

산림자원 및 산림의 공익기능량 추정을 위한 시스템다이나믹스 모형 개발*

Development of a System Dynamics Model For Estimating the Volume of Forest Resources and Function of Public Benefit

조윤숙**

Cho, Yoon-Sook

Abstract

The purpose of this paper is to develop a System Dynamics model for estimating the volume of forest resources in the future and simulating the volume of function of public benefit linked to forest resources in dynamic manner. Also it is to analyze the impact when the volume of forest land conversion is controlled by policy using the SD model. The analysis was done at nation-wide for the simulation period 2000 to 2040.

Estimated forest area was 6.2 million ha and estimated growing stock was 4.7 billion m³ in 2040 from the future forecast without policies. Changing of forest resources, 13.9 billion tons of forest-ground-water storage was estimated, 1.8 million m³ of erosion control of forest was estimated and 377 million tons of CO₂ absorption was estimated. As a result of simulation with two alternatives, forest area was less reduced and growing stock was bigger than do nothing policy. Also, function of public benefit reflected by changes of forest resources was enhanced. This study contributes to estimate the quantitatively measured volume of forest resources and function of public benefit over the 30 years in Korean forest land in scientific way. Using this SD model, decision maker would develop forest land policies more delicately for deserving forest resources and increasing the volume of function of public.

Keywords: 산림자원, 공익기능, 산지전용, 미래전망, 시스템다이나믹스

(Forest Resources, Function of Public Benefit, Forest Land
Conversion, Future Forecast, System Dynamics)

* 이 논문은 2013년 (주)스파이어테크놀로지에서 수행한 위탁과제(산림청, 국토연구원)의 내용 일부를 발췌, 수정·보완한 것임

** (주)스파이어테크놀로지 SD연구본부 본부장(단독저자, yscho@spiretech.co.kr)

I. 서론

지구온난화, 이상기후현상, 생태계파괴 등 환경오염으로 인한 자연재해가 급증하면서, 이산화탄소의 저장고 역할을 통해 환경을 보호하는 가장 합리적인 대안으로서 산림에 대한 관심이 높아지고 있다. 산림은 목재 및 각종 부산물 생산과 같은 경제적 측면뿐 아니라 수자원보전, 국토보전유지, 생활환경형성 및 지구온난화 방지, 보건 및 휴양 등 여러 가지 공공적 성격의 기능을 가지고 있다. 이러한 산림의 공익기능은 현재와 미래에 산림의 근원적 생산가치보다 더 큰 가치를 제공할 것으로 기대되고 있다. 따라서 산림의 훼손을 방지하고 산림의 공익기능을 증대시키는 방향으로 산림자원을 보전하고 합리적으로 이용하여야 하며, 이를 뒷받침할 수 있는 정책을 발굴해야 한다. 산림자원을 효율적으로 관리하고 공익기능을 증대시키기 위한 정책을 발굴하기 위해서는 우선 산림자원의 규모와 산림의 공익기능량에 대한 정량적 계량화가 필요하다. 국립산림과학원에서는 1987년 산림의 공익기능 평가액을 최초로 공표한 이래, 1990년, 1992년, 1995년, 2000년, 2003년, 2005년, 2010년에 걸쳐 그 평가액을 발표해 오고 있다. 또한 2010년에는 산림에 대한 가치를 재평가하기 위해, 「산림의 공익기능 계량화 연구」를 수행하여 산림의 다양한 공익기능을 평가하기 위한 방법론을 제시하였다(김중호 외, 2010, 국립산림과학원).

이 연구에서는 산림자원이 제공하는 여러 공익기능 중 수원함양기능, 토사유출방지기능, 공기정화기능 등 3가지 기능을 선정한 후, 산림자원과 해당 공익기능량과의 유기적 관계를 분석하였다. 과거의 시계열 자료를 분석하여 산림면적 및 임목축적 등 산림자원의 미래변화를 예측하는 모형을 개발하고, 김중호 외(2010)가 제시한 산림의 공익기능 계량화 방법론을 토대로, 산림자원의 변화에 따른 공익기능량 변화를 동적으로 시뮬레이션할 수 있도록 모형을 개발한 후, 산지전용 허가면적을 정책적으로 통제할 경우 그에 따른 파급효과를 분석할 수 있도록 하였다. 따라서 이 연구에서 개발한 모형을 활용하면 주요한 산림자원의 미래지표값과 공익기능량의 미래지표값을 정량적이고 과학적으로 추정할 수 있으므로, 산림자원의 보존과 공익기능 향상을 위한 다양한 정책프로그램을 효율적으로 개발할 수 있을 것이다. 또한 산림정책 의사결정자는 이 모형을 확대적용하여, 새로이 시행하고자 하는 산림정책이 시간의 흐름에 따라 산림자원 및 공익기능량의 변화에 미치는 파급효과를 미리 정량적으로 추정할 수 있으므로, 장기적인 관점을 가지고 합리적인 의사결정을 할 수 있게 될 것이다.

II. 선행연구

1. 산림의 공익기능에 대한 정의

산림의 공익기능이란 산림이 발휘하는 다양한 기능 가운데 목재생산을 제외한 가치로, 시장기능에 의존할 경우 시장실패가 발생할 가능성이 큰 공익적 가치이다(신용광 · 장철수, 2006: 8, 산림청). 산림의 공익적 기능이 구체적으로 어떤 항목인가는 연구자와 각국의 산림이 놓여있는 자연 · 사회 · 경제 · 문화적 환경에 따라 달라진다. <표 1>은 우리나라 산림의 공익기능의 정의와 평가방법을 정리한 표이다.

<표 1> 산림의 공익기능에 대한 정의 및 평가방법

기능분류	정의	평가방법
수자원 함양기능	산림에 내린 비가 지중으로 스며들어 천천히 하천으로 흘러보내져 집중호우에 따른 홍수나 가뭄에 따른 물 부족을 방지할 수 있는 기능	산에 산림이 없다면 물을 저장하기 위해서 다목적댐을 건설할 경우 투자되는 대체비용
산림 정수기능	산림에서 유출한 물을 하천수질환경기준 상수원수 1등급수의 기준에 적합한 맑은 물로 정화시켜 흘러 보내주는 기능	산에 산림이 없다면 물을 정수하기 위해 비용이 수반되므로 부유물질 정수비용
토사유출 방지기능	우리나라 산림은 경사지에 위치하기 때문에 비가 내릴 경우에 토사의 유출이 발생할 가능성이 높지만 산림토양에는 낙엽이나 잡목이 쌓여 있어 이러한 낙엽이나 잡목은 토사유출을 방지할 수 있는 기능. 또한 뿌리는 지중으로 깊게 퍼지기 때문에 지면을 견고하게 함으로써 산사태가 발생하게 어렵게 하는 기능	산에 나무가 없어 토사가 유출될 경우 사방댐을 만들어 토사유출을 방지하기 위해 들어가는 대체비용
토사붕괴 방지기능	무림목지에서 붕괴발생으로 토사유출이 발생하는 것을 산림이 억제하는 기능	토사붕괴 방지량을 붕괴면적으로 환산하여 사방댐 건설비용이 아닌 산지사방복구비
공기정화 기능	나무는 흡수한 이산화탄소를 탄소 형태로 체내에 흡수함으로써 성장하는 광합성작용을 하는데, 이러한 광합성작용으로 인하여 이산화탄소를 흡수하고 동시에 산소를 방출함으로써 다시 말하면 이산화탄소의 흡수와 방출, 증발산작용이 탄소대기를 정화시키는 기능	이산화탄소흡수와 대기오염물질 흡수는 처리비용, 산소생산은 공업용 액체산소가격
산림휴양 기능	삼림욕이나 하이킹, 캠핑 등과 같이 실외 레크리에이션에 산림을 이용함으로써 산림은 인간에게 마음의 평온을 주는 휴양공간을 제공하는 기능. 또한 산림이 다양한 생물체나 환경에 대한 학습의 장소를 제공하는 기능	총지출법 (gross expenditure method)

(계속)

생물 다양성 유지기능	산림에는 나무열매, 낙엽, 가지, 뿌리, 꽃, 수액 등과 같은 다양한 종류의 자원이 있으며 이에 맞는 다양한 종류의 생물체가 공생하고 있는데 이는 유전자의 보전, 생물종의 보전, 생태계의 보전을 의미하며, 기존의 조수보호와 천연기념물의 보호 혹은 야생동식물을 보호하는 기능	야생동물보호기능은 해충방제비, 수렵편익은 지불의사액과 수렵장수입액으로 계산
-------------	--	---

자료: 채미옥외, 2010:19. 재인용

2. 산림의 공익기능 계량화 방법

산림의 공익기능을 정량적으로 계측하기 위해서 선행되어야 하는 것은 산림의 어떠한 공익기능을 정량화할 것인지를 결정하는 일이다. 우선 산림의 공익기능 중 정량적인 부분을 살펴보면 공기정화기능, 수자원함양기능, 생물다양성유지, 국토보전유지 등이 있으며, 정성적인 기능으로는 생활환경형성, 문화유산유지, 보건휴양, 산림경관 등이 있다. 이 연구에서는 정량적인 기능부문 중에서 대표적인 지표인 산림의 수원함양기능, 토사유출방지기능, 공기정화기능을 선정하여 계량화하였다. 김종호 외(2010: 19-39, 59-71, 87-101)는 연구 보고서에서 정량화하고자 하는 3가지 대표지표에 대한 계량화 방법론을 제시하고 있다.

