HRU 면적(ha),  $K$ 는 USLE 토양침식성인자,  $C$ 는 USLE 피복 및 관리인자,  $P$ 는 USLE 관행인자,  $LS$ 는 USLE 지형인자,  $CFRG$ 는 조립과편인자이다.

### 2.2 CA-Markov 기법

CA-Markov 기법은 Markov Chain 모델과 Cellular Automata (CA)의 이론적 체계가 결합한 수학적계기법이다. 먼저, Markov Chain 모델은 어떤 변수들이 가지고 있는 과거의 동적 특성을 분석함으로써 그 변수들의 미래에 있을 변화를 연속적으로 예측하기 위한 수학적 기법이다. Markov 분석은 바로 이전 단계의 시스템 상태에 의해서만 현재의 시스템 상태가 영향을 받고 그 이전의 상태에 의해서는 전혀 영향을 받지 않는 Markov Chain이라는 확률과정을 가정한다. 여기서, 시간적인 개념을 포함하는 임의 사상의 행렬에 대하여 확률적 분석이 가능할 때 각 사상의 확률 변수열( $X_t$ )를 추계확률과정(Stochastic Process)이라한다. Markov Process에 의한 확률과정은 확률변수  $X_t(t=1, 2, \dots)$ 가 어느 순간  $t$ 에서 상태(state)의 집합( $S_1, S_2, \dots, S_k$ ) 중에 하나로 실현된다면 상태  $S_i$ 에서  $S_j$ 로 옮겨갈 확률 즉, 시스템간의 이동 확률을 의미하는 전이확률(Transition Probability)  $P_{ij}$ 가 그 직전의 상태  $S_i$ 에만 관계되고 더 이전의 상태에는 관계가 없을 때의 확률과정을 의미한다.

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P\{X_n = S_j | X_{n-1} = S_i\} \\ &= P\{X_n = S_j | X_{n-1} = S_j\} \end{aligned} \quad (2)$$

다음 추이 확률  $P_{ij}$ 의 전이행렬(transition matrix)을  $P$ 라 하면,

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1k} \\ P_{21} & & \dots & P_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{k1} & P_{k2} & \dots & P_{kk} \end{pmatrix} \quad (3)$$

인 정방행렬로 나타나며 여기서,  $\sum_{j=0}^k P_{ij} = 1$  ( $0 \leq P_{ij} \leq 1$ )로 수렴한다.

또한 Markov Chain 모델은 수치영상 또는 격자 기반의 GIS 데이터로부터 쉽게 계산되며, 현재 토지이용의 변화된 경향을 잘 반영하는 장점을 가지고 있지만, 시간이 변하더라도 전이 확률은 항상 일정하고 모든 위치에 동일하게 적용되는 것을 기본 가정으로 하기 때문에 실제적인 토지 피복 변화의 경향을 나타내기 힘들다. 따라서, 시계열 공간자료를 모의함에 있어 일정한 간격의 추이경향을 가지는 자료의 변화만을 고려하게 되면 급격한 변화폭을 가지는 공간자료의 처리에는 어려움이 따른다.

이런 단점은 Cellular Automata 기법을 사용하여 보완할 수 있다. CA는 비선형 동적 모형으로써 복잡계의 특성을 분석하거나 모의하기 위해 1963년 John von Neuman과 Stanislaw Ulam의 해 'Cellular Space'로 소개된 이론적 체계이다. 그 이후 CA는 물리학, 화학, 생물학, 수학, 컴퓨터 공학 등을 포함한 여러 자연과학 및 공학 분야에서 다양한 동

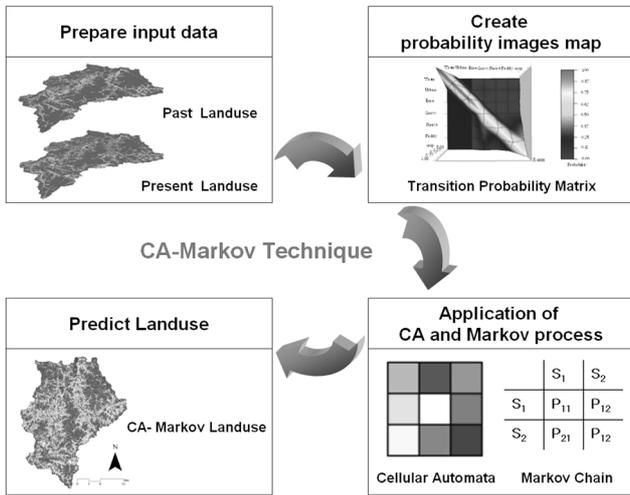


그림 2. CA-Markov 모식도

적 현상들을 연구하는데 사용되어 왔다. GIS 분야에서는 CA와 GIS를 이용한 도시성장 예측 모델 개발과 적용에 많은 활용이 되고 있다. CA는 이산적인 시공간(Discrete Time and Space)에 기반한 비선형 동적 모델 혹은 시스템으로 정의된다(Gutowitz, 1991).

CA는 위의 가정을 토대로 시계열 공간자료의 변화양상을 인접한 격자 거리, 방향에 의해 공통적으로 적용시킴으로써 지역적인 인접격자의 상태를 지속적으로 변화시킨다. 인접격자는 중심셀(Focus Cell) 주위에 인접하고 있는 격자들의 집합을 말하는데 보통 거리, 방향 혹은 각도에 의해 결정된다. 변화규칙은 각각의 셀이 시기별로 어떻게 변화할 지를 규정하는데 여기에는 인접격자들의 구성과 위치가 정의되어 있다. 변화된 인접격자의 상태는 시공간상에서 반복적으로 실행되어 복잡한 특성과 형태를 분석 및 모의할 수 있으며 변화규칙은 모든 격자에 동일하게 적용되는 공통규칙으로 지역적인 특성을 지니고 있으며 CA에서 가장 중요한 요소이다(이용준 등, 2007).

