

## GIS 기반의 모형을 이용한 도암댐 유역의 산림 파편화에 따른 수(水)환경 영향 평가

허성구<sup>1</sup> · 김기성<sup>1\*</sup> · 안재훈<sup>2</sup> · 윤정숙<sup>3</sup> · 임경재<sup>1</sup> · 최중대<sup>1</sup> · 신용철<sup>1</sup> · 유창원<sup>1</sup>

### Evaluation of Water Quality Impacts of Forest Fragmentation at Doam-Dam Watershed using GIS-based Modeling System

Sung-Gu HEO<sup>1</sup> · Ki-Sung KIM<sup>1\*</sup> · Jae-Hun AHN<sup>2</sup> · Jong-Suk YOON<sup>3</sup>  
Kyoungjae LIM<sup>1</sup> · Joongdae CHOI<sup>1</sup> · Yong-Chul SHIN<sup>1</sup> · Chang-Won LYOU<sup>1</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 도암댐 유역에서의 산림파편화에 따른 수(水)환경 영향을 평가하였다. 이를 위해 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 이용하였다. 도암댐 유역에서 산림파편화에 따른 수환경 영향만을 평가하기 위해서는 먼저 기상변화에 따른 영향을 배제시켜야 한다. 1985년과 2000년 강수량 분석결과 계절별 강수량에 상당히 많은 차이가 나타나, 본 연구에서는 1985년 기상자료를 이용하여 산림파편화에 따른 수환경 영향을 평가하였다. 산림 파편화에 따른 영향은 시간적·공간적으로 변화하기 때문에 본 연구에서는 수환경의 시·공간적 영향을 분석하였다. 도암댐 수계중 산림파편화가 가장 많이 발생한 소유역에서는 산림파편화로 인하여 유출량이 겨울철, 봄철, 여름철, 가을철 각각 8,366m<sup>3</sup>/month, 72,763m<sup>3</sup>/month, 149,901m<sup>3</sup>/month, 그리고 107,109m<sup>3</sup>/month 증가하였다. 이렇게 증가된 유출량으로 인하여 상당한 양의 토양유실이 발생하여 하천의 부영양화 등을 초래한 것으로 판단된다. 이러한 토양유실로 인하여 가장 많은 산림파편화가 일어난 소유역에서 겨울철, 봄철, 여름철, 그리고 가을철, 유사농도가 각각 5.448mg/L, 13.354mg/L, 20.680mg/L, 그리고 24.680mg/L 증가하였다. 봄철 유사농도가 많이 증가한 이유는 산림지역과는 달리 농경지에서의 봄철 용설로 인한 토양유실이 많이 발생하였기 때문이다. 여름철과 가을철 유사농도가 증가한 이유 또한 과거 산림지역이었던 곳이 산림파편화로 인하여 상당부분 농경지로 전환되었으며, 이 지역에서의 영농에 따른 토양유실 증가로 유사농도가 증가한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과를 종합해 보면 홍수조절, 토양유실 저감, 수질 개선과 같은 산림 고유의 기능은 유역 내 산림파편화로 인하여 매우 빨리 손실될 수 있다. 따라서 도암댐 유역 내에서 산림 파편화에 따른 부정적 영향을 최소화시키기 위해서는 복합적인 토지이용계획을 수립하여 이행되어야 한다.

주요어 : 수질, SWAT, 유출량, 유사, 파편화, FRAGSTATS

2006년 8월 30일 접수 Received on August 30, 2006 / 2006년 12월 4일 심사완료 Accepted on December 4, 2006

1 강원대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture, Kangwon National University

2 고랭지 농업연구소 National Institute of Highland Agriculture

3 인하대학교 Inha University

\* 연락처 E-mail : kskim@kangwon.ac.kr

## ABSTRACT

The water quality impacts of forest fragmentation at the Doam-dam watershed were evaluated in this study. For this ends, the watershed scale model, Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was utilized. To exclude the effects of different magnitude and patterns in weather, the same weather data of 1985 was used because of significant differences in precipitation in year 1985 and 2000. The water quality impacts of forest fragmentation were analyzed temporarily and spatially because of its nature. The flow rates for Winter and Spring has increased with forest fragmentations by 8,366m<sup>3</sup>/month and 72,763m<sup>3</sup>/month in the S1 subwatershed, experiencing the most forest fragmentation within the Doam-dam watershed. For Summer and Fall, the flow rate has increased by 149,901m<sup>3</sup>/month and 107,109m<sup>3</sup>/month, respectively. It is believed that increased flow rates contributed significant amounts of soil erosion and diffused nonpoint source pollutants into the receiving water bodies. With the forest fragmentation in the S1 watershed, the average sediment concentration values for Winter and Spring increased by 5.448mg/L and 13.354mg/L, respectively. It is believed that the agricultural area, which were forest before the forest fragmentation, are responsible for increased soil erosion and sediment yield during the spring thaw and snow melts. For Spring and Fall, the sediment concentration values increased by 20.680mg/L and 24.680mg/L, respectively. Compared with Winter and Spring, the increased precipitation during Summer and Fall contributed more soil erosion and increased sediment concentration value in the stream. Based on the results obtained from the analysis performed in this study, the stream flow and sediment concentration values has increased with forest fragmentation within the S1 subwatershed. These increased flow and soil erosion could contribute the eutrophication in the receiving water bodies. This results show that natural functionalities of the forest, such as flood control, soil erosion protection, and water quality improvement, can be easily lost with on-going forest fragmentation within the watershed. Thus, the minimize the negative impacts of forest fragmentation, comprehensive land use planning at watershed scale needs to be developed and implemented based on the results obtained in this research.

*KEYWORDS : Water Quality, SWAT, Streamflow, Sediment, Fragmentation, FRAGSTATS*

## 서 론

도암댐 유역에서는 지난 수십여 년 간 다양한 개발 사업으로 인하여 유역내 산림, 경작지, 습지 등의 자연경관의 대부분 제거되거나 구조적으로 많은 변화가 일어났다. 특히 우리나라 전 국토의 65% 정도를 차지하고 있는 산림은 수자원 함양, 대기 정화, 야생 동·식물의 서식지 제공 등의 기능을 담

당하고 있음에도 불구하고, 도로 및 철도 건설, 벌채 그리고 산불 발생 등으로 인하여 파편화(fragmentation)가 급속히 진행되고 있는 실정이다(김기대 등, 1998). 이러한 산림지역의 파편화로 인해 전 세계적으로 많은 환경문제가 야기되고 있다(Chen and Franklim 1990). 산림 파편화가 전 세계적인 환경문제로 다루어지고 있는 이유는 산림패치면적의 감소와 가장자리(edge) 비율의 증가 등이 산

림에 도달하는 바람과 빛의 강도와 질 등의 미기후와 교란율(disturbance rates)을 변화시키고(Chen and Franklim 1990), 그 안에서 서식할 생물종의 수, 생산성, 영양소 순환, 침식량, 수문과정 및 주변하천에 대한 영향 등과 같은 환경변수와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문이다(Ranney et al., 1981).