1) 수원함양기능 계량화 방법

산림의 수원함양기능은 여러 가지 방법으로 추정할 수 있는데, 여기서는 산림토양의 물 저장량 추정에 의한 방법을 이용하여 산림의 수원함양기능을 계량화하였다. 산림토양 속에 저류된 물은 중력에 의해 하부로 이동하여 지하수나 계류수로 빠져나가는데, 이동하는 속도는 토양의 공극¹⁾ 크기에 따라 다르다. 토양의 조공극률²⁾은 토양시료(100cc)를 포화시킨 후 pF³⁾측정기를 이용하여 모관수 정지점 즉 수주압으로 102.7cm(pF2.7)의 압력에서 빠져나오는 물의 양으로 측정하며, 가용수자원을 판단하는 기준으로 이용한다. 산림의 조공극량은 산림수자원의 실제량이기 보다는 잠재 저류량에 가깝다. 현실적으로 토양의 조공극량이 아무리 많아도 강수량이 조공극량을 채울 수 없을 만큼 적게 내린다면 실제 산림수자원량은 조공극량보다 적을 것이다. 연중 강수에 따라 산림토양의 함수율은 최대 60%에서 최

1) 토양 입자 사이의 틈을 말하며, 입자의 크기가 고를수록 입자 사이의 틈이 많아 공극이 커진다. 이는 크기가 비슷한 둥근 자갈층은 자갈과 모래로 섞여 있는 토양보다 틈이 많음을 뜻하며, 토양의 공극은 토양의 특성을 결정하는 투수율과 밀접한 관련이 있다.

2) 토양의 전체 부피 중에서 공극이 차지하는 부피의 비를 백분율로 나타낸 것

3) 토양이 물을 끌어당기고 있는 힘을 나타내는 단위

소 20%까지 변화하지만 연평균은 대략 숲의 조공극률과 비슷한 값을 나타낼 것이다.

$$P_{na} = \frac{40.0}{1 + (0.6e^{-0.03age})}$$

$$P_{nb} = \frac{35.0}{1 + (0.25e^{-0.01age})}$$

여기서 Pna : 침엽수림의 A층 토양 조공극률
 Pnb : 침엽수림의 B층 토양 조공극률
 age : 임령

$$D_{na} = \frac{50.0}{1 + (0.29e^{-0.01age})}$$

$$D_{nb} = \frac{45.0}{1 + (0.6e^{-0.02age})}$$

여기서 Dna : 활엽수림의 A층 토양 조공극률
 Dnb : 활엽수림의 B층 토양 조공극률
 age : 임령

$$M_{na} = \frac{45.0}{1 + (0.6e^{-0.02age})}$$

$$M_{nb} = \frac{40.0}{1.2 + (4.0e^{-0.07age})}$$

여기서 Mna : 혼효림의 A층 토양 조공극률
 Mnb : 혼효림의 B층 토양 조공극률
 age : 임령

우리나라 전체 산림의 수원함양기능은 임상별 임령에 따른 산림토양의 조공극률의 변화를 기준으로 계량화하였다. 즉, 산림의 수원함양량은 임상별 산림면적과 모암의 분포비율 그리고 모암별 평균토심에다 조공극률을 곱하여 산출된다. 조공극량은 산림면적과 토양의 조공극률에 의해 결정되고, 토양의 조공극률은 임상별 임령의 증가에 따라 결정된다. 산림의 수원함양량 결정 요인에 있어서 모암의 분포비율이나 평균 토심은 거의 변하지 않는다고 볼 수 있으므로, 임상별 산림면적의 변화와 임상별 임령의 증가가 수원함양량을 결정하는 주요 요인이라고 볼 수 있다.

$$W_{ij} = A_{jk} \times S_i \times D_i \times F_{jk} \times 100$$

여기서 W_{ij} : i유형 모암과 j유형 입상의 저류량(수원함양량)

A_{jk} : j유형 입상과 k영급 입령의 산림면적

S_i : i유형 모암의 분포비율

D_i : i유형 모암의 토층별 평균토심

F_{jk} : j유형 입상과 k영급 입령의 조공극량

i : 화성암, 변성암, 현무암, 퇴적암1, 퇴적암2, 석회암

j : 침엽수, 활엽수, 혼효림, 죽림, 무림목지

k : I 영급, II영급, III영급, IV영급, V영급, VI영급

2) 토사유출방지기능 계량화 방법

산림의 토사유출방지기능은 입목지와 무림목지에서 토사유출량의 차이로 평가할 수 있다. 그러나 우리나라에서는 1960년대 이후 본격적으로 수행된 황폐지 치산녹화사업으로 인하여 무림목지가 거의 남아있지 않은 상태이다. 따라서 무림목지에서 토사유출량은 입목지 대상구역의 저수지 상류 집수유역을 대상으로 미 농무성에서 발표한 토양유실예측공식(universal soil loss equation, USLE)⁴⁾에 적용하여 산출하였다. 입목지에서의 토사유출량은 구성모암에 따라 크게 다르기 때문에 모암별 입상별 토사유출량이 필요하다. 입목은 매년 성장하고 산림면적 또한 매년 줄어들고 있어 산림의 기능 평가에는 산림환경변화에 대한 고려가 있어야 할 것이다. 따라서 김종호외(2010:59-71)는 각 저수지 구역의 모암별 산림의 평균입령과 토사유출량과의 관계를 밝혀 토사유출방지기능을 평가하였다.

$$Y_{\text{화}} = 1.4431 \times e^{-0.0233x}$$

$$Y_{\text{변}} = 4.7115 \times e^{-0.0694x}$$

$$Y_{\text{퇴}} = 1.2808 \times e^{-0.0280x}$$

여기서 $Y_{\text{화}}$: 화성암 지역의 토사유출량

$Y_{\text{변}}$: 변성암 지역의 토사유출량

$Y_{\text{퇴}}$: 퇴적암 지역의 토사유출량

x : 입령

즉, 농지개량조합 관할 1,350개소의 저수지중 107개소를 선정하여 유역면적, 계획저수량,

4) 연간 단위면적당 토양유실량을 추정하는 식으로 강우(R), 토양침식성(K), 경사도(LS), 식생피복(C)과 보전관리(P) 인자로 구성되며 유실량(A) = R×K×LS×P×C 이다.

1992년 현재 저수량, 퇴사량, 설치년도 등 저수지 현황을 조사하였는데, 2003년에 이중 65 개소를 선별하여 모암, 영급, 토사유출량을 분석하여 모암별 임령과 토사유출량과의 관계를 회귀식으로 도출하고 이를 기초로 모암별 임령증가에 따른 입목지 토사유출량을 산정하였다.

무림목지의 토사유출량은 토양유실예측공식 중 일부인 잠재토양유실량공식을 활용하여 강우인자(rainfall factor, R), 토양침식인자(soil erosion factor, K), 경사인자(slope factor, LS)를 이용하여 산출하였다(정 등, 1983: 112-118, 한국토양비료학회지). 강우인자(R)는 연평균강수량을 이용하였고, 토양침식인자(K)는 토성별 침식인자값을 적용하여 화강암, 기타화성암 지역은 0.29를, 편마암, 기타변성암, 퇴적암지역은 0.24를 적용하였다. 경사인자(LS)는 보정인자를 포함한 지역의 평균경사 산출방법을 이용한 결과를 적용하였다.

$$\text{토사유출방지량} = \text{무림목지 토사유출량} - \text{입목지 토사유출량}$$

$$P_i = ((S_i \times E_i) - (S_i \times Y_i)) \times AF$$

- 여기서 P_i : i 유형 모암의 토사유출방지량
 S_i : i 유형 모암의 분포비율
 E_i : i 유형 모암의 무림목지 토사유출량
 Y_i : i 유형 모암의 입목지 토사유출량
 AF : 입목지 면적
 i : 화강암, 기타화성암, 편마암, 기타변성암, 퇴적암

3) 공기정화기능 계량화 방법

이산화탄소 총흡수량은 성장량 즉 각 년도의 임목축적 증가량을 토대로 계산하는 방법을 적용하였다. 이때 임목축적은 각 연도의 변동 폭을 줄이기 위하여 IPCC⁵⁾ 가이드라인에서 권장하는 3년 이동평균값을 사용하였다.

$$\text{총흡수량} = (\text{당해년 3년평균 임목축적} - \text{전년도 3년평균 임목축적}) \times \text{전환계수}$$

$$\text{전환계수} = \text{임상별 용적비중} \times \text{바이오매스 확장계수} \times \text{탄소전환계수}$$

임상별 용적비중 : 침엽수 0.47 활엽수 0.80
 임상별 바이오매스 확장계수 : 침엽수 1.6512 활엽수 1.7202

5) Intergovernmental Panel on Climate Change

3. 산림자원 및 공익기능 모형개발을 위한 지표 선정

모형을 개발하기 위해서는 산지전용허가를 비롯한 외부요인에 의해 변화하는 산림자원을 전망하고, 산림자원의 변화로 인한 공익기능량을 추정하는데 필요한 지표들을 도출하여야 한다. 조운숙외(2013:12-13)는 연구보고서에서 『산림자원 및 공익기능량 추정모형』을 개발하기 위해 다루어야 하는 주요 지표를 제시하였다. 이 지표들을 산림자원 변화, 수원함량 기능량 변화, 토사유출방지 기능량 변화, 대기정화 기능량 변화, 산림의 공익가치 변화 등으로 분류하여 재구성하였고, 이 연구에서 중점적으로 분석할 주요 지표와 이를 전망하기 위해 개발해야 할 서브모형들을 <표 2>에 정리하였다.