그림 2는 CA-Markov 기법의 모의과정을 모식화 한 것으로 과거와 현재의 토지이용도를 이용하여 학률 이미지 맵과 전이행렬을 작성하고 Markov Chain과 CA 기법에 적용함으로써 토지이용도를 예측할 수 있다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 대상유역 및 수문·수질자료

본 연구에서는 팔당호 유입하천인 경안천의 경안 수위관측소를 유출구로 하는 상류유역을 대상유역으로 선정하였다(그림 3). 유역면적은 약 255.44 km<sup>2</sup>이며, 연 평균 강우량은 1,200.5 mm이고 연 평균 기온은 10.9°C로 우리나라의 평균적인 기후 특성을 나타내고 있다. 행정구역상으로는 경기도 광주시와 용인시에 속하며, 유역 내 상수원 보호구역이 위치하고 있어 최근 도시화에 따른 유역의 수문·수질 변화에 대한 관심이 높은 지역이다.

모형의 입력자료가 되는 기상자료는 수원, 양평, 이천 기상관측소의 자료를 구축하였다. 모형의 보정을 위해 국가수자원관리종합정보시스템(WATER Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 수위관측지점의 수위-유량

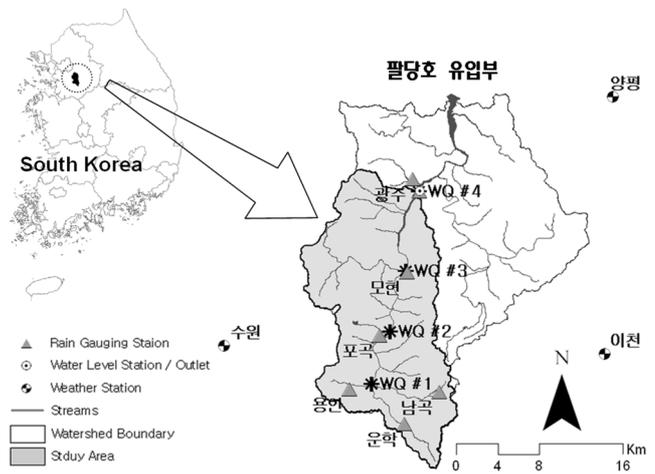


그림 3. 경안천유역 수문·수질 및 기상 관측망

표 1. 수문·수질 및 기상자료

자료종류		자료형태	출처
수문	유출량	일 유출량 (m <sup>3</sup> /sec)	WAMIS
	강수량	일 강수량 (mm)	WAMIS
기상	온도	일 최고·최저 기온 (°C)	기상청
	태양복사량	일 태양복사량 (MJ/m <sup>2</sup> )	
	풍속	일 평균풍속 (m/sec)	
	상대습도	일 평균 상대습도 (%)	
수질	유사량	월 평균 유사량 (tons/ha)	환경부
	총질소	월 평균 총질소 부하량 (kg/ha)	
	총인	월 평균 총인 부하량 (kg/ha)	

관계곡선식을 이용하여 수위자료를 유량자료로 환산하여 사용하였다. 수질자료는 유역내 수질측정지점에서의 월 평균 부유물질(Suspended Solids, SS) 및 총인(Total Phosphorus, T-P), 총질소(Total Nitrogen, T-N)의 농도자료를 월 평균 유출량에 곱하여 비점오염 부하량 자료를 구축하였다. 자료 구축기간은 1995~2006년까지이며, 표 1은 구축한 자료의 종류와 형태를 정리한 것이다.

#### 3.2 미래 토지이용도 작성

시공간적으로 토지이용변화를 살펴보고자 1987, 1991, 1996, 2001, 2004년의 계절적으로 비슷한 Landsat TM, ETM<sup>+</sup> 영상을 선정하여 시간적 변화에 따른 경안천 유역의 토지피복도를 작성하였다. 분류항목으로는 수역, 주거지, 나지, 초지, 산림, 논, 밭 등 모두 7개의 항목으로 분류하였고 감독분류 방법 중 각 분류항목의 평균과 공분산을 이용하는 최대우도방법(Maximum Likelihood Classification)을 적용하여 토지피복도를 작성하였다. 분류정확도 검증을 위하여 위성영상 자료의 분류결과를 객관적이고 정확하게 평가하는 방법 중 하나인 오차행렬(Error Matrix)을 이용하였으며 그 결과 92.1~98.0%의 높은 정확도를 보였고, 광주시 행정구역별 지적통계자료와 비교를 함으로써 2차 검증을 실시하였다.

토지피복분류 결과를 이용하여 토지이용항목의 경년별 변화 추세를 분석한 결과는 다음과 같다. 먼저, 산림은 1987년 369.79 km<sup>2</sup>에서 2004년 345.77 km<sup>2</sup>로 24.02 km<sup>2</sup> 감소하였으며, 논은 1987년에 90.79 km<sup>2</sup>에서 2004년에는 47.30



그림 4. CA-Markov 검증 흐름도

표 2. 토지피복분류결과와 CA-Markov 기법의 비교

분류 항목	면적 비교 (km <sup>2</sup> )		
	2004년도	CA-Markov (2004)	절대오차
수역 (Water)	3.64	1.54	2.10 (▽)
주거지 (Urban)	21.78	20.00	1.78 (▽)
나지 (Bare field)	37.77	30.21	7.56 (▽)
초지 (Grassland)	41.19	37.47	3.72 (▽)
산림 (Forest)	345.77	365.48	19.71 (▲)
논 (Paddy field)	47.30	48.40	1.10 (▲)
밭 (Upland crop)	63.67	58.02	5.65 (▽)
합계	561.12	561.12	-

km<sup>2</sup>로 43.49 km<sup>2</sup> 감소하였다. 반면에, 밭의 경우 1987년에 45.71 km<sup>2</sup>에서 2004년에는 63.67 km<sup>2</sup>로 17.96 km<sup>2</sup> 증가하였다. 주거지와 나지는 1987년 12.68 km<sup>2</sup>와 4.28 km<sup>2</sup>에서 2004년 21.783 km<sup>2</sup>와 37.77 km<sup>2</sup>로 각각 9.10 km<sup>2</sup>, 33.49 km<sup>2</sup> 증가하는 것으로 분석되었으며 초지의 경우 1980년을 기점으로 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 훈련지역 선정 시 지형도 상의 골프장을 중심으로 실시하였으므로 1980년 이후 골프장이 증가했음을 알 수 있었다.