환경 문제가 본격적으로 거론되기 시작한 1980년대 초부터 20년 넘는 기간 동안, 호수·하천·습지·하구연·지하수·연안수로 배출되는 오·폐수 배출감축 노력에도 불구하고 날로 수질오염이 악화되고 있다. 이는 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 등의 점오염원에 의한 수질오염에 대해서는 그 동안 정부의 대규모 환경기초시설의 설치 등 지속적인 노력에 의하여 수계별·지점별로 수질개선이 이루어지고 있지만, 유역의 토지이용과 같은 비점오염원의 유입 때문이다. 유역의 물순환 원리를 고려하지 않은 무분별한 토지개발행위는 - 하천 상류의 대규모 건설에 따른 하류지역의 건전화, 하천 인접지역의 인공화, 불투수성 포장면의 증가, 산림의 황폐화, 도시지역의 과밀화 - 유역생태계를 비롯한 수환경의 생태적 건전성을 손상시키는 잠재적 오염원이다(日本國立環境研究所, 2001). 그동안 점오염원 중심의 수환경 정책에 대한 한계성을 인식한 선진국에서는 유역생태계를 구성하는 토양, 식생, 물, 지형 등의 자연환경요소와 인간 활동 간의 상호작용을 이해하고, 통합적인 관점에서 건전한 물 순환계를 보전 및 복원하기 위한 유역관리방식을 도입해야 한다고 주장하고 있다(日本國土廳, 2001; USEPA, 1996). 즉 유역을 기본단위로 하여 인간 활동에 의하여 토지이용의 파편화가 어느 정도 발생하고 있는가를 파악하고, 이를 토대로 파편화에 따른 영향을 최소화 하거나, 사전에 예방할 수 있는 대책의 수립 그리고, 원상태로 복원 할 수 있는 방안을 제

시할 필요성과 유역단위별로 환경영향 평가가 지속되어야 한다. 강원도 고령지 지역과 같이 산림지역의 상당부분이 인간의 개발행위로 인해 파편화가 진행되어 오고, 이러한 산림 파편화로 인해 유역내 토양유실과 유사발생으로 인한 환경문제가 발생하는 곳에서는 산림파편화로 인한 영향을 최소화하고 친환경적 토지이용개발 계획 수립을 위해서 유역내 산림파편화 정도를 정량적으로 분석하고 이에 따른 수환경 영향을 평가·분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 경관 구조 해석 프로그램인 FRAGSTATS를 이용한 도암댐 유역에서의 산림 파편화 정도의 정량적 분석 결과를 바탕으로, 유역내 산림파편화 정도가 상대적으로 큰 소유역을 대상으로 soil and water assessment tool (SWAT) 모델을 적용하여 산림 파편화와 토지이용변화가 유역내 수문 및 유사발생에 미치는 영향을 평가하는데 있다.

## 연구방법 및 분석

### 1. 연구대상 지역

연구 대상지역은 강원도 평창군 도암면에 속하는 도암댐 유역으로 동경 128° 37' ~ 128° 47', 북위 38° 35' ~ 38° 47' 에 위치해 있다. 그림 1은 평창군 도암면내 도암댐 수계를 나타내고 있다. 도암댐 수계는 상대적으로 해발고도가 높은 고산지대로서, 지세, 토질, 기후 등이 고령지 농업에 적합한 지역에 속한다. 도암면의 면적은 221.6km<sup>2</sup>로서 평창군 전체 면적 1463.7km<sup>2</sup>의 15.2%에 해당되며 이 중 농경지와 초지는 각각 8.1%와 4.4%를 차지한다. 반면, 산림이 82.6%를 차지하는 전형적인 산지 고원 지역이다(평창군청, <http://www.happy700.or.kr/>).

대관령 기상대의 기상관측에 따르면 본 연

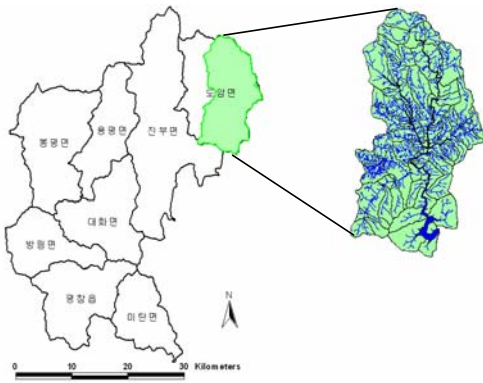


FIGURE 1. 평창군 도암댐 수계

구지역의 연평균 기온은  $6.5^{\circ}\text{C}$ 이며 영서지역에 위치한 춘천( $10.92^{\circ}\text{C}$ )에 비하여  $4.42^{\circ}\text{C}$ 가량 낮다. 여름철 월평균 기온이  $20^{\circ}\text{C}$  미만으로 매우 서늘하며 12월부터 3월까지 월평균 기온이  $0^{\circ}\text{C}$  이하로 낮게 유지되고 있다. 연평균 강수량  $1797.95\text{mm}$ 로 남한 다우지역 가운데 하나로 꼽히며, 고도가 높고 태백산맥의 분수계에 위치하여 지형성 강우가 많기 때문에 춘천( $1278.71\text{mm}$ )지역 보다 강수량이 많다(그림 2). 중부지방의 다른 지역과 마찬가지로 여름철에 많은 강수가 집중되지만 9월 강수량이 비교적

많고 겨울철에 눈이 많이 내린다는 점이 특징이다(기상청, <http://www.kma.go.kr/>).

## 2. FRAGSTATS 모델의 적용

McGarigal and Marks (1995)가 개발한 경관구조 해석프로그램인 FRAGSTATS은 경관 구조에 관한 많은 지표산출(매트릭스 형식)과 지표의 해석으로부터 경관의 정량적 평가가 가능하며, 경관조성(Landscape composition)과 경관배열(Landscape configuration)의 두 가지 상이한 접근방식이 경관에 적용되는 프로그램이다. FRAGSTATS 모형은 Raster Data 형식의 경관 입력 자료에 대하여 패치(Patch), 클래스(Class), 경관(Landscape) 등급에서 40개 이상의 경관지수를 산출할 수 있다. FRAGSTATS 모형에서 패치는 같은 셀 값을 갖는 인접한 셀 그룹을, Class는 공동의 셀 값을 갖는 패치의 집합을 의미하고, 경관(Landscape)은 특정 환경내의 전부를 Class집합으로 나타낸다. (鄭會勳 등, 2004).