<표 2> 산림자원 및 공익기능량 전망 지표

구 분	주요 지표	관련 변수	서브모형
산림자원 변화	산림면적 및 임목축적 임상별 영급별 산림면적 임상별 영급별 임목축적	산림면적 임목축적 임상별 산림면적 영급별 산림면적 임상별 임목축적 영급별 임목축적	산림자원 서브모형
수원함양 기능량 변화	임상별 모암별 A층 저류량 임상별 모암별 B층 저류량 임상별 연간 저류량 증가분 수원함양가치	임상별 A층 조공극량 임상별 B층 조공극량 임상별 모암별 A층 저류량 임상별 모암별 B층 저류량 임상별 연간 저류량 산림의 수원함양가치	수원함양 서브모형
토사유출방지 기능량 변화	모암별 임목지 토사유출량 모암별 무림목지 토사유출량 연간 토사유출방지량 토사유출방지 가치	임령고려 모암별 토사유출량 모암별 무림목지 토사유출량 당해 토사유출방지량 토사유출방지 가치	토사유출방지 서브모형
공기정화 기능량 변화	임상별 임목축적 증가량 임상별 CO ₂ 흡수량 산소생산량 공기정화가치	최근 3개년 임상별 임목축적 임상별 CO ₂ 저장량 당해 CO ₂ 흡수량 당해 CO ₂ 흡수가치 산소생산량 공기정화가치	대기정화 서브모형
산림의 공익가치 변화	산림의 총공익가치	산림의 총공익가치 산림의 단위면적당 공익가치	

4. 주요 통계자료

「산림자원 및 공익기능량 추정모형」을 구성하는 각 서브모형을 개발하는데 사용된 주요 자료는 <표 3>에서 보는 바와 같다. 가장 핵심이 되는 자료로는 산림청에서 제공하는 임업 통계연보와 산림기본통계가 있다. 모든 자료는 2000년부터 2010년까지의 자료를 사용하는 것을 원칙으로 하였으며, 공익기능량과 관련된 자료는 김종호 외(2010)가 도출한 시점의 자료값을 사용하고, 모형의 초기값은 시물레이션 시작시점인 2000년의 자료를 사용하였다.

<표 3> 「산림자원 및 공익기능량 추정모형」 개발에 사용한 주요 자료

모형명	자료명	주요 자료 항목	자료출처
산림자원 서브모형	산림면적	임상별 산림면적, 영급별 산림면적 임상별 영급별 산림면적	산림청, 산림기본통계 산림청, 임업통계연보
	임목축적	임상별 임목축적, 영급별 임목축적 임상별 영급별 임목축적	산림청, 산림기본통계 산림청, 임업통계연보
수원함양 서브모형	산림면적	임상별 영급별 산림면적	산림청, 산림기본통계 산림청, 임업통계연보
	공극율	임상별 토층별 공극율 산출방식	김종호 외(2010)
	산림토양	모암의 분포비율 모암별 토층별 평균토심	김종호 외(2010)
토사유출방지 서브모형	산림면적	영급별 산림면적 입목지 산림면적	산림청, 산림기본통계 산림청, 임업통계연보
	산림토양	모암의 분포비율	김종호 외(2010)
	토사유출량	모암별 영급별 단위 토사유출량 모암별 무림목지 토사유출량	김종호 외(2010)
대기정화 서브모형	임목축적	3년 평균 임상별 임목축적	산림청, 산림기본통계 산림청, 임업통계연보
	용적비중	임상별 용적비중	김종호 외(2010)
	바이오매스 확장계수	임상별 바이오매스 확장계수	김종호 외(2010)

III. 산림자원 및 공익기능량 추정모형 개발

1. 모형의 설계

1) 모형의 목적

「산림자원 및 공익기능량 추정모형」은 김종호 외(2010)가 제시한 산림의 공익기능을 계량화하는 방법론을 시스템다이나믹스에 적용한 모형이다. 이 모형은 산림자원의 변화에 따른 공익기능량 및 공익기능가치를 시간의 흐름에 따라 시계열적으로 평가하는 한편, 산지 전용 허가면적을 조절하는 정책에 따른 파급효과를 분석하는데 그 목적이 있다. 이 모형은 산림자원 서브모형, 수원함양기능 서브모형, 토사유출방지기능 서브모형, 대기정화기능 서브모형 등 총 4개의 서브모형으로 구성되며, 서브모형별 목적은 <표 4>와 같다.

<표 4> 「산림자원 및 공익기능량 추정모형」의 서브모형별 목적

서브모형명	목적
산림자원 서브모형	공익기능량을 평가하는 근본 대상이 되는 산림면적, 임목축적 등 산림자원을 나타내는 지표들의 변화량을 산출하고 미래의 지표값 전망
수원함양 서브모형	임상별 임령변화에 따른 모암별 토양의 조공극률 증가예측모형을 이용한 산림의 수원함양기능의 변화량 산출 및 전망
토사유출방지 서브모형	모암별 임령변화에 따른 토사유출량 회귀식을 토대로 모암별 임목지의 토사유출량을 산출하고, 모암별 무림목지 토사유출량을 잠재토양유실량공식으로 산출하여 산림의 토사유출 방지량의 변화량 산출 및 전망
대기정화 서브모형	임상별 임목축적 변화에 따른 3개년 평균 임목축적을 산출하고, 연간 평균임목축적 증가량에 따른 CO ₂ 와 O ₂ 흡수량 산출 및 전망

2) 모형의 적용범위

이 연구에서는 산림면적, 임목축적 등 산림자원 관련 주요 지표에 대해 과거추세를 분석하여 미래의 지표값을 예측하였다. 모형의 타당성 검증과 파라미터를 도출하기 위해 과거 추세를 분석하는 과정에서는 2000년에서 2010년까지 과거 10년 동안을 분석기간으로 설정했다. 그리고 각종 변수에 대한 미래의 추세를 예측하기 위한 시간적 범위는 2010년부터 2040년까지 30년간으로 설정하였다.

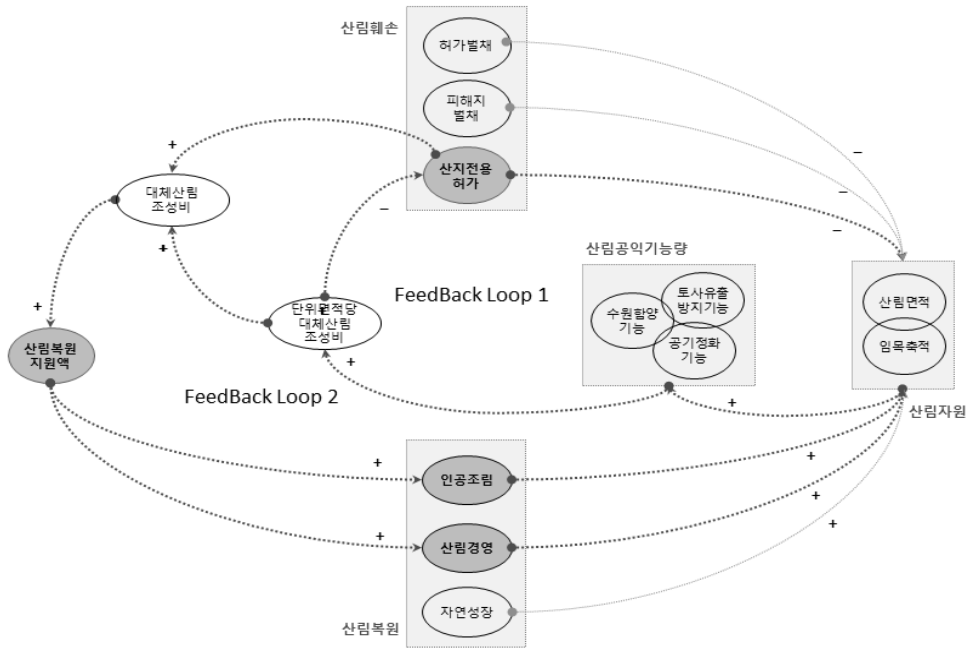
이 연구의 공간적 범위는 모형의 완성도를 감안하여 전국단위로 하였으며, 지역적으로 세분화를 하고자 할 경우에는 지역별 산림특성에 대한 통계자료와 산지전용허가 행태에 대

한 분석자료를 보완하여 적용하여야 한다.

2. 인과관계도 작성

1) 「산림자원 및 공익기능량 추정모형」의 인과관계도

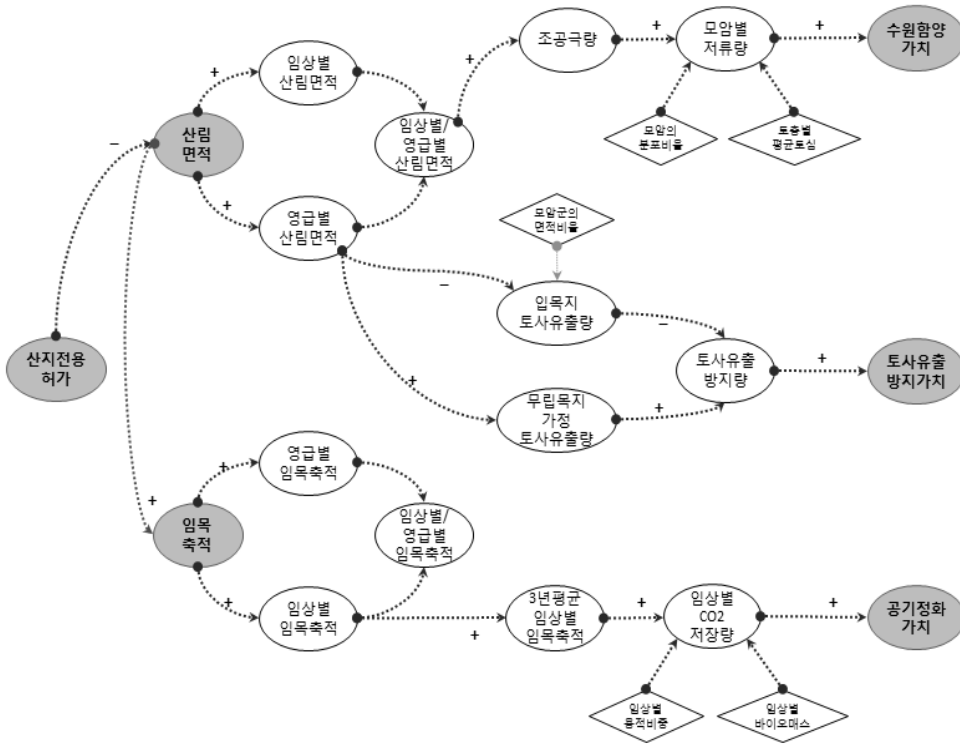
「산림자원 및 공익기능량 추정모형」에 대한 인과관계도는 [그림 1]과 같다. 산지전용허가는 산림자원의 훼손을 야기하고 이로 인해 산림의 공익기능량을 감소시키게 된다. 산지전용 허가시 지불해야 하는 대체산림 조성비를-조세저항으로 인하여 현실적으로 어려울 수 있으나-산림의 공익기능량에 연동한다면 공익기능량이 큰 지역은 산지전용허가를 억제하는 효과를 얻을 수 있고, 한편으로는 산림훼손의 규모나 정도에 따라 산림공익 예산을 확보하게 되어, 이 예산을 산림경영 또는 산림복원에 지원함으로써 훼손한 산림자원을 복원하거나 추가적인 산림자원 확보를 할 수 있는 선순환 구조를 갖추게 된다.