예측 모형은 과거의 통계적 성장 패턴과 일치 시킬 수 있어야 하며 추정치가 현실을 반영 할 수 있어야 한다(Clarke, 1997). 이에 본 연구에서는 미래 토지이용도 작성에 앞서 CA-Markov 기법에 대한 검증을 실시하였다. 그림 4는 CA-Markov 검증 흐름도를 나타낸 것으로 기 구축된 1996, 2001년의 토지이용도를 이용하여 CA-Markov 기법에 적용, 2004년도 토지이용도를 예측하고 이를 실제 분류한 2004년도 토지이용도와 비교 하였다. 검증결과, 표 2와 같이 CA-Markov 기법에 의해 추정된 토지 이용도는 실제 2004년도 토지이용도와 유사함을 알 수 있었다. 2004년 토지이용도 추정을 위해 1996년과 2001년의 토지이용도를 선택한 것은 토지이용의 변화 양상을 5년 단위로 모의하기 위하여 5년 단위에 가장 근접한 년도를 선택한 것이다.

미래 토지이용도 작성은 CA-Markov 기법을 이용하여 2030, 2060, 2090년에 해당하는 Grid 형식의 30m × 30m 토지이용도를 작성하였다(그림 5). 표 3은 토지이용도의 시간적 변화에 따른 분류항목 별 면적변화를 나타낸 것으로 산림의 경우, 2090년에 약 296.12 km<sup>2</sup>로 줄어드는 것으로 예측되었다. 주거지와 나지의 경우는 1987년부터 계속해서 증가되는 경향을 보였으며, 초지는 골프장 개발 등으로 인하여 48.97 km<sup>2</sup>로 증가 하였다. 논과 밭의 경우 추이변화는 약간 증가한 후 수렴되었는데, 이는 논과 밭의 분포가 수계와 산림에 인접하는 공간 특성을 가짐으로 보인다.

### 3.3 GIS자료 구축

토지이용의 변화에 따른 강우-유출 관계를 해석하기 위해서는 해당유역의 지형특성, 토양 및 토지이용의 공간적 분포 등을 고려해야 한다(김성준 등, 2003). 따라서, GIS를 이용

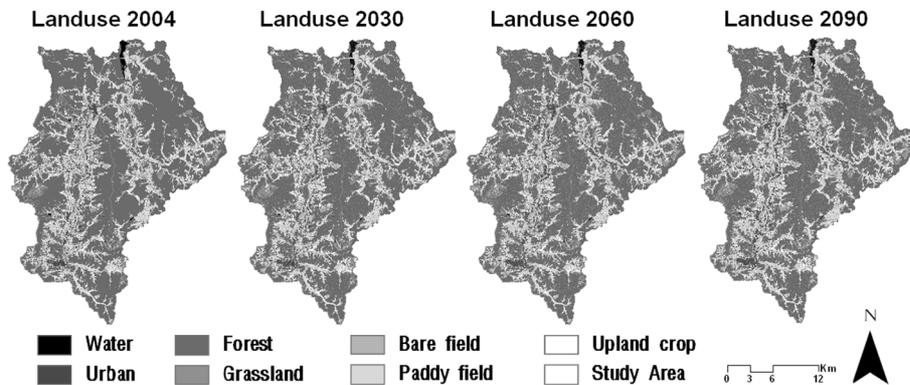


그림 5. CA-Markov 기법을 이용한 토지이용 분류항목 별 면적변화

표 3. 토지이용변화에 따른 토지이용 분류항목 별 면적변화

분류 항목	면적 변화 (km <sup>2</sup> )							
	1987년	1991년	1996년	2001년	2004년	2030년	2060년	2090년
수역 (Water)	3.72	3.93	4.89	2.26	3.64	2.40	2.52	2.41
주거지 (Urban)	12.68	17.51	17.85	19.99	21.78	31.48	35.88	37.88
나지 (Bare field)	4.28	29.89	28.07	28.86	37.77	41.71	44.58	44.96
초지 (Grassland)	34.15	23.02	10.82	25.86	41.19	43.04	44.10	48.97
산림 (Forest)	369.79	363.19	367.60	373.63	345.77	319.07	310.12	296.12
논 (Paddy field)	90.79	74.88	76.04	60.08	47.30	52.74	53.30	56.39
밭 (Upland crop)	45.71	48.70	55.85	51.44	63.67	70.68	70.62	74.39
합계	561.12	561.12	561.12	561.12	561.12	561.12	561.12	561.12