본 연구에서는 경관지수를 통한 산림의 파편화 정도를 알아보기 위해 FRAGSTATS 모델의 지수중 다음과 같은 경관지수를 이용하

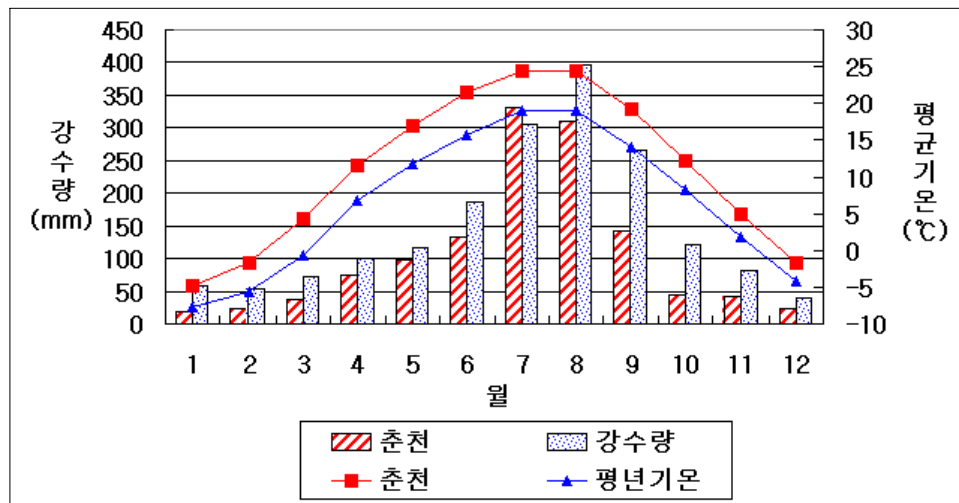


FIGURE 2. 대관령-춘천의 평균기온 및 강수량(1974~2005년)

여 분석하였다. 각 경관지수별 정의를 간략하게 살펴보면 다음과 같다. 먼저 클래스(Class) 크기에 관련된 PLAND(Percentage of landscape)는 경관내의 각 패치의 비율 및 총 클래스(Class) 면적을 나타내며, NUMP(number of patches)는 경관에서의 패치의 총 개수 및 각 클래스 개수에 대한 패치수를 나타내는 지수이며, PD(Patch density)의 단위면적당(100ha) 패치의 수를 의미하는 지수로 인위적인 압력에 따른 파편화를 나타내는 지수이다. 또한 LPI(largest patch index) 경관지수는 가장 큰 산림패치가 소유역에서 차지하는 비율을 나타내는 지수이며, TE(total edge)와 가장자리 밀도 ED(edge density) 경관지수는 총 가장자리 길이와 관련된 경관지수이다. 경관형태지수 LSI(landscape shape index)는 경관 형태의 복잡성을 나타내는 지수이며, TCA(total core area) 지수는 핵심지역 면적을 나타내는 경관 분석 지수이다. 이외에도 핵심지역과 관련된 핵심지역의 면적률 CPLAND(core area percentage of landscape) 지수, 분리된 핵심구역 수를 나타내는 지수 NDCA(number of disjunct core areas), 그리고 분리된 핵심구역 밀도를 나타내는 지수 DCAD(dsjunct core

area density)를 이용하여 산림파편화 정도를 모의하였다(표 1).

허성구 등 (2006)은 도암댐 유역내 19개 소유역에 대해서 1985년과 2000년 토지이용자료와 FRAGSTATS 경관구조 프로그램을 이용하여 각 소유역별 산림 파편화 정도를 정량적으로 분석하였다. 총 19개 소유역중 S1 소유역 (그림 5b)이 가장 많은 산림 파편화가 진행된 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 허성구 등 (2006)의 분석결과 가장 많은 산림 파편화가 진행된 S1 소유역에서의 산림파편화와 토지이용변화에 따른 수환경 영향을 평가하였다.

### 3. SWAT 모델의 적용

#### 3.1 SWAT 모델의 개요

SWAT 모델은 미국 농무성의 농업연구국 (agricultural research service: ARS)에서 개발한 유역단위의 모델이다. 이 모델은 미국 농무성에서 개발하여 이용해 온 CREAMS 모델, GREAMS 모델 및 EPIC 모델과 같은 농업연구국 모델들을 결합하여 만들었다 (Arnold and Srinivasan, 1994). 특히 SWAT은 강우-유출모델과 수질모델이 GIS와 연계된 호환모

TABLE 1. FRAGSTATS 경관분석 지수별 인자(McGarigal and Markes, 1995)

| Category | Index  | Description     | Unit         |
|----------|--------|-----------------|--------------|
| Area     | LPI    | 경관 최대패치 면적 비율   | %            |
|          | NUMP   | 패치 수            | -            |
| Density  | TE     | 총 가장자리(길이)      | m            |
|          | PD     | 패치 밀도           | number/100ha |
| Edge     | ED     | 가장자리 밀도         | m/ha         |
|          | LSI    | 경관형태 지수         | -            |
| Patch    | PLAND  | 경관면적 비율         | %            |
|          | CPLAND | 경관에서의 핵심지역의 면적률 | %            |
| Core     | DCAD   | 분리된 핵심구역 밀도     | number/100ha |
|          | NDCA   | 분리된 핵심구역 수      | -            |
| Area     | TCA    | 전체 핵심지역 면적      | ha           |

델로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미계측 지역에서는 모의도 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는 특징을 지니고 있다. 그림 3은 SWAT 모델의 입력 자료와 출력자료를 보여준다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료 (일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와, 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 SWAT 모델은 유역에서의 토지이용에 따라 발생하는 비점오염원과, 유역내 소하천별, 소유역별, 그리고 소유역내 수문학적 반응단위별 유출량, 토양유실을 모의한다.