[그림 1] 「산림자원 및 공익기능량 추정모형」의 인과관계도

2) 공익기능량 서브모형의 인과관계도

공익기능량을 산출하는 서브모형은 산림자원의 변화에 따른 유형별 공익기능량을 산출해 내는 모형으로, 추후 산림자원 또는 산림의 공익기능량에 대한 정책 파급효과를 분석하

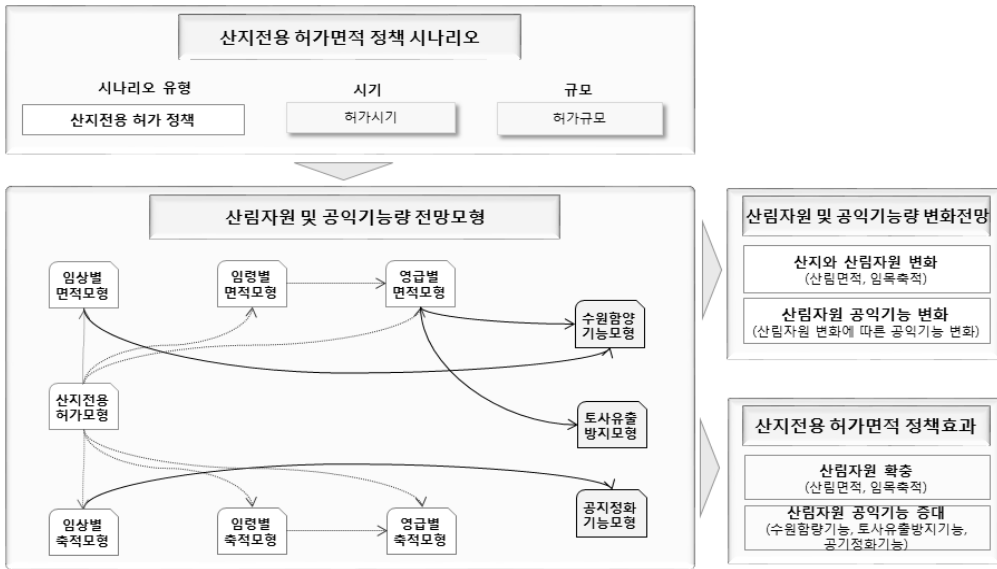


[그림 2] 공익기능량 서브모형의 인과관계도

는데 사용할 수 있는 모형이다. 산림자원에 따른 공익기능량을 산출해 내는 인과관계도는 [그림 2]와 같다. 사실 이 인과관계도는 인과관계도 본연의 역할보다는 공익기능량 산출방식을 표현한 데이터 흐름도에 더 가깝다. 산지전용 허가면적의 증가는 산림면적과 임목축적의 감소를 유도한다. 임상별·영급별 산림면적의 증가는 조공극량의 증가를 가져오고, 이는 모암별 저류량을 증가시켜 수원함양가치를 높이게 된다. 영급별 산림면적의 증가는 입목지 토사유출량의 감소를 유도하여 토사유출 방지량의 증가를 가져오게 된다. 임상별 임목축적의 증가는 임상별 CO₂ 저장량의 증가를 가져와 공기정화가치를 높이게 되는 인과관계를 맺고 있음을 알 수 있다.

3. 모형 프레임워크

[그림 3]에서 보는 바와 같이, 「산림자원 및 공익기능량 추정모형」은 산지전용 허가정책 시나리오부문, 산림자원 및 공익기능량 모형부문, 산림자원 및 공익기능량 전망부문, 산지전용 허가면적 통제정책에 의한 산림자원 및 공익기능량 추정 및 파급효과부문 등 4개의



[그림 3] 산림자원 및 공익기능량 추정모형 프레임워크

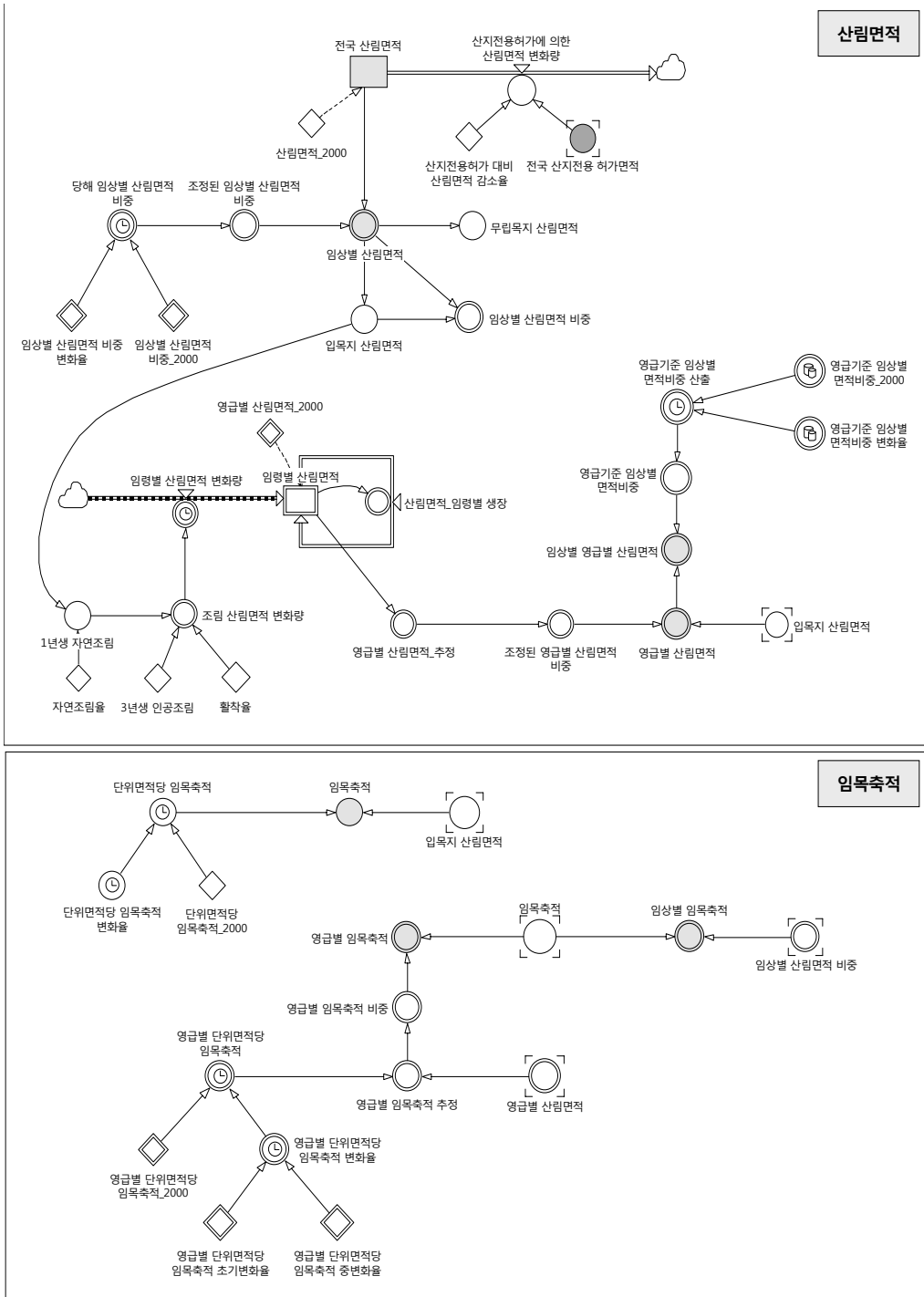
부문으로 구성된다.

4. 시스템 흐름도

1) 산림자원 서브모형의 시스템 흐름도

산림자원의 변화를 시뮬레이션하기 위한 산림자원 서브모형의 시스템 흐름도는 [그림 4]에서 보는 바와 같다. 산림자원은 임상별 산림면적과 임목축적, 영급별 산림면적과 임목축적, 임상별 영급별 산림면적과 임목축적으로 세분되어 있다. 산림자원은 자연적 요인과 인위적 요인으로 변화하는데, 자연적 변화는 추세를 분석하여 적용하였으며 인위적 변화는 정책변수로 하여 통제(control)할 수 있도록 하였다.