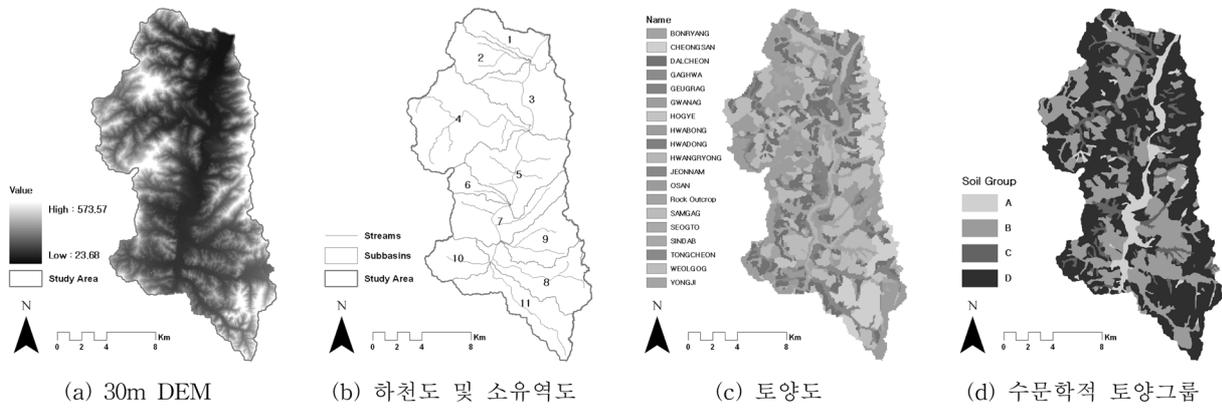


그림 6. GIS 입력자료

한 지형자료의 구축은 모의결과에 큰 영향을 미치므로 보다 정확한 자료구축이 필요하다. SWAT 모형의 기본 지형입력 자료 구축을 위하여 NGIS의 1:5,000 수치지도로부터 격자 크기 30 m의 DEM(Digital Elevation Model)을 제작하였다(그림 6a). DEM은 흐름방향, 흐름합산 등의 지형 전처리 과정을 수행하는데 중요한 입력자료로서 함몰부 보간(Fill Sink) 등의 검수과정을 통한 DEM 제작이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 자동경계추출(Automatic Delineation)모듈에서 DEM을 입력자료로 하여 지형전처리 과정을 수행하고 하천 및 유역경계 추출은 시행착오법을 통해 기존 하천을 최적으로 표현하는 임계면적(Threshold Area)을 300ha로 설정하여 11개의 소유역으로 구분하였다(그림 6b).

SWAT 모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모형이므로 토양층 자료를 구축하는 것이 핵심이다(김남원 등, 2006). 이를 위해 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도(그림 6c)를 기준으로 유역내 총 19개의 토양층에 대한 수문학적 토양그룹(A, B, C, D)의 분류(그림 6d)와 토양층의 개수 및 토양층별 깊이를 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였다. 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 Saxton 등(1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다. HRU 생성을 위한 토지이용과 토양의 면적 비율을 8%:8%로 설정하여 총 196개의 HRU로 구분하였다.

#### 4. 모형의 보정 및 검증

토지이용변화에 따른 수문·수질 분석을 위해서는 특정 시점에 해당하는 기준이 필요하다. 본 연구에서는 현재 시점에

해당하는 2004년을 기준년으로 선정하였다. 장기유출 및 수질모의를 위한 모의기간은 1995~2006년으로 설정하였으며, 모형의 적용에 있어 지표 유출은 SCS 유출곡선법, 증발산량 산정은 Penman-Monteith 방법, 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였다.

##### 4.1 유출 매개변수 선정 및 보정

매개변수 추정을 위하여 SWAT User's Manual Version 2000의 Input Type별 매개변수를 정리하여, Surface flow와 Base flow를 기준으로 총유출량 및 침투유량과 감수곡선(Recession) 형태에 영향을 미치는 매개변수를 선정하고 민감도 분석에 따른 최적의 유출관련 매개변수 7개를 선정하였다. 지표수흐름관련 매개변수로는 CN<sub>2</sub>, ESCO, SOL\_AWC 순으로 민감하게 반응하였고, 지하수흐름은 GWQMN, GW\_REVAP, REVAPMN 순으로 나타났다. 감수곡선 매개변수로는 ALPHA\_BF가 가장 민감하였으며, 표 4는 유출에 민감한 매개변수와 사용된 보정값을 정리한 것이다.

장기유출모형은 특성상 구동 초기를 모형의 안정화기간으로 보고, 분석에는 그 결과값을 사용하지 않는다(정재운, 2005). 따라서 본 연구에서는 1995~1996년을 모형의 안정화기간으로 설정하였다. 보정기간은 실측자료의 수문곡선 및 유출률을 고려하여 실측자료가 비교적 양호하다고 판단되는 1999, 2000년을 선정하였고, 검증은 2001, 2002년 자료를 사용하였다. 보정방법은 SWAT에서 제공하는 Calibration Tool을 이용하여, 보정기간동안 유역 출구점에서의 실측 유출량 자료와 비교를 통해 총유출량을 먼저 보정한 후, 지표 유출과 기저유출을 보정하였다. 보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수(R<sup>2</sup>)와 평균제곱

표 4. 유출관련 매개변수 및 보정값

Input file	Parameter	Definition	Calibrated Value	Range	
				min.	max.
*.mgt	CN2	SCS curve number	▲ 8	35	98
*.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur	2500	0	5000
	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.2	0.02	0.2
	REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur	400	0	500
	ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0.5	0	1
*.sol	SOL_AWC	Available water capacity of the soil	▽ 0.05	0	1
*.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	1	0	1

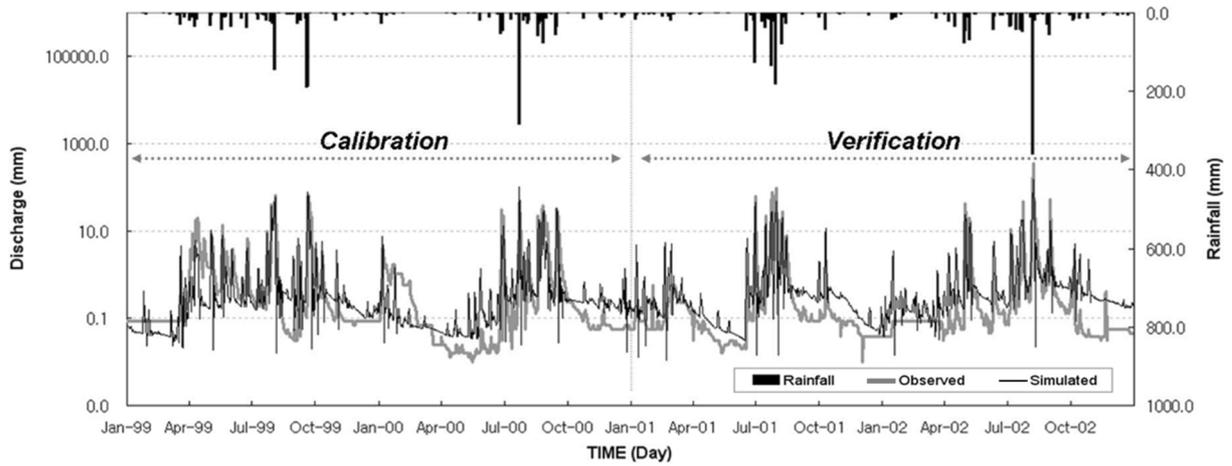


그림 7. 보정 및 검증기간동안의 실측치와 모의치의 수문곡선 비교 (1999~2002)