### 3.2 SWAT 모형의 입력자료

#### 3.2.1 기상자료

SWAT 모형의 운영에 필요한 기상자료는 일 강우(Precipitation), 일 풍속(Wind speed), 일 일조량(Solar radiation), 일 최고온도(Maximum

temperature)·일 최저온도(Minimum temperature), 일습도(Humidity)이다. 본 연구에서는 도암댐 수계 전체와 도암댐 19개 소유역중 가장 산림 파편화가 많이 진행된 S1 소유역 (허성구 등, 2006)을 대상으로 산림파편화에 따른 수환경 영향을 SWAT 모형을 이용하여 분석하였다. SWAT 모의시 산림 파편화에 따른 수환경 영향을 평가하고 강수패턴 차이에 따른 영향을 배제하기 위하여 먼저 1985년과 2000년 강수패턴을 분석하였다.

도암댐 수계의 1985년과 2000년의 계절별 강수량을 비교하여 본 결과 2000년 총 강수량이 1985년에 비해 323.8mm 증가하였다. 1985년 봄철(3~5월) 강수량이 2000년 봄철 강수량보다 크며, 2000년 겨울, 여름, 그리고 가을철 강수량이 1985년 같은 기간의 강수량보다 많았다(그림 4). 따라서 산림 파편화에 따른 수환경 영향을 평가하기 위해서는 기상변화(강수량 차이)에 따른 영향을 배제시켜야 한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 1985년 기상자료와 1985년 토지이용도, 2000년 토지이용도를 이용하여 산림파편화에 따른 수환경 영향을

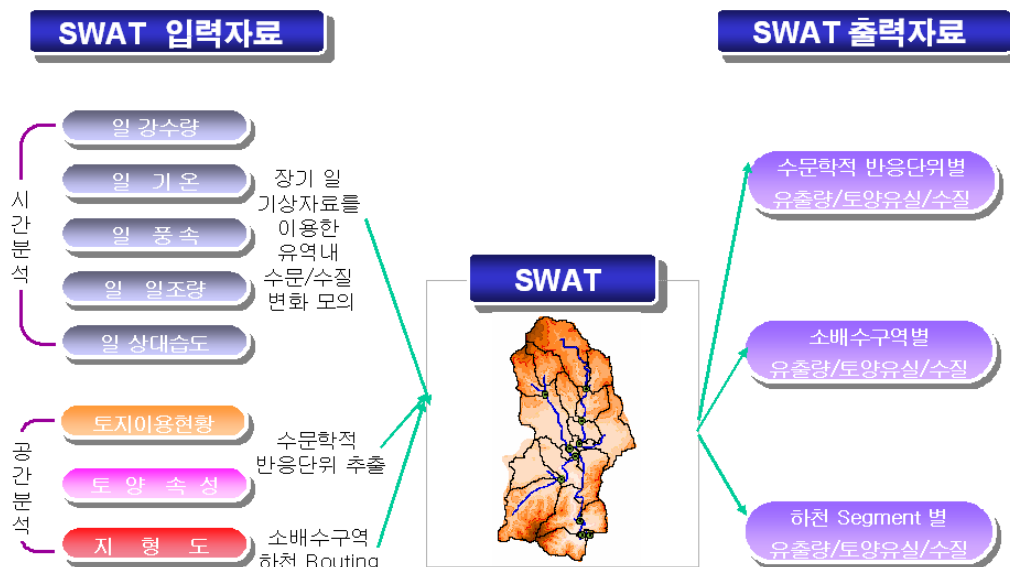


FIGURE 3. SWAT 모델 개요 - 모델 입출력 자료

평가하였다.

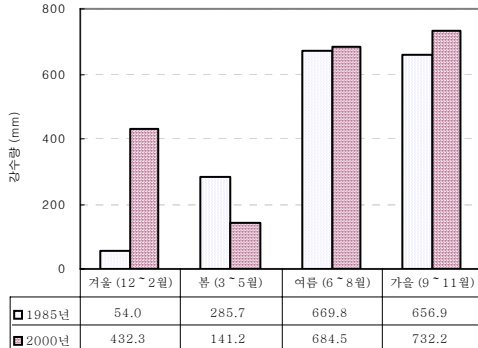


FIGURE 4. 도암댐 유역 계절별 월 강수량 비교

### 3.2.2 토양도

도암댐 수계내 토양속성은 농업과학기술원의 정밀토양도(1:25,000)를 사용하였으며, 대관령 지역은 주로 갈색산림토가 가장 많은 부분을 차지하며 비옥한 퇴적토는 적은 편이다. 토성별로 보면 양토가 62%로 가장 많고 다음이 미사질양토로 17%를 차지한다(농촌진흥청, 2000).

### 3.2.3 DEM (digital elevation model)

도암댐 수계내의 물의 흐름과 소유역을 구분하기 위하여 Arcview GIS 프로그램을 이용하여 1:5,000 수치지도내 고도 값을 분리한 후, triangulated irregular network (TIN)을 형성하고 이것을 가로, 세로 각각 5m × 5m인 격자 형태의 DEM을 만들어 사용하였다.

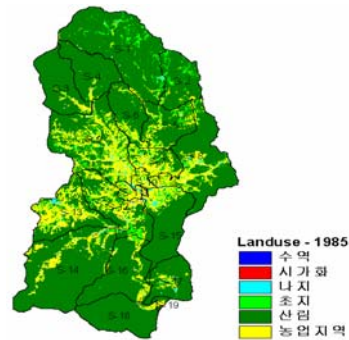
### 3.2.4 토지이용도

도암댐 수계내 토지이용현황은 환경부에서 제공하는 토지이용도를 사용하였다. 도암댐 수계내 1985년 토지이용은 산림이 약 76.2%를 차지하며, 농업지역이 17.1%, 수역이 0.1%, 시가화 0.1%, 나지 0.8%, 초지가 5.7% 각각 차지하고 있다(표 2). 도암댐 유역에 대해서 총

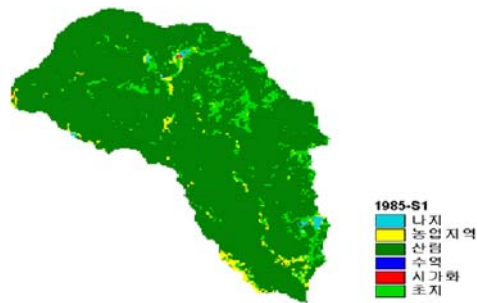
19개 소유역을 추출하였고, 19개 소유역중 가장 많은 산림 파편화가 발생한 S1 소유역(허성구 등, 2006)의 1985년 토지이용은 산림이 약 89.83%를 차지하며, 농업지역이 2.24%, 수역이 0.03%, 시가화 0.08%, 나지 0.48%, 초지가 7.38% 각각 차지하고 있다(그림 5).