시스템 흐름도에서 보는 바와 같이 산림면적의 감소는 기존 추세에 따라 변화하는 것으로 근간으로 하고, 정책적 통제에 따라 변화할 것으로 추정되는 산지전용 허가면적의 증감추세와 변화량이 반영되도록 구성하였다. 임상별 산림면적은 산림의 임상별 구성비에 따라 결정되는데, 정책통제에 의해 임상별 구성비가 변할 가능성이 낮으므로 기존의 구성비가 유지되는 것으로 모형을 구성하였다. 임령별 산림면적은 어떠한 추세에 의해 변화하는 것이 아니라, 현재 식재되어 있는 임목의 수령에 따라 결정되는 것이므로 2000년도의 임령별 산림면적을 연도별로 균등 분할하여 1년 단위의 임목축적으로 변환한 후 매년 임령이 1년

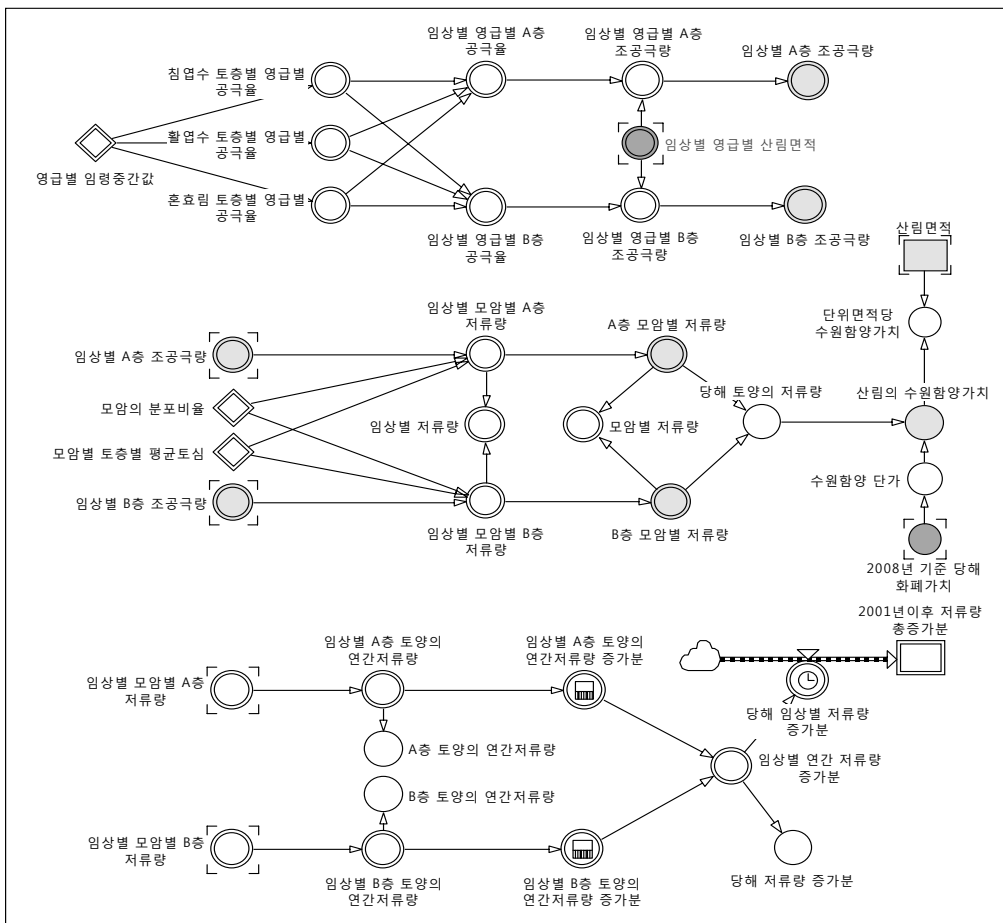


[그림 4] 산림면적 서브모형의 시스템 흐름도

씩 증가하도록 자료를 재구성하였다. 이러한 통계자료의 임의적인 분할은 시물레이션 과정에서 일시적으로 오차의 형태로 나타나게 되나, 10년이 경과한 후에는 정상적인 전망값을 산출하게 된다. 임목축적의 경우는 영급별 산림면적과 밀접하게 관계되어 있으므로 영급별 단위면적당 임목축적을 산출한 후, 산림면적의 변화에 따라 자동적으로 산출되도록 하였다.

2) 수원함양 서브모형의 시스템 흐름도

산림자원의 변화에 따른 수원함양기능량을 산출하기 위한 수원함양기능 서브모형의 시스템 흐름도는 [그림 5]와 같다. 산림의 수자원함양량을 산출하기 위해서는 먼저 임상별 영급별 A층 공극율과 B층 공극율을 산출하는 부분과 모암별 저류량을 산출하는 부분 그리고 이를 경제적 가치로 환산하는 부분으로 구성된다. 산림의 수원함양은 임상별 영급별 산

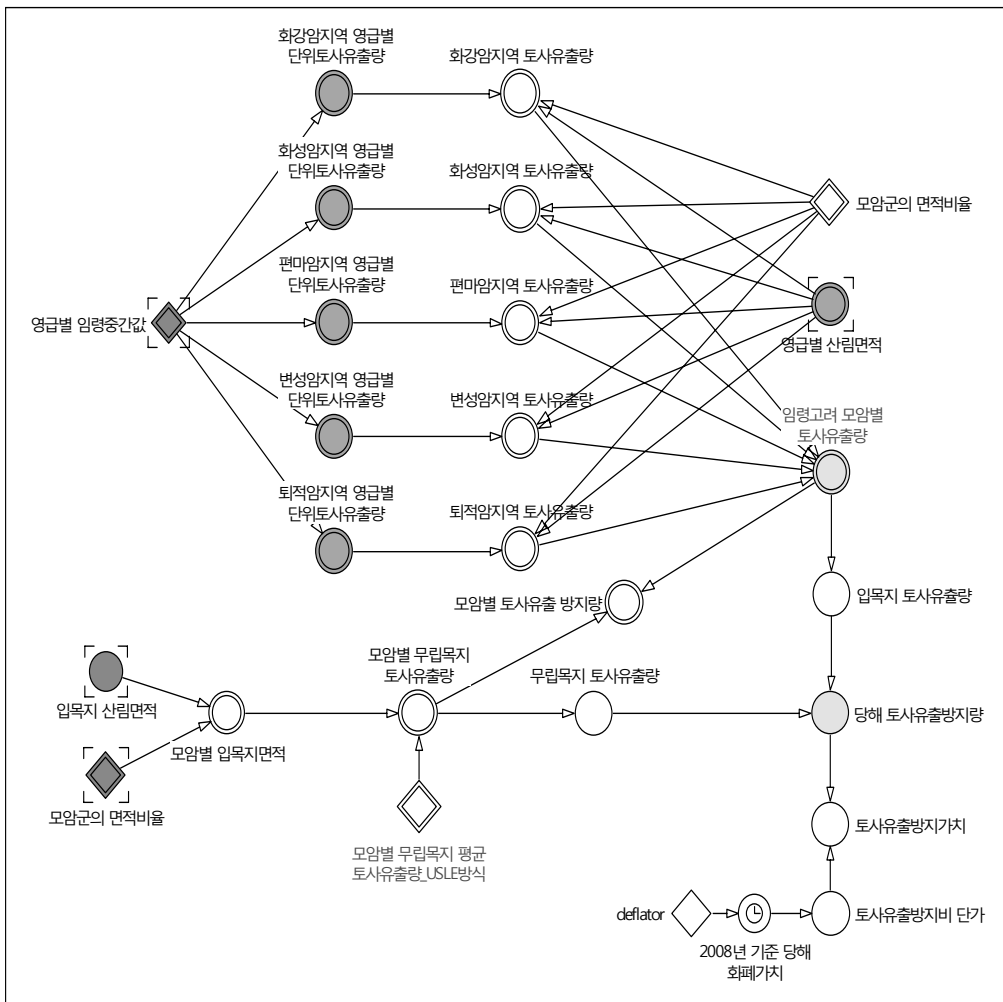


[그림 5] 수원함양 서브모형의 시스템 흐름도

림면적에 의해 달라지며, 임상별 영급별 산림면적은 산림자원 서브모형에서 시뮬레이션된 결과값을 이용하였다.

3) 토사유출방지 서브모형의 시스템 흐름도

산림자원의 변화에 따른 토사유출방지량을 산출하기 위한 토사유출방지 서브모형의 시스템 흐름도는 [그림 6]과 같다. 산림의 토사유출량을 산출하기 위해서는 모암별 영급별 토사유출량을 산출하는 부분과 모암별 무림목지 토사유출량을 산출하는 부분 그리고 그 차이를 토사유출 방지량으로 산출하고 이를 경제적 가치로 환산하는 부분으로 구성된다. 산

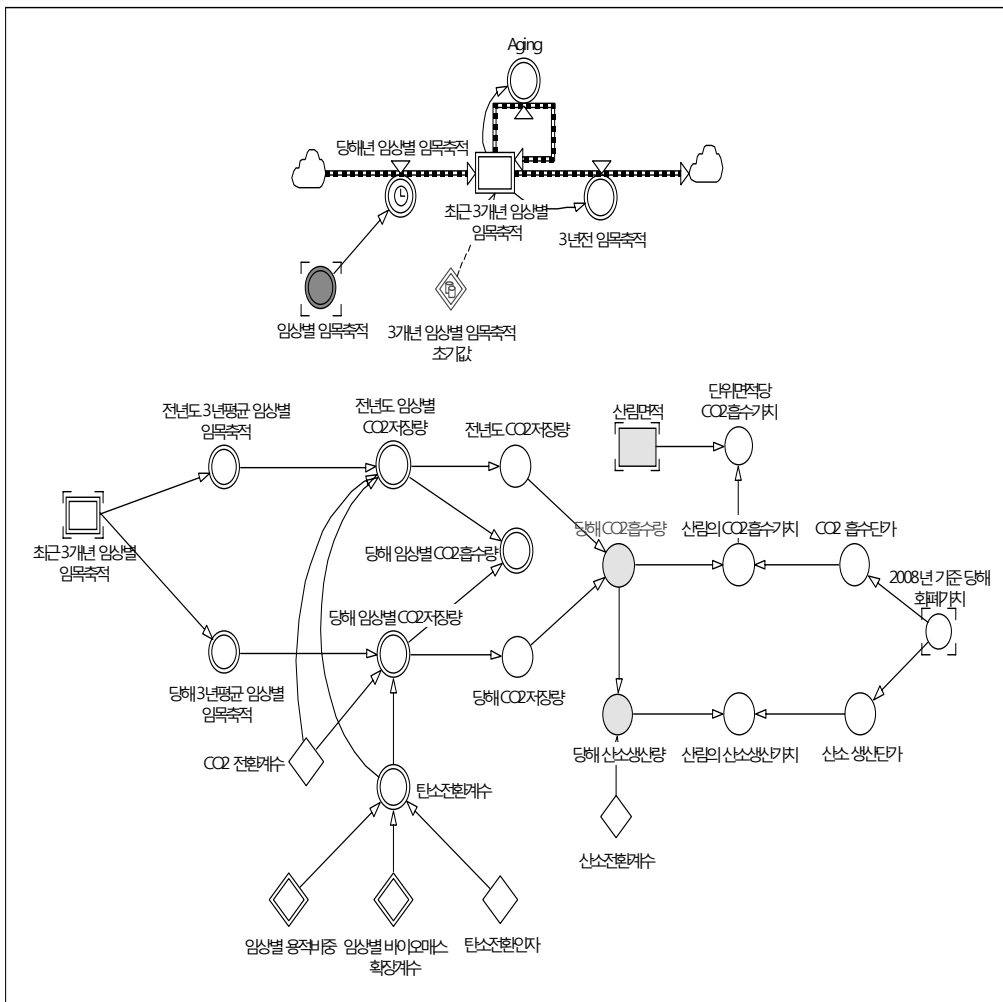


[그림 6] 토사유출방지 서브모형의 시스템 흐름도

림자원의 토사유출 방지량은 영급별 산림면적에 의해 달라지며, 영급별 산림면적은 산림자원 서브모형에서 시뮬레이션된 결과값을 이용하였다.