표 5. 유출 모의에 따른 보정 및 검증 결과

Period	Year	Rainfall (mm)	Discharge (mm)		Runoff Ratio (%)		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	ME
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
Calibration	1999	1296.8	781.40	637.99	60	49	0.73	2.24	0.72
	2000	1108.0	617.37	559.86	56	51	0.59	2.59	0.36
Verification	2001	1118.1	677.36	543.17	61	49	0.73	3.35	0.63
	2002	1463.5	930.63	801.44	64	55	0.71	7.10	0.63
Average		1246.6	751.69	635.62	60	51	0.69	3.82	0.59

근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였으며, 모형의 효율성 검증은 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 모형효율성계수(Model Efficient, ME)를 사용하였다. 표 5는 보정 및 검증결과를 표로 나타낸 것으로, 보정기간(1999~2000년)동안의 총 강우량 2404.8 mm에 대하여 실측치와 모의치의 유출량은 200.9 mm, 유출률은 약 8%의 차이를 보였으며, RMSE는 2.24~2.59(mm/day), R<sup>2</sup>는 0.59~0.73, ME는 0.36~0.72로 모의치와 실측치의 유출량은 유의성이 있는

것으로 나타났다. 검증기간(2001~2002년)동안 전체적인 통계치와 수문곡선의 유출경향을 분석한 결과 또한 비교적 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그림 7은 보정 및 검증기간동안의 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교한 결과이다.

#### 4.2 수질 매개변수 선정 및 보정

SWAT 모형에서 영양물질은 유사량의 이동과 유출에 의해

표 6. 수질관련 매개변수 선정 및 보정값

Input file	Parameter	Definition	Calibrated Value	Range	
				min.	max.
*.mgt	USLE_P	Support practice factor	4	-5	5
	USLE_C	USLE C factor	0.45	0.001	0.5
*.hru	SLSUBBSN	Average slope length (m)	145	10	150
	SLOPE	Average slope steepness (m/m)	0.3	0.0001	0.6
	BIOMIX	Biological mixing efficiency	0.9	0	1
*.chm	SOL_ORGN	Initial soil organic N concentration(ppm)	0.01	0	10000
	SOL_NO3	Initial soil NO <sub>3</sub> concentration (ppm)	0.0001	0	5
*.bsn	NPERCO	Nitrogen Percolation coefficient	0.0001	0	1
*.swq	BC3	Rate constant for N hydrolysis at 20°C	0.2	0.2	0.4
	RS3	Benthic source rate for NH <sub>4</sub> -N in the reach	1	0	1
	RS4	Rate coefficient for organic N setting in the reach	0.1	0.001	0.1
*.hru	ERORGN	Organic N enrichment for sediment	0.1	0	5
*.swq	BC4	Rate constant for P mineralization at 20°C	0.01	0.01	0.7
	RS2	Benthic source rate for dissolved phosphorus	0.1	0.001	0.1
	RS5	Organic P setting rate	0.1	0.001	0.1
*.hru	ERORGP	P enrichment ratio with sediment loading	1	0	5

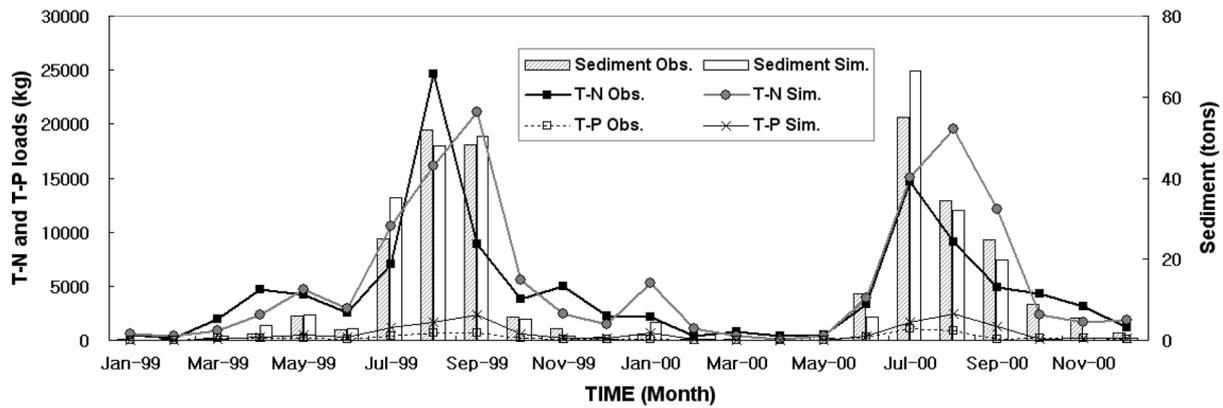


그림 8. 보정기간 동안의 실측치와 모의치의 유사량 및 T-N, T-P 부하량 비교

표 7. 수질 모의에 따른 보정 및 검증 결과

Year	Flow (cms)	Sediment		T-N		T-P		R <sup>2</sup>			RMSE (tons/year)		
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Sed	T-N	T-P	Sed	T-N	T-P
1999	74.21	145.6	153.9	65.8	69.2	2.79	7.34	0.97	0.55	0.93	3.30	4.57	0.63
2000	64.52	144.5	130.8	44.8	63.8	2.90	7.01	0.95	0.72	0.70	4.98	3.85	0.61
2001	59.35	90.7	75.5	36.2	60.9	2.66	6.65	0.64	0.72	0.63	0.03	5.16	0.69
2002	83.96	134.6	236.3	67.3	78.8	2.22	8.15	0.95	0.89	0.44	0.01	3.60	0.88
Avg.	70.51	128.9	149.1	53.5	68.2	2.64	7.29	0.88	0.72	0.68	2.08	4.30	0.70

Unit: tons/yr  
Sed: Sediment

영향을 받기 때문에 영양물질에 대한 보정을 하기 앞서 유사량에 대한 보정을 실시하였다.