TABLE 2. 도암댐 유역과 S1 소유역의 토지이용 분류

| 토지이용 | 1985년         | 2000년 | 1985년                | 2000년 |
|------|---------------|-------|----------------------|-------|
|      | Total area(%) |       | S1 Watershed area(%) |       |
| 수역   | 0.1           | 0.5   | 0.03                 | 0.00  |
| 시가화  | 0.1           | 0.2   | 0.08                 | 0.01  |
| 초지   | 5.7           | 6.0   | 7.38                 | 11.92 |
| 나지   | 0.8           | 5.0   | 0.48                 | 1.24  |
| 산림   | 76.2          | 72.1  | 89.83                | 73.56 |
| 농경지  | 17.1          | 16.1  | 2.24                 | 13.30 |



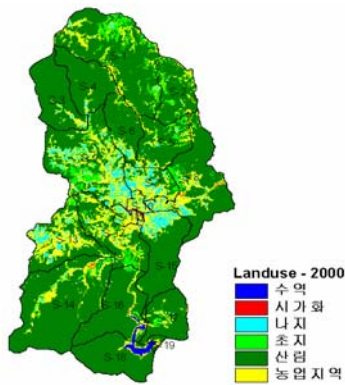
(a) 도암댐 유역



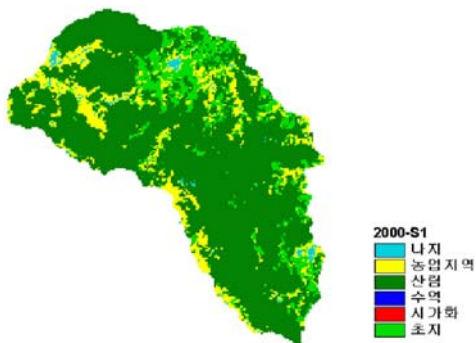
(b) S1 소유역

FIGURE 5. 도암댐 유역 및 S1 유역의 토지이용도(1985)

또한 2000년 도암댐 유역내 토지이용은 산림이 약 72.1%를 차지하며, 농업지역이 16.1%, 수역이 0.5%, 시가화 0.2%, 나지 5.0%, 초지가 6.0% 각각 차지하고 있다(표 2). 가장 많은 산림 파편화가 발생한 S1 유역에서의 2000년도 토지이용은 산림이 약 73.56%를 차지하며, 농업지역이 13.30%, 수역이 0%, 시가화 0.01%, 나지 1.24%, 초지가 11.92% 각각 차지하고 있다(그림 6). S1 소유역에서는 1985년 산림이 89.83%를 차지하고 있었으나, 2000년에는 산림파편화로 인하여 73.56%로 16.27% 줄어들었다. 반면 S1 소유역에서 농업지역은 1985년 2.24%를 차지하고 있었으나, 2000년에는 13.30%로 11.06% 증가하였다.



(a) 도암댐 유역

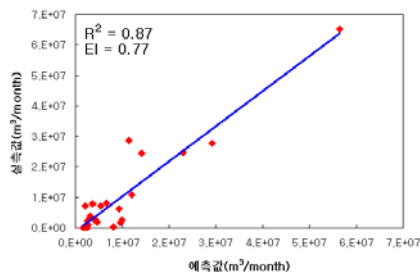


(b) S1 소유역

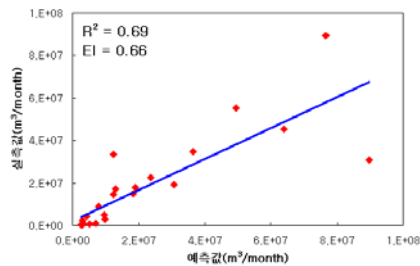
FIGURE 6. 도암댐 유역 및 S1 유역의 토지 이용도 (2000)

### 3.3 SWAT 모델의 정확성 평가

도암댐 유역중 산림 파편화가 가장 많이 발생한 S1 유역에서 산림파편화와 이에 따른 토지이용변화에 따른 수환경 영향을 평가하기 위해서 사용된 모델의 정확성이 먼저 평가되어야 한다. 허성구 등 (2005)은 SWAT 모형의 도암댐 유역 적용성을 평가하기 위하여 SWAT 모형을 도암댐 유역에 적용한 후 실측 유량 (한국수력원자력, <http://www.khnp.co.kr>) 과 실측유수량(물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr/weis>) 자료와 비교 분석하였다. 허성구 등 (2005)의 연구에 의하면 SWAT 모형은 도암댐 수계내 수문 모델유율지수(EI) = 0.77 Calibration, 모델유율지수(EI) = 0.66 Validation 및 유사 결정계수(R<sup>2</sup>) = 0.60, 모델유율지수(EI) = 0.41를 잘 모의하는 것으로 분석되었다(그림 7). 따라서 본 연구에서는 허성구 등(2005)에 의해 보정된 모델 변수를 이용하여 산림파편화에 따른 수환경 영향의 시·공간적 평가를 수행하였다.

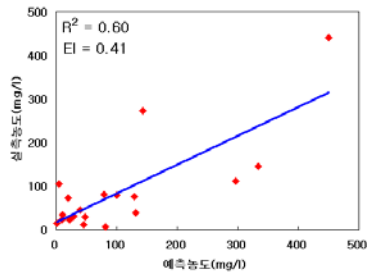


(a) 수문 Calibration



(b) 수문 Validation





(c) SS Validation

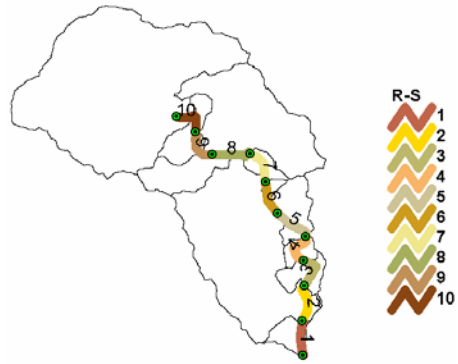


FIGURE 7. SWAT 모형의 정확성 분석 (허성구 등, 2005)

3.4 산림 파편화에 따른 수환경 영향의 시·공간적 평가

본 연구에서는 도암댐 수계내 산림 파편화에 따른 수환경 영향을 시간적·공간적으로 평가하기 위하여 S1 유역의 하천을 총 10개의 Reach segment로 나누어 분석하였다. 그림 8은 S1 유역의 하천을 나눈 각 Segment를 보여준다. 본 연구에서는 봄, 여름, 가을, 겨울별 수계출구로부터의 거리에 따라 수환경 영향 평가를 수행하였다.