4) 공기정화 서브모형의 시스템 흐름도

산림자원의 변화에 따른 공기정화 기능량을 산출하기 위한 공기정화 서브모형의 시스템 흐름도는 [그림 7]과 같다. 산림의 CO₂ 저장량을 산출하기 위해서는 최근 3개년 평균 임상별 임목축적을 산출하는 부분과 임상별 CO₂ 저장량을 산출하는 부분 그리고 이를 경제적 가치로 환산하는 부분으로 구성된다. 산림의 CO₂ 저장량은 임상별 임목축적에 의해 달라



[그림 7] 공기정화 서브모형의 시스템 흐름도

지며, 임상별 임목축적은 산림자원 서브모형에서 시뮬레이션된 결과값을 이용하였다.

5. 모형정립

앞 절에서 작성한 시스템 흐름도를 통해 짜인 모형의 개념적 구조와 방정식을 토대로 관련 통계자료를 분석하고 주요 파라미터를 도출한 후 실제 수치값을 모형에 적용하였다.

1) 산림면적

특정시점(t)의 산림면적(A_t)은 전기(t-dt)의 산림면적에 두 기간 사이(dt)의 면적변화율로 계산하는 방정식이 성립된다. 산림면적의 초기값은 시뮬레이션 시작년도인 2000년도의 산림면적으로 설정하였고, 연도별 산림면적을 사용하여 산출된 연간 변화율에 따라 해당 연도의 산림면적이 산출되도록 하였다.

2) 임목축적

임목축적은 어떠한 추세에 의해 변화하는 것이 아니라, 산림면적과 현재 식재되어 있는 임목의 수령에 큰 영향을 받으므로 <표 5>와 같이 영급별 단위면적당 임목축적을 산출한 후, 영급별 산림면적의 변화에 따라 자동적으로 산출되도록 개발하였다. 즉, 산출된 영급별 단위면적당 임목축적에 해당연도의 영급별 산림면적을 곱하면 당해의 영급별 임목축적을 산출해 낼 수 있게 되는 것이다.

$$D_{it} = A_{it} * r_{it}$$

$$r_{it} = r_{i0} \times e^{\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{r_t}{r_0}\right)$$

여기서 D_{it} : i영급 t시점의 임목축적

A_{it} : i영급 t시점의 산림면적

r_{it} : i영급 t시점의 단위면적당 임목축적

i : I 영급, II 영급, III 영급, IV 영급, V 영급, VI 영급

〈표 5〉 영급별 단위면적당 임목축적

(단위: m³/ha)

구분	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	λ (2000-2010)
총계	65	68	72	75	78	81	84	101	106	113	130	0.0690149
I령	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
II령	42	43	45	48	44	46	49	60	66	73	57	0.0313339
III령	62	63	63	64	64	67	70	85	91	98	113	0.0592975
IV령	96	99	102	104	107	110	115	136	143	151	136	0.0343288
V령	131	133	135	137	140	142	146	176	183	191	157	0.0181034
VI령	164	170	174	177	182	195	200	226	233	240	185	0.0118261

3) 공익기능량

이 연구에서 구현한 산림의 수원함양기능, 토사유출방지기능, 공기정화기능의 계량화 방법은 김중호 외(2010)가 제시한 방법론을 준용하여 적용하였다. 따라서 공익기능량별 계량화 방법은 앞의 선행연구부분에 기술된 내용을 참조하면 된다.

4) 산지전용 허가면적 조절정책에 따른 산림자원의 변화량 산출

산림면적의 변화는 여러 가지 요인에 의해 발생한다. 산림면적을 증가시키는 행위로는 인공조림이나 숲가꾸기 등이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있으며, 산림면적을 감소시키는 요인으로는 산지전용허가로 인한 산지의 감소가 가장 크다고 볼 수 있다. 따라서 산지전용허가에 따른 산림면적의 변화량을 산출해 내는 것은 모형 개발에 있어 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 정책 구상에 대한 세부사항을 입력하는 방식에는 여러 가지가 있을 수 있으나, 이 연구의 모형에서는 산지전용 허가면적을 10년 단위로 화면에서 직접 입력하거나, 1년 단위의 산지전용 허가면적을 엑셀에서 입력할 수 있도록 구성하였다. 입력된 산지전용 허가면적과 기존 추세의 산지전용 허가면적의 차이를 산출한 후, 산지전용허가 대비 산림면적 감소비율에 따라 산림자원에 미치는 영향을 산출한다.

산지전용허가에 따른 산림면적의 감소라는 측면에서 볼 때, 당해 산지전용허가가 발생한 토지 중 일부 토지가 타용도로 전용되고, 이것이 산림면적의 감소로 나타난다. 이에 먼저 과거의 산지전용허가에 따른 산림면적의 감소현황을 살펴본 바, 지난 10년간 산지전용허가 면적 대비 타용도로 전용된 산지면적 및 전용비율은 〈표 6〉과 같다.

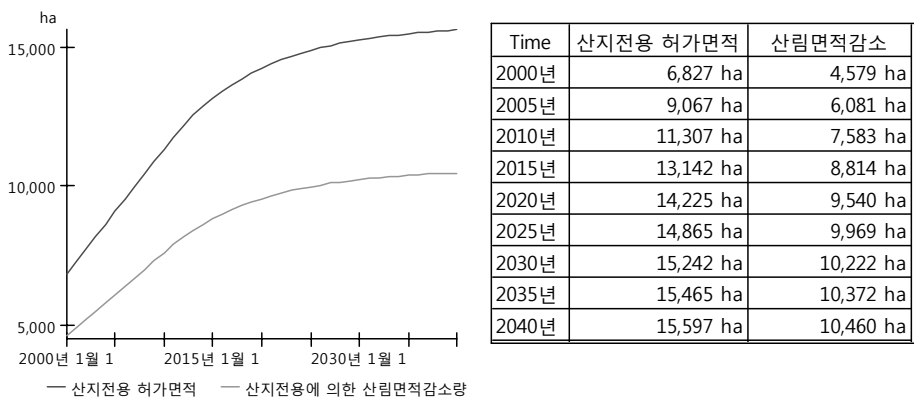
〈표 6〉에서 보는 바와 같이 지난 10년간 산지전용허가 면적 중 약 67% 정도가 다른 용도로 전용되어 산림면적을 감소시켰음을 알 수 있다. 이러한 산지전용허가에 따른 산림

〈표 6〉 산지전용허가에 따른 타용도 전용율

구 분	산지전용 허가면적 (ha)	산지가 타용도로 전환되어 감소한 면적(ha)	산지전용허가 대비 타용도전환 감소비율
2000년	6,827	5,462	0.800059
2001년	7,230	6,021	0.832780
2002년	6,867	6,383	0.929518
2003년	7,240	5,751	0.794337
2004년	8,042	5,772	0.717732
2005년	9,612	6,528	0.679151
2006년	8,901	4,594	0.516122
2007년	10,544	6,812	0.646055
2008년	13,739	8,790	0.639785
2009년	15,877	5,419	0.341311
2010년	11,851	5,693	0.480381
평 균	8,883	6,111	0.670657

자료: 산림청, 임업통계연보, 2011

면적 감소율을 반영하여 당해 연도의 산림면적 감소량을 산출하고, 당해 산지전용 허가면적에 실제 타용도로 전환되는 비율을 곱하여 산지전용 허가에 의해 감소하는 산림면적을 산출하면 된다. 산지전용 허가면적은 2000년 6,827ha에서 2010년 11,307ha로 증가하였고 2040년에는 15,597ha로 증가할 것으로 전망된다. 이에 따라 지난 10년간 산지전용허가 면적 중 타용도로 전용된 평균 전용율이 0.67이므로, 2011년 이후의 산지전용 허가추세에 따라 감소하는 산림면적은 <그림 8>과 같이 전망된다.



[그림 8] 산지전용 허가에 따른 산림면적 감소 전망

IV. 산지전용허가 통제정책의 파급효과 분석

1. 기본모형의 행태분석

모형의 행태(model behavior)란 특별한 정책의 도입이나 의사결정 없이(do-nothing policy) 현재의 여건 하에서 얻게 되는 각 변수들에 대한 모형의 시물레이션 결과를 의미한다. 복잡한 시스템을 반영하는 모형일수록 행태분석은 더욱 중요한 의미를 지닌다. 왜냐하면 모형내 변수들의 인과관계 및 순환환류 과정에 따라 나타나는 각 변수들의 행태를 통해서 비로소 모형작성자는 모형의 정확한 연계구조와 행태를 파악할 수 있기 때문이다. 특히 현상 추세를 반영하는 모형의 행태분석은 차후 정책(또는 대안) 비교 분석시, 각 정책의 영향과 파급효과를 파악하는데 기초자료가 된다.