유사량 및 T-N, T-P 부하량 보정을 위해 관련 매개변수를 선정하고 민감도 분석을 실시하여, 표 6과 같이 수질 항목별 최적의 매개변수를 선정하였다. 강우에 의한 수중부유물질은 주로 유역내에서 유출된 토사가 대부분이다. 따라서 유사량에 대한 보정은 토양침식 관련 매개변수인 USLE\_C, USLE\_P, SLOPE 등을 조정하여, 유역 출구점(WQ #4)의 월 평균 SS (mg/L) 농도자료를 이용하여 보정하였다. 유사량 보정 후, 월 평균 T-N (mg/L), T-P (mg/L) 농도자료를 이용하여 영양물질에 대한 부하량 보정을 실시하였으며 보정 매개변수로는 SOL\_ORGN과 ERORGP가 가장 민감한 것으로 분석되었다.

그림 8은 보정결과에 따른 실측치와 모의치의 유사량 및 T-N, T-P 부하량을 비교한 것으로 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한 것으로 분석되었다. 표 7은 수질모의에 따른 유사량 및 T-N, T-P 보정 및 검증 결과를 정리한 것으로 유사량은 결정계수가 0.64~0.97로 높은 상관성을 보였다. 영양물질은 결정계수가 0.44~0.93의 상관성을 보이며 모의치가 다소 높게 평가되었는데, 이는 SWAT 모형에서 유사량 모의 시 사용되는 USLE식에 입력변수와 작물 시비량 등의 조건이 우리나라 실정과는 다르기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 미래 토지이용변화에 따른 수문-수질 변화 분석

### 5.1 미래 수문변화 분석

미래 수문변화 분석에 앞서, 토지이용변화에 따라 유출량에 큰 영향을 미치는 CN값의 변화를 분석하였다. AMC-조

건에서의 CN분포도를 작성한 결과, 도시화에 따른 도심지주거지 및 나지의 확장과 산림의 감소로 인해 유역평균 CN값이 2004년 76.3에서 2030년 76.9, 2060년 77.1, 2090년 77.4로 증가하였다. 또한 본 연구에서는 수문과 수질에 영향을 미치는 불투수 면적(Impervious Area)을 도심지와 나지에 대하여 고려하고, 그 변화를 살펴보았다. 경안천 전체유역에 대해 2004년 불투수 면적은 59.55 km<sup>2</sup>로 전체 면적에 10.6%를 차지하였으나, 2030년 73.19 km<sup>2</sup> (13.0%), 2060년 80.46 km<sup>2</sup> (14.3%), 2090년 82.84 km<sup>2</sup> (14.8%)로 증가하는 것으로 나타났다.

기준년도(2004년)의 1999~2002년까지의 수문 모의결과를 토대로 미래의 강우, 온도, 습도 등의 기상조건이 현재와 같다는 가정하에 미래의 기상조건을 기준년도와 동일하게 입력하고 DEM, 토양도 등의 모형의 모든 입력자료 및 모의방법을 동일하게 설정한 상태에서 2030, 2060, 2090년도의 미래 토지이용변화에 따라 유역 출구점(WQ #4)에서의 일 유출량 및 유출률을 비교 하였다. 표 8은 유출량 및 유출률 변화결과를 정리한 것으로 유역 평균 CN값의 증가로 총 유출량의 평균이 2004년을 기준으로 635.62 mm에서 2030년 644.60 mm로 1.4% 증가하였고, 2060년과 2090년에 각각 0.6%와 0.7%의 증가율을 보이며 648.30 mm, 652.74 mm로 2.0%, 2.7% 증가하는 것으로 분석되었다.

### 5.2 미래 수질변화 분석

미래 도심지 증가에 따른 주거 및 상업지역에서 강우유출수와 오염물질 배출특성을 살펴보면, 해당지역의 인구밀도 및 경제활동 정도에 따라 다양하나 대부분의 도시지역은 주차장과 도로 등의 불투수면적의 증가로 강우에 대한 유출

표 8. 미래 토지이용변화에 따른 유출량 및 유출률의 변화

Year	Rainfall (mm)	Landuse 2004		Landuse 2030		Landuse 2060		Landuse 2090	
		Runoff (mm)	Runoff Ratio (%)						
1999	1296.8	637.99	49	648.10	50	652.24	51	656.91	51
2000	1108.0	559.86	51	569.06	51	572.45	52	577.51	52
2001	1118.1	543.17	49	550.95	49	554.25	50	558.28	50
2002	1463.5	801.44	55	810.30	55	814.25	56	818.26	56
Avg.	1246.6	635.62	51	644.60	51	648.30	52	652.74	52

표 9. 미래 토지이용변화에 따른 유사량 및 T-N, T-P 부하량

Year	Flow (cms)	Landuse 2004			Landuse 2030			Landuse 2060			Landuse 2090		
		Sed	T-N	T-P									
1999	74.21	153.8	69.2	7.3	233.1	71.8	8.1	261.4	73.7	8.5	266.5	75.1	8.7
2000	64.52	130.8	63.8	7.0	209.0	67.8	7.9	238.0	70.7	8.3	249.1	72.1	8.5
2001	59.35	75.5	61.0	6.6	128.1	64.6	7.5	150.1	67.0	7.8	153.7	68.8	8.1
2002	83.96	236.3	78.8	8.1	332.8	82.0	9.0	367.2	84.4	9.3	373.7	86.6	9.6
Avg.	70.51	149.1	68.2	7.3	225.7	71.5	8.1	254.2	73.9	8.5	260.7	75.6	8.7

Unit: tons/yr  
Sed: Sediment

및 유량과 수질농도의 변화가 빠르게 나타난다. 특히 도시지역은 오염물질이 강우초기에 일시에 배출되는 초기유출(First flush)현상이 두드러져, 우수에 의한 첨두유출(Peak flow)에 앞서 최대 오염유출이 발생하여 하천에 큰 영향을 미친다. 도시지역 비점오염원으로 큰 역할을 하는 것은 가로상에 축적되는 각종 오염퇴적물과 하상 퇴적물이며 이들 퇴적물은 유기성 부유오니, 기름, 중금속, 각종 도시폐기물, 점토, 모래, 자갈 등으로 이루어져 있다. 또한 대기중 오염물질의 건식 강하물과 강우에 포함되어 내리는 습식 강하물도 도시지역의 비점오염원이 되고 있다(한국환경정책·평가연구원, 2002). SWAT 모형에서는 도심지에서의 불투수층에 대해 축적(Build up)과 쓸림(Washoff) 기능을 이용하여 지표유출에 의한 오염 부하량을 계산한다.