| Reach Seg. | 수계출구로부터의 거리 (m) |
|------------|-----------------|
| 10         | 6,687           |
| 9          | 6,057           |
| 8          | 5,356           |
| 7          | 4,666           |
| 6          | 3,973           |
| 5          | 3,269           |
| 4          | 2,625           |
| 3          | 1,974           |
| 2          | 1,259           |
| 1          | 624             |

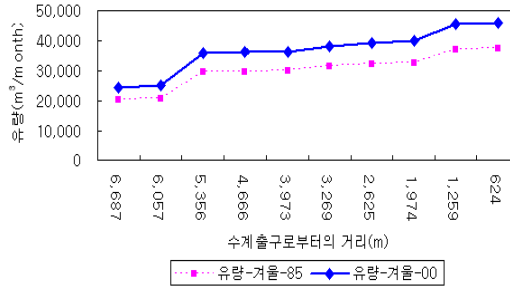
FIGURE 8. S1 소유역의 수계 하천 Reach segment

TABLE 3. 도암댐 S1 유역의 겨울철/봄철 유량 비교 (단위 : m<sup>3</sup>/month)

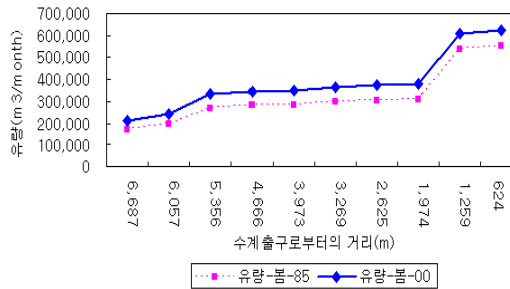
| Reach Segment | 겨울       |          |             | 봄        |          |             |
|---------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|
|               | 1985 (A) | 2000 (B) | 증감 변화 (B-A) | 1985 (A) | 2000 (B) | 증감 변화 (B-A) |
| 10            | 20,231   | 24,516   | 4,285       | 170,802  | 214,638  | 43,836      |
| 9             | 20,829   | 25,257   | 4,428       | 199,755  | 243,467  | 43,711      |
| 8             | 29,480   | 35,828   | 6,348       | 268,929  | 333,398  | 64,469      |
| 7             | 29,686   | 36,123   | 6,437       | 281,696  | 346,272  | 64,576      |
| 6             | 29,909   | 36,408   | 6,500       | 283,535  | 348,683  | 65,148      |
| 5             | 31,462   | 38,328   | 6,866       | 297,177  | 365,771  | 68,594      |
| 4             | 32,060   | 39,087   | 7,026       | 302,918  | 372,958  | 70,040      |
| 3             | 32,757   | 40,051   | 7,294       | 308,203  | 380,904  | 72,701      |
| 2             | 37,114   | 45,399   | 8,285       | 536,841  | 609,425  | 72,585      |
| 1             | 37,417   | 45,783   | 8,366       | 553,268  | 626,031  | 72,763      |

### 결과 및 고찰

본 연구에서는 기상변화에 따른 영향을 배제 시키기 위하여 1985년 기상자료를 이용하여 산림파편화에 따른 수환경 영향을 시간적·공간적으로 분석하였다. 이를 위해서 앞에서 언급된 바와 같이 각 Reach Segment 별 유출량 및 유사변화량을 평가하였다. 표 3와 그림 9는 S1 유역의 산림파편화로 인하여 수계출구로부터의 거리에 따른 겨울철·봄철 유출량 변화를 나타낸 것으로, 겨울철 총 유출량은 8,366m<sup>3</sup>/month 증가하였고 봄철 총 유출량은 72,763m<sup>3</sup>/month 증가함을 알 수 있다. 그림 9에서 보이는 바와 같이 산림 파편화에 따라서 S1 유역에서의 유출량 증가는 계절적으로 상당한 차이가 나는 것으로 분석되었다. 그림 9에서 수계출구로부터의 거리별로 유출량 증감에 있어서의 차이점은 S1 소유역내 산림파편화의 공간적 분포 때문이다. 따라서 산림파편화가 수환경에 미치는 영향평가는 시·공간적으로 분석되어야 한다.



(a) 산림파편화/토지이용변화에 따른 겨울철 유출량 증가



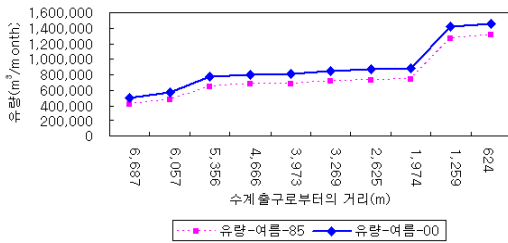
(b) 산림파편화/토지이용변화에 따른 봄철 유출량 증가

FIGURE 9. 도암댐 S1 유역의 수계출구로부터의 거리에 따른 겨울·봄철 유량 비교

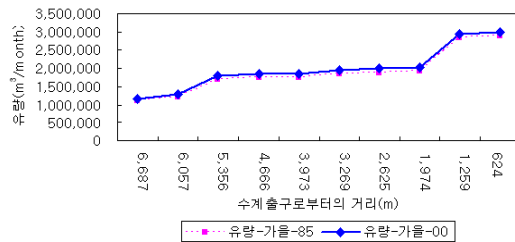
TABLE 4. 도암댐 S1 유역의 여름/가을 유량 비교(단위 : m<sup>3</sup>/month)

| Reach Segment | 여름        |           |             | 가을        |           |             |
|---------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|
|               | 1985 (A)  | 2000 (B)  | 증감 변화 (B-A) | 1985 (A)  | 2000 (B)  | 증감 변화 (B-A) |
| 10            | 415,152   | 500,772   | 85,620      | 1,114,393 | 1,178,737 | 64,344      |
| 9             | 482,558   | 568,714   | 86,155      | 1,229,823 | 1,293,328 | 63,505      |
| 8             | 647,905   | 775,218   | 127,313     | 1,694,990 | 1,796,323 | 101,333     |
| 7             | 677,457   | 805,038   | 127,581     | 1,745,906 | 1,847,310 | 101,404     |
| 6             | 682,099   | 811,020   | 128,920     | 1,759,200 | 1,861,818 | 102,618     |
| 5             | 715,133   | 850,660   | 135,527     | 1,848,748 | 1,955,875 | 107,127     |
| 4             | 729,150   | 867,623   | 138,473     | 1,884,647 | 1,994,238 | 109,591     |
| 3             | 740,845   | 884,765   | 143,919     | 1,924,252 | 2,039,736 | 115,484     |
| 2             | 1,270,276 | 1,419,909 | 149,633     | 2,829,730 | 2,936,830 | 107,100     |
| 1             | 1,308,488 | 1,458,389 | 149,901     | 2,894,100 | 3,001,210 | 107,109     |