산지전용허가에 따른 산림자원과 공익기능량의 변화를 추정하기 위해서는 먼저 어떠한 정책 시나리오도 도입하지 않았을 경우에 대한 주요 지표들의 전망값을 산출하여야 한다. 그 다음, 분석대상이 되는 정책 시나리오가 도입될 경우, 동일 지표들에 대한 전망값을 산출해 낸 후, 양자를 비교하여 그 차이만큼을 정책효과로 볼 수 있는 것이다. <표 7>은 어떠한 정책도 도입하지 않고 과거와 현재의 추세대로 산출된 기본모형의 시물레이션 결과값이다. 산림면적은 각각 2010년 637만ha에서 2040년 621만ha로 감소하고, 임목축적은 2010년 9.2억m³에서 2040년 47.2억m³로 크게 증가할 것으로 전망되었다. 저류량 증가량과 토사유출 방지량은 그 증가폭이 지속해서 줄어들 것으로 전망되고, CO₂ 흡수량은 지속적으로

<표 7> 주요 지표에 대한 기본모형의 행태분석 결과

구 분	산림자원보전효과		공익기능증대효과			
	산림면적	임목축적	저류량	토사유출 방지량	CO ₂ 흡수량	산림의 공익가치
연 도	만ha	억m ³	억톤	만m ³	억CO ₂ 톤	조 원
2010	636.9	9.2	135	192.1	1.16	36
2015	634.2	12.8	137	190.5	1.46	42
2020	631.6	17.5	138	188.8	1.84	50
2025	629.0	23.0	139	187.0	2.22	59
2030	626.4	30.0	140	185.0	2.77	71
2035	623.8	37.8	140	182.9	3.06	83
2040	621.2	47.2	139	180.7	3.77	101

로 증가할 것으로 전망된다.

2. 정책시나리오

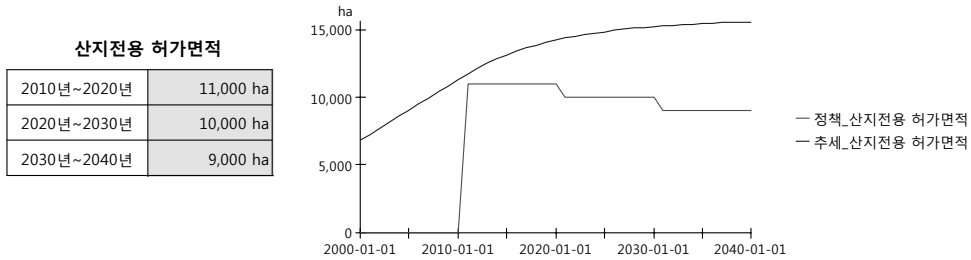
『산림자원 및 공익기능량 추정모형』에서 정책적으로 통제하고자 하는 변수는 산지전용 허가면적이다. 따라서 산지전용 허가면적에 대한 시기와 규모를 여러 가지 형태로 변화시키면서 모형을 시물레이션 할 수 있도록 구상하는 것이 필요하다. 산지전용 허가면적에 대한 정책시나리오는 정책 목적에 따라 다양할 수 있으나, 10년 단위로 허가면적을 통제하는 방법과 매년 허가면적을 임의로 통제하는 방법을 사용할 수 있도록 개발하였다. 10년 단위로 허가면적을 통제하는 시나리오는 모형을 쉽고 빠르게 시물레이션해 볼 수 있도록 해 주고, 매년 허가면적을 임의로 통제하는 방법은 특정 엑셀파일에 연도별 허가면적을 임의로 설정하도록 설계함으로써 사실상 모든 시나리오를 시물레이션 할 수 있도록 개발하였다. 여기서는 10년마다 산지전용 허가면적을 1000ha씩 축소시키는 시나리오 1과 매년 산지전용 허가면적을 100ha씩 축소시켜나가는 시나리오 2에 대해 시물레이션하고 그 파급효과를 분석하였다.

1) 시나리오 1 : 10년마다 산지전용 허가면적을 1000ha씩 축소

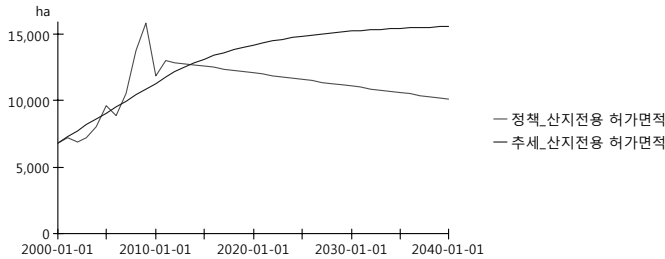
2000년부터 2010년까지의 평균 산지전용 허가면적이 1만2,000ha이므로, 10년 단위로 허가면적 규모를 1000ha씩 감소시켜 입력하고 시물레이션 하였다. 산지전용 허가면적은 추세상 지속적으로 증가하는 것으로 나타나므로 [그림 9]와 같이 산지전용 허가면적을 10년 단위로 1000ha씩 감소시켜 입력하면, 허가면적 규모는 1000ha와 추세적 증가분만큼 축소된다는 것을 알 수 있다.

2) 시나리오 2 : 매년 산지전용 허가면적을 100ha씩 축소

1년 단위로 허가면적 규모를 입력하도록 결과화면을 구성한다면 화면구성도 복잡해지고 허가면적 입력도 불편해진다. 따라서 1년 단위로 허가면적을 통제하고자 하는 정책을 편리하게 시물레이션할 수 있도록 엑셀파일을 이용할 수 있도록 구성하였다. 엑셀 파일에 연도별로 매년 산지전용 허가면적을 100ha씩 축소시켜 입력하고, 이를 모형에서 읽어 들이도록 하였다. [그림 10]은 시나리오 2에 의해 변경되는 산지전용 허가면적의 변화행태를 보여준다.



[그림 9] 10년마다 산지전용 허가면적을 1000ha씩 축소시킨 결과



[그림 10] 매년 산지전용 허가면적을 100ha씩 축소시킨 결과

3. 정책시나리오별 파급효과분석

1) 시나리오 1 : 10년마다 산지전용 허가면적을 1000ha씩 축소

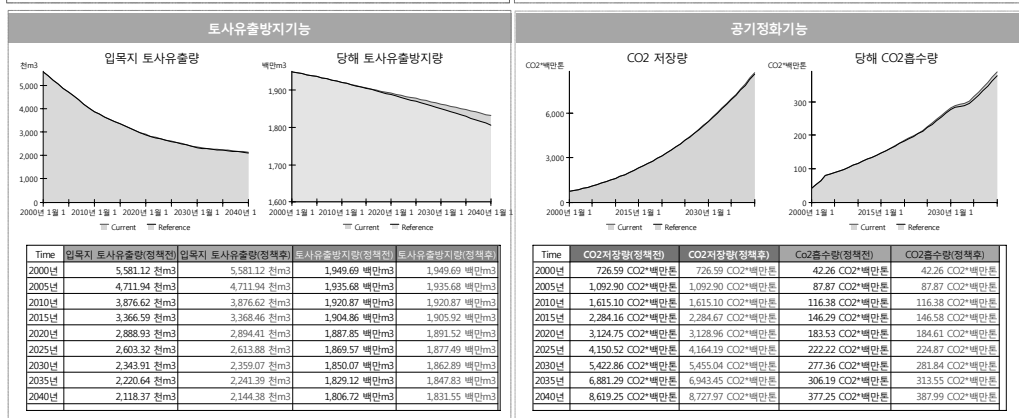
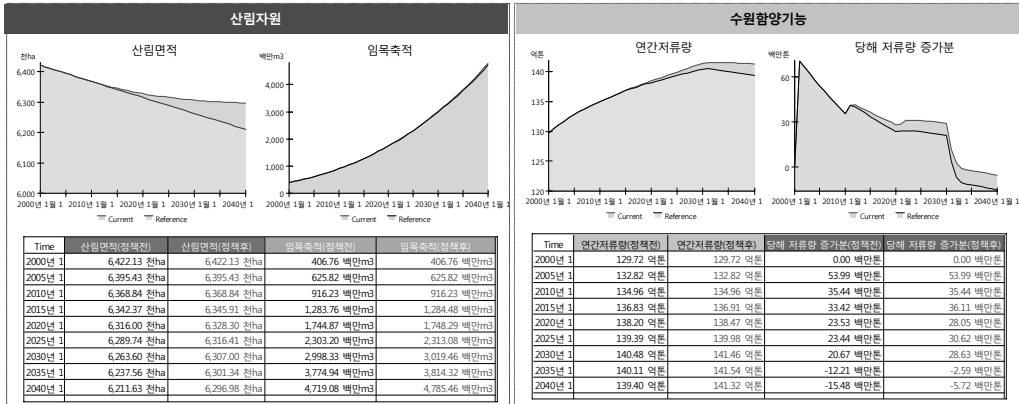
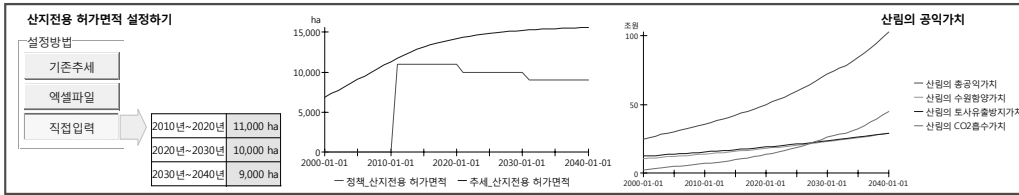
<표 8>은 시나리오 1에 따른 파급효과에 대해 주요 지표를 중심으로 결과값을 확인하여 정리한 표이고, [그림 11]은 시나리오 1에 따른 모형의 시뮬레이션 결과화면이다. 2040년을 기준으로 보면 산림면적은 8.5만ha, 임목축적은 0.7억m³, 산림의 총공익가치는 2.1조 원이 각각 증가하였다. 이는 산지전용 허가면적 억제정책의 효과로 산림자원 및 공익기능량이 크게 증가한다는 사실을 보여준다.