미래 도심지 증가에 따른 수질변화 분석은 수문변화 분석과 같은 방법으로 기준년도(2004)의 모든 입력조건 및 모의 방법을 동일하게 설정한 상태에서 기준년도의 월 평균 수질 결과와 미래 수질 모의결과(Sediment, T-N, T-P)를 비교하였다(표 9). 그 결과, 2004년도의 토지이용도를 적용하여 1999~2002년까지 발생한 총 유사량의 평균은 149.1 tons 이었으나, 2030년 225.7 tons으로 51.4% 증가하였고, 2060년 254.15 tons으로 70.5%, 2090년 260.7 tons으로 74.9%, 약 1.8배 증가하는 것으로 분석되었다. 한편, 유사량이 증가함에 따라 T-N, T-P 부하량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 기준년도의 1999~2002년까지 발생한 T-N, T-P 총 부하량 평균은 68.2 tons, 7.3 tons으로 2030년 71.5 tons와 8.41 tons으로 각각 5.0%, 11.7% 증가하였고 2060년 73.9 tons, 8.5 tons으로 8.5%, 16.7% 2090년 75.6 tons, 8.7 tons으로 10.9%, 19.9% 증가하는 것으로 분석되었다.

도심지의 증가는 오염 퇴적물의 증가와 불투수층의 지표유출 증가로 인한 오염물질 유출량의 증가를 초래하였다. 특히, 2030년(2004년 기준) 도심지의 급격한 증가(44.5%)로 인한

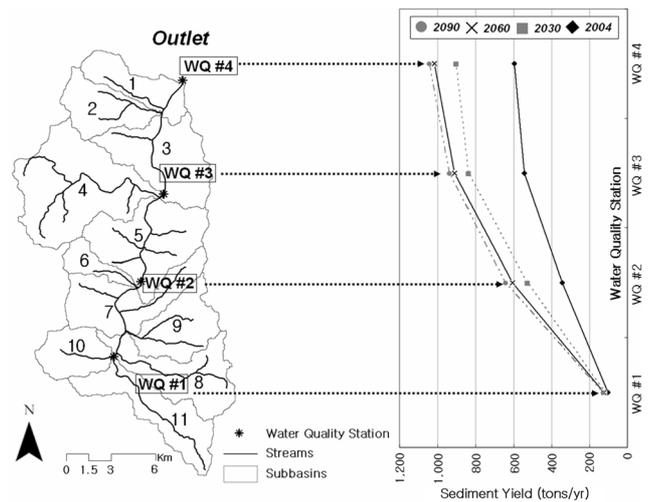


그림 9. 하천흐름에 따른 유사량 변화

오염 퇴적물의 증가와 나지의 증가(10.43%) 및 지표유출의 증가(0.67%)는 2060년(2030년 기준)과 2090년(2060년 기준) 도심지의 증가(14.0%, 5.6%)와 나지의 증가(6.9%, 0.9%) 및 지표유출의 증가(0.19%, 0.23%)에 비해 상대적으로 수질 오염 증가 폭이 큰 것으로 분석되었다. 또한 CA-Markov 기법에 의해 예측된 미래 토지이용도는 도시화로 인해 산림이 그 주변의 토지이용에 영향을 받아 논과 밭으로 변화함에 따라 과거 농경지 감소추세에서 증가추세로 변화하였다. 따라서 2030, 2060, 2090년 논(11.5%, 1.1%, 5.8%)과 밭(6.0%, -0.1%, 5.3%)의 증가는 강우에 의한 토양침식관련 MUSLE식의 C, P 변수의 영향으로 유사량과 T-N, T-P 부하량이 증가한 것으로 분석되었다.

유역 상류부에서 유역 출구점까지의 하천흐름에 따른 소유역별 비점오염 부하량의 변화 형태를 알아보기 위하여, 4개의 수질 관측지점(WQ #1, 2, 3, 4)으로부터 미래 유사량의