표 4와 그림 10은 S1 유역의 수계 출구로부터의 거리에 따른 여름·가을철 유출량을 나타낸 것으로 여름철 총 유출량은 149,901m<sup>3</sup>/month 증가하였고 가을철 총 유출량은 107,109m<sup>3</sup>/month 증가함을 알 수 있다. 산림 파편화로 인하여 겨울철 총 유출량이 8,366m<sup>3</sup>/month 증가하였고 봄철의 경우 72,763m<sup>3</sup>/month 증가한 것과 비교할 때, 여름철과 가을철의 경우 산림파편화로 인한 상당한 양의 유출(겨울철과 봄철 유출량 증가에 비하여 여름철/가을철 유출량 증가비가 1.5배에서 18배)이 증가한 것으로 분석되었다. 산림파편화에 따른 유출량 증가로 인하여 도암댐 수계내에서는 상당한 양의 토사유출과 함께 비점오염원이 수계로 유입되어 수체의 부영양화에 상당부분 기여했을 것이라 판단된다.



(a) 산림파편화/토지이용변화에 따른 여름철 유출량 증가



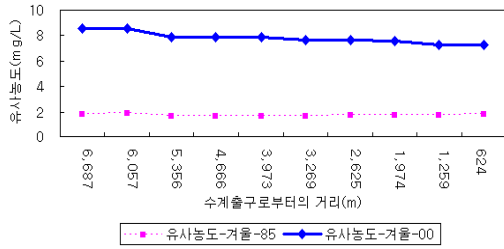
(b) 산림파편화/토지이용변화에 따른 가을철 유출량 증가

FIGURE 10. 도암댐 S1 유역의 수계출구로부터의 거리에 따른 여름·가을철 유출량 비교

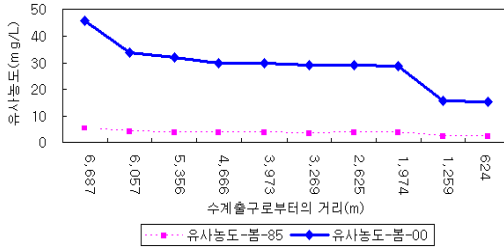
표 5과 그림 11은 S1 유역의 수계 출구로부터의 거리에 따른 겨울·봄철 유사농도를 나타낸 것으로 겨울철 총 유사 농도는 5.448 mg/L 증가하였고 봄철 총 유사농도는 13.354 mg/L 증가함을 알 수 있다. 산림의 파편화가 진행 되기전 1985년 봄의 유사농도는 수계출구지점에서 2.143 mg/L 이었으나, 산림 파편화로 인해 산림의 농경지/초지로 전환 후, 유사농도는 15.497 mg/L 로 높게 모의 되었다. 본 연구에서 사용된 SWAT 모형은 겨울내 적설된 눈의 봄철 용설에 따른 토양유실을 모의한다. 따라서 과거 산림지역이었던 농경지에

TABLE 5. 도암댐 S1 유역의 겨울/봄 유사농도 비교(단위 : mg/L)

| Reach Segment | 겨울       |          |             | 봄        |          |             |
|---------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|
|               | 1985 (A) | 2000 (B) | 증감 변화 (B-A) | 1985 (A) | 2000 (B) | 증감 변화 (B-A) |
| 10            | 1.840    | 8.575    | 6.735       | 5.360    | 45.647   | 40.287      |
| 9             | 1.917    | 8.586    | 6.669       | 4.001    | 33.860   | 29.859      |
| 8             | 1.652    | 7.903    | 6.251       | 3.681    | 32.110   | 28.429      |
| 7             | 1.679    | 7.916    | 6.237       | 3.465    | 29.877   | 26.412      |
| 6             | 1.695    | 7.912    | 6.217       | 3.451    | 29.763   | 26.312      |
| 5             | 1.685    | 7.656    | 5.971       | 3.417    | 29.073   | 25.657      |
| 4             | 1.746    | 7.635    | 5.889       | 3.489    | 29.083   | 25.594      |
| 3             | 1.773    | 7.555    | 5.782       | 3.472    | 28.757   | 25.285      |
| 2             | 1.776    | 7.249    | 5.473       | 2.178    | 15.897   | 13.719      |
| 1             | 1.827    | 7.275    | 5.448       | 2.143    | 15.497   | 13.354      |



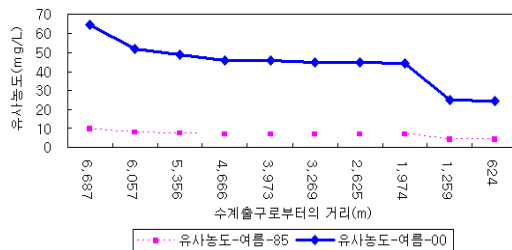
(a) 산림파편화/토지이용변화에 따른 겨울철 유사농도 증가



(b) 산림파편화/토지이용변화에 따른 봄철 유사농도 증가

쌓여있던 눈의 용설에 따라 상당량의 토사가 유실되었기 때문에 2000년도 봄철 유사농도가 크게 증가한 것으로 판단된다.

표 6과 그림 12는 S1 구역의 수계 출구로부터의 거리에 따른 여름·가을철 유사농도를 나타낸 것으로 여름철 총 유사농도는 20.680mg/L 증가하였고 가을철 총 유사농도는 24.680mg/L 증가하였다. 겨울철과 봄철보다는 여름철과 가을철 강수량이 많았기 때문에 산림파편화 이후 농경지에서의 상당한 토양유실로 인하여 유사농도가 크게 증가하였다.

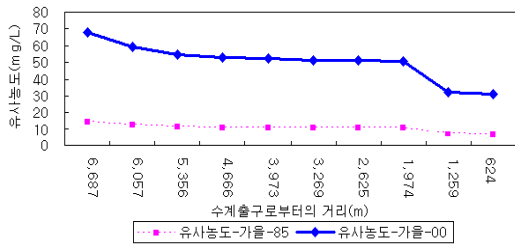


(a) 산림파편화/토지이용변화에 따른 겨울철 유사농도 증가

FIGURE 11. 도암댐 S1 구역의 수계출구로부터의 거리에 따른 겨울철·봄철 유사농도 비교

TABLE 6. 도암댐 S1 구역의 여름/가을 유사농도 비교(단위 : mg/L)

| Reach Segment | 여름       |          |             | 가을       |          |             |
|---------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|
|               | 1985 (A) | 2000 (B) | 증감 변화 (B-A) | 1985 (A) | 2000 (B) | 증감 변화 (B-A) |
| 10            | 10.011   | 64.643   | 54.633      | 14.297   | 67.940   | 53.643      |
| 9             | 8.292    | 51.763   | 43.472      | 12.476   | 59.379   | 46.903      |
| 8             | 7.615    | 48.690   | 41.075      | 11.347   | 54.838   | 43.491      |
| 7             | 7.220    | 46.053   | 38.834      | 10.895   | 52.745   | 41.850      |
| 6             | 7.186    | 45.847   | 38.661      | 10.842   | 52.490   | 41.648      |
| 5             | 7.115    | 44.703   | 37.588      | 10.733   | 51.096   | 40.363      |
| 4             | 7.217    | 44.677   | 37.460      | 10.858   | 51.055   | 40.197      |
| 3             | 7.175    | 44.213   | 37.039      | 10.768   | 50.469   | 39.701      |
| 2             | 4.004    | 25.277   | 21.272      | 6.676    | 31.981   | 25.305      |
| 1             | 3.887    | 24.567   | 20.680      | 6.508    | 31.189   | 24.680      |



(b) 산림파편화/토지이용변화에 따른 봄철 유사농도 증가

FIGURE 12. 도암댐 S1 유역의 수계출구로부터의 거리에 따른 겨울철·봄철 유사농도 비교

### 요약 및 결론

본 연구에서는 도암댐 수계내에서 인간의 개발행위로 인해 진행되어 오고 있는 산림 파편화에 따른 수환경 영향을 평가하였다. 산림 파편화에 따른 수환경 영향평가는 SWAT (soil and water assessment tool) 을 이용하여 산림파편화에 따른 수환경 영향 평가시 기상패턴의 차이에 따른 영향을 배제시키고자 동일 기상자료를 이용하여 수환경 영향을 평가하였다. 산림 파편화에 따른 수환경 영향평가는 시간적·공간적으로 변화하기 때문에 계절별/수계출구에서의 거리별로 모의 분석하였다.

산림 파편화로 인하여 도암댐내 가장 많은 산림 파편화가 진행된 S1 소유역에서는 겨울철·봄철 각각 8,366m<sup>3</sup>/month와 72,763m<sup>3</sup>/month 유출량이 증가하였고 산림파편화의 공간적 분포에 따라서 유출량 증가는 어느 정도 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 여름·가을철 유출량은 각각 149,901m<sup>3</sup>/month와 107,109m<sup>3</sup>/month 증가하였다. S1 소유역내에서의 산림파편화에 따른 유출량 증가로 인하여 도암댐 수계내에서는 상당한 양의 토사유출과 함께 비점오염원이 수계로 유입되어 수체의 부영양화에 상당부분 기여했을 것이라 판단된다.

산림 파편화에 따른 겨울·봄철 유사농도는 각각 5.448 mg/L 와 13.354 mg/L 증가하였다.

산림 파편화로 인하여 과거 산림지역이었던 농경지에서 봄철 용설과 함께 상당량의 토사가 유실되었기 때문에 봄철 유사농도가 산림 파편화로 증가된 것으로 판단된다. 여름·가을철 유사농도를 나타낸 것으로 여름철 총 유사농도는 20.680 mg/L 증가하였고 가을철 총 유사농도는 24.680 mg/L 증가하였다. 겨울철과 봄철보다는 여름철과 가을철 강수량이 많았기 때문에 산림파편화 이후 농경지에서의 상당한 토양유실로 인하여 유사농도가 크게 증가하였기 때문이다.

본 연구의 결과를 종합적으로 정리해보면, 산림 파편화로 인해 유역내 유출량 증가 및 토양유실이 증가하고, 이로 인해 수체의 부영양화에 많은 악영향을 미친 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 산림의 파편화로 인해 산림의 고유 기능인 홍수조절 능력, 토양침식·이동 방지기능 및 수질 정화 능력이 쉽게 손실될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 하여 산림 파편화에 따른 부정적 요인을 최소화하기 위한 종합적인 토지이용계획을 수립하는 것이 필요하다. 또한 본 연구의 결과는 고령지 지역에 대한 유역단위의 환경영향 평가 및 토지이용계획 수립을 위한 기초 자료로 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 사 사

본 연구는 농촌진흥청 고령지 농업연구소와 강원대학교 농업과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구입니다. **KAGIS**

### 참 고 문 헌

기상청. <http://www.kma.go.kr/>, Last accessed Oct. 5, 2005.  
 김기대, 길지현, 최병진, 서민환, 고강석, 최덕일. 1998. 환경영향평가서에 나타난 생태계 단편화 현황과 생태통로 조성실태. 한국환경영향

- 평가학회지 7(2):15-27.
- 농촌진흥청 고령지농업시험장. 2000. 고령지 채소 재배기술. 34쪽
- 물환경정보시스템. <http://water.nier.go.kr/weis>, Last accessed Oct. 5, 2005.
- 평창군청. <http://www.happy700.or.kr>, Last accessed Oct. 5, 2005.
- 한국수력원자력(주). <http://www.khnp.co.kr>, Last accessed Oct. 5, 2005.
- 허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재. 2005. 고령지 농경지의 토양유실 모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가. 한국농촌계획학회지 11(4): 67-75.
- 허성구, 김기성, 안재훈, 윤정숙, 임경재, 최중대, 신용철, 유창원. 2006. In Review. 한국지리정보학회지.
- Arnold, J. G. and R. Srinivasan. 1994. "Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS." Water Resources Bulletin. American Water Resources Association. pp. 453-462.
- Chen, J., and J.F. Franklim. 1990. Microclimatic Pattern and Basic Biological Responses at the Clearcut Edges of Old-Growth Douglas-Fir stands. Northwest Environment Journal, 6:424-425.
- McGarigal, K. and B. mark. 1995. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. USDA Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-351, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon. pp.20-32.
- Raynney. J.W., M.C. Bruner, and J.B. Levenson. 1981. The Importance of Edge in the Structure and Dynamics of Forest Islands. In R. L. Burgess and D. M. Sharpe. eds. Forest Island Dynamics in Man-Dominated Landscape. Springer-Verlag. New York. 67-94.
- 日本國土廳. 2001. 21世紀の國土のグランデザイン-流域の自立の促進と美しい國土の創造. pp.145-173.
- 鄭會勳, 淀川智之, 矢澤正士. 2004. 耕作放棄地を有する農業集落の空間構造的 특성. 農村計劃論文集. pp.58-84 