증가 추세를 살펴보았다. 그 결과, WQ #1 지점의 상류유역에서 내려오는 유사량의 변화는 작았지만, 6, 7, 8, 9번 소유역을 포함하는 WQ #2 지점에서 큰 폭의 증가량을 보이며, 하류로 갈수록 점차 증가하는 것을 알 수 있었다(그림 9). 이는 WQ #2지점의 소유역이 다른 소유역에 비해 도시화에 따른 토지이용의 변화가 컸기 때문에 비점오염원이 증가함에 따라 유사량 및 T-N, T-P 부하량 또한 높게 발생하는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 과거 꾸준한 토지이용의 변화가 이루어진 경안천 유역을 대상으로 과거 20여년 간의 토지피복도 분석 결과와 구축된 수문기상자료 및 GIS자료(DEM, 하천도, 토양도 등)를 기반으로 SWAT모형과 CA-Markov 기법을 이용하여 미래 토지이용의 변화가 하천유출 특성 및 수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Landsat TM, ETM<sup>+</sup> 시계열 위성영상을 선정하고 토지피복도를 작성하였다. 미래 토지이용변화를 예측하기 앞서, CA-Markov 기법에 대한 검증을 실시하였다. 실제 작성한 2004년도 토지이용도와 과거 토지이용도를 CA-Markov 기법에 적용하여 예측된 2004년도 토지이용도를 비교 분석한 결과, 추이변화의 경향이 잘 나타나는 것으로 분석되었다. CA-Markov 기법을 적용하여 작성한 2030, 2060, 2090년의 토지이용변화는 일정시간이 경과됨에 따라 추이변화는 수렴되었으며, 2004년을 기준으로 도시화에 따른 산림의 감소(-49.65 km<sup>2</sup>/2090년)와 주거지(+16.10 km<sup>2</sup>/2090년) 및 나지(+7.19 km<sup>2</sup>/2090년)의 증가가 뚜렷하게 나타났다.
2. 경안천 수위관측소를 유역 출구점으로 하여 수문(유출량) 및 수질(SS, T-N, T-P) 실측자료를 구축하고, 1999~2002년까지 모형의 보정 및 검증을 통해 모형의 적용성을 평가하였다. 그 결과, 총 유출량에 대한 모형 효율성 계수는 0.59, 결정계수가 0.69로 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 분석되었으며, 수질항목(Sediment, T-N, T-P)에 대한 결정계수는 0.88, 0.72, 0.68로 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다.
3. 미래 토지이용변화에 따른 수문분석 결과, 기준년도(2004년)에 비해 도심지의 증가와 산림의 감소, 우수의 불투수지역 확대 등의 토지피복 변화에 따라 불투수면적은 2004년을 기준으로 전체 면적의 10.6%를 차지하였으나, 2030년 13.0%, 2060년 14.3%, 2090년 14.8%로 증가하였다. 또한 유역 평균 CN값이 2004년 76.3에서 76.9, 77.1, 77.4로 점차 증가함에 따라 총 유출량이 2030년 1.4%, 2060년 2.0%, 2090년 2.7% 증가하는 것으로 분석되었다.
4. 미래 토지이용변화에 따른 비점오염 부하량의 변화는 2004년을 기준으로 유사량이 51.4%로 크게 증가함에 따라 T-N, T-P 부하량 또한 5.0%, 11.7% 증가하는 것으로 나타났으며, 2060년 유사량과 T-N, T-P 부하량은 70.5%, 8.5%, 16.7% 2090년 74.9%, 10.9%, 19.9% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 하천 흐름에 따른 지점별 유사량의 변화 추세를 분석한 결과, 도심지 확장에 따른 토지이

용의 변화가 컸던 WQ #2 지점(6, 7, 8, 9번 소유역)에서 큰 폭의 증가량을 보이며, 하류로 갈수록 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원격탐사개발사업의 세부과제인 “정밀 농업/임업 정보추출/분석 기술 개발(M104DA010003-07D0100-00118, 50%)”과 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3, 50%)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김남원, 정일문, 원유승(2006) 완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.
- 김법철, 전만식, 최종수(2003) 상수원지역의 비점오염원 관리. **2003년도 세계 물의 해 기념 '지속가능한 물 이용을 위한 심포지엄' 발표논문집**, 유네스코한국위원회, pp. 179-214.
- 김성준 (2002) 수자원 분포의 시공간적 변동. **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제4권, 제3호, pp. 175-196.
- 김성준, 박근애, 정인균, 권형중(2003) WMS HEC-1을 이용한 안성천 평택수위 관측소 상류유역의 수문 경년변화 분석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 609-621.
- 김성준, 이용준(2007) 면적규모 및 공간해상도가 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용 예측결과에 미치는 영향. **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제10권 제2호, pp. 58-70.
- 김철겸, 김남원(2004) 산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 737-744.
- 이길성, 정은성, 박선배, 진락선(2005) 학의천 유역의 토지이용변화에 대한 유출량 및 수질의 변화. **2005년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 664-668.
- 이용준, 김성준(2007) 미래 토지이용변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 제안 및 적용. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제6D호, pp. 809-817.
- 임창호(2002) 셀룰러오토마타 모형을 이용한 미시적 토지이용변화 예측. **국토계획**, 대한국토도시계획학회, 제37권, 제4호, pp. 125-132.
- 임혁진(2005) CA-Markov기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문영향분석. 석사학위논문, 건국대학교.
- 유철상, 김경준, 김남원(2005) SWAT 모형의 적용을 위한 적정 강우계밀도의 추정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 415-425.
- 정재운(2005) SWAT 모형에 의한 주암호 외남천 유역의 비점오염 부하 추정. 석사학위논문, 전남대학교.
- 주용진, 박수홍(2003) 시계열영상을 이용한 토지이용 변화예측 확률모형의 구현. **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제37권, 제4호, pp. 373-385.
- 한국환경정책·평가연구원(2002) **비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안**, 연구보고서
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development, *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Clarke, K.C., Hoppen, S., and Gaydos, L. (1996) Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth. *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa

- Fe, New Mexico, January 21-25. Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis.
- Eckhardt, K., Breuer, L., and Frede, H.G. (2003) Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *Journal of Hydrology*, Vol. 273, pp. 164-176.
- Fohrer, N., Möller, D. and Steiner, N. (2002) An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp. 655-662.
- Gutowitz, H. (1991) *Cellular Automata : Theory and Experiment*. MIT Press, Cambridge.
- Kirsch, K.J. and Kirsch, A.E. (2000) *Using SWAT to predict erosion and phosphorus loads in the Rock River Basin, Wisconsin*, pp. 54-57 in Soil Erosion Research for the 21st Century, Proc. Int.
- Marlos, J.M., Robert, E.W., and Bill, M. (2003) Applying AVS2000 to predict runoff and phosphorus movement from an agricultural catchment to support the modeling of chlorophyll A production, *2nd International SWAT Conference proceeding*, pp. 21-26.
- Miller, S.N., Kepner, W.G., Mehaffey, M.H., Hernandez, M., Miller, R.C., Goodrich, D.C., Devonald, K.K., Heggem, D.T., and Miller, W.P. (2002) Intergrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No. 4, pp. 915-929.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.E. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001) *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986), Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036.
- Turner, M.G. (1987) Spatial simulation of landscape change in Georgia. A comparison of three transition models. *Landscape Ecology*, Vol. 1, pp. 29-36
- Williams, J.R. (1975) Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, *In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources*, ARS-S-40, USDA-ARS.
- Williams, J.R. (1995) The EPIC model, *In Computer models of watershed hydrology*, Singh, V.P., (ed.), Chapter 25: pp. 909-1000, Water Resources Publications.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1965) *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*, Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) *Predicting rainfall-erosion losses : a guide to conservation planning*, Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.

(접수일: 2007.8.9/심사일: 2007.11.13/심사완료일: 2008.1.6)