2) 시나리오 2 : 매년 산지전용 허가면적을 100ha씩 축소

<표 9>는 시나리오 2에 따른 파급효과에 대해 주요 지표를 중심으로 결과값을 확인하여 정리한 표이고, [그림 12]는 시나리오 2에 따른 모형의 시뮬레이션 결과화면이다. 2040년을 기준으로 보면 산림면적은 7.8만ha, 임목축적은 0.6억m³, 산림의 총공익가치는 1.9조 원이 각각 증가하였다. 이러한 결과를 통해 시나리오 1에 의한 정책파급효과가 시나리오 2에 의한 정책파급효과 보다 크다는 것을 알 수 있다.

〈표 8〉 시나리오 1 정책도입 효과분석

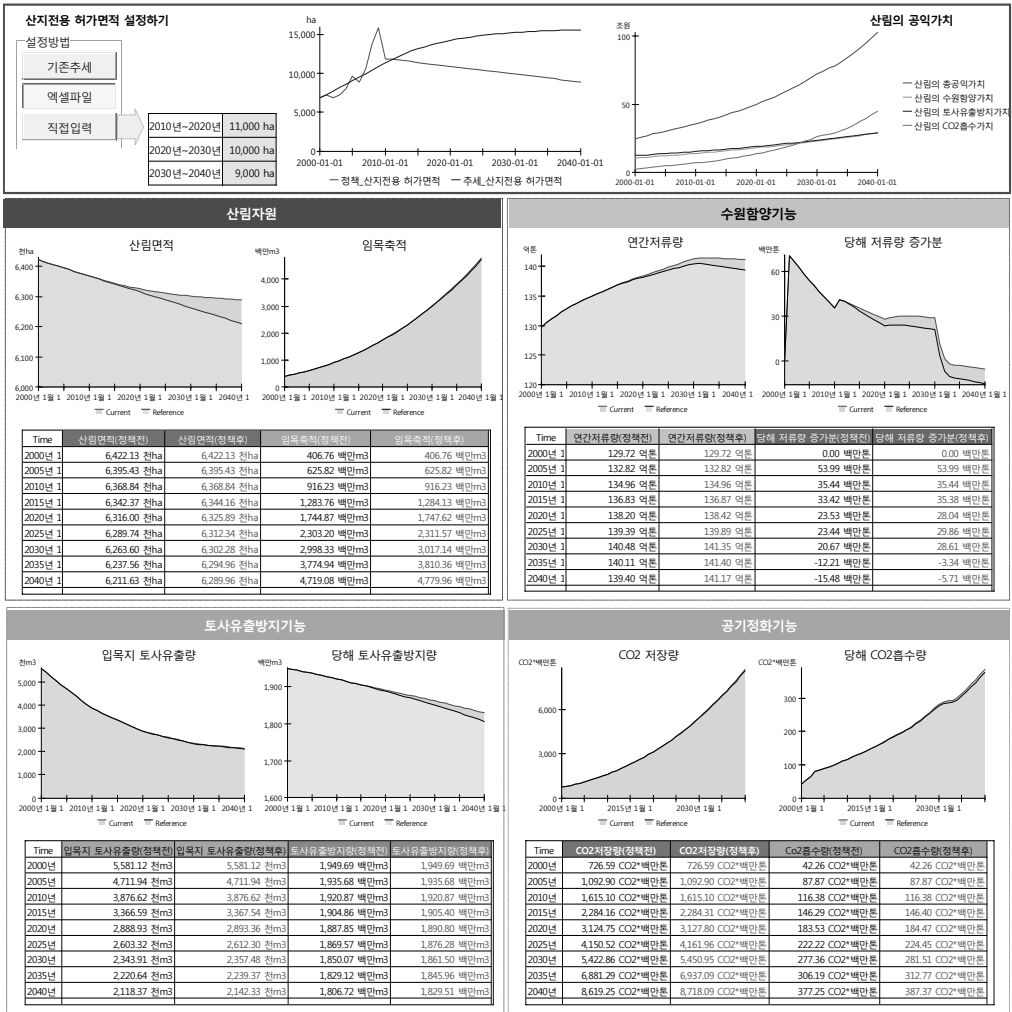
구 분	2020년			2030년			2040년				
	시나리오 1	기본 모형	정책 효과	시나리오 1	기본 모형	정책 효과	시나리오 1	기본 모형	정책 효과		
산림 자원 보전 효과	산림면적	만ha	632.8	631.6	1.2	630.7	626.4	4.3	629.7	621.2	8.5
	임목축적	억m ³	17.5	17.5	0.0	30.2	30.0	0.2	47.9	47.2	0.7
	저류량	억 톤	138.0	138.2	-0.2	141.0	140.5	0.5	141.0	139.4	1.6
공익 기능 증대 효과	토사유출 방지량	만m ³	189.2	188.8	0.4	186.3	185.0	1.3	183.2	180.7	2.5
	CO ₂ 흡수량	억CO ₂ 톤	1.9	1.8	0.0	2.8	2.8	0.0	3.9	3.8	0.1
	산림의 공익가치	조 원	50.0	50.0	-	72.0	71.5	0.5	103.0	100.9	2.1



[그림 11] 시나리오 1에 대한 시뮬레이션 결과화면

〈표 9〉 시나리오 2 정책도입 효과분석

구분	2020년			2030년			2040년				
	시나리오 2	기본 모형	정책 효과	시나리오 2	기본 모형	정책 효과	시나리오 2	기본 모형	정책 효과		
산림자원보전효과	산림면적	만ha	632.6	631.6	1.0	630.2	626.4	3.8	629.0	621.2	7.8
	임목축적	억m ³	17.5	17.5	0.0	30.2	30.0	0.2	47.8	47.2	0.6
	저류량	억톤	138.4	138.2	0.2	141.4	140.5	0.9	141.2	139.4	1.8
공익기능증대효과	토사유출방지량	만m ³	189.1	188.8	0.3	186.2	185.0	1.2	183.0	180.7	2.3
	CO ₂ 흡수량	억CO ₂ 톤	1.8	1.8	-	2.8	2.8	0.0	3.9	3.8	0.1
	산림의공익가치	조원	50.0	50.0	-	72.1	71.5	0.6	102.8	100.9	1.9



〈그림 12〉 시나리오 2에 대한 시뮬레이션 결과화면

V. 결론

1. 결과요약 및 시사점

이 연구에서는 산림자원의 미래변화를 예측하는 모형을 기반으로, 산림자원의 변화에 따른 공익기능량 변화를 동적으로 시뮬레이션할 수 있도록 모형을 개발한 후, 산지전용 허가면적을 정책적으로 통제할 경우 그에 따른 파급효과를 분석하였다. 이 연구의 분석결과와 시사점은 다음과 같다.

첫째, 우리나라 산림면적은 2010년 637만ha에서 2040년 621만ha로 감소할 것으로 전망된다. 임상별로는 활엽수림이 증가할 것으로 전망되고 침엽수림과 혼효림은 감소할 것으로 전망된다. 영급별로는 추가적인 묘목식재가 없을 경우 I영급, II영급, III영급은 지속적으로 감소하고 IV영급과 V영급은 특정연도에서 최대를 이룬 후 지속적으로 감소할 것으로 전망되며, VI영급은 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 임목축적은 2010년 9.2억 m^3 에서 2040년 47.2억 m^3 로 크게 증가할 것으로 전망된다. 임상별 임목축적은 모두 매년 증가할 것으로 전망되고, 영급별 임목축적은 VI영급만 지속적으로 증가하고 다른 영급은 특정연도에서 최대를 이룬 후 지속적으로 감소할 것으로 전망된다.

둘째, 산림자원의 변화에 따른 산림의 저류량은 2010년 135억톤에서 점차 증가하여 2035년 140억톤까지 증가하였다가 다시 감소하여 2040년에는 139억톤이 될 것으로 전망된다. 토사유출 방지량은 2010년 192만 m^3 에서 지속적으로 감소하여 2040년에는 181만 m^3 이 될 것으로 예측되고, CO₂ 흡수량은 2010년에는 1.2억CO₂톤에서 지속적으로 증가하여 2040년에는 3.8억CO₂톤이 될 것으로 추정되었다.

셋째, 산림자원 즉 산림면적과 임목축적의 감소를 유발하는 가장 큰 원인은 산지전용허가이며, 산지전용허가를 통제하는 정책을 실시할 경우 일차적으로 산지전용 허가면적의 축소 규모에 비례하여 산림면적의 감소규모가 줄어들고, 임목축적의 증가폭이 커짐을 알 수 있었다. 매년 감소추세에 있는 저류량 증가분과 토사유출 방지량은 그 감소규모가 줄어들고, 지속적으로 늘고 있는 CO₂ 흡수량도 그 규모가 약간 증가함을 알 수 있었다. 따라서 산지전용허가를 통제하는 정책을 실시할 경우 산림자원의 보전과 공익기능량의 증대에 크게 기여할 것으로 예상된다. 그러나 현실적으로 산림 개발에 대한 수요를 무조건 억제하는 정책을 사용할 수도 없거나 효율적 국토운영에 있어서도 바람직하지 않다. 따라서 산지의 난개발방지과 자발적 산지보전 및 관리체계를 구축할 수 있도록 산지전용과 산림투자를 연계한 선순환적 산지관리제도에 대한 도입이 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로 이 연구는 실질적인 통계자료를 사용하여 산림자원과 그에 따른 산림의 공

익기능량을 정량화하고 과거시점부터 미래시점까지 동적으로 그 변화를 시뮬레이션하는 모형을 개발하였다는 점에서 그 의의가 있다고 볼 수 있다. 『산림자원 및 공익기능량 추정 모형』을 활용하면 주요한 산림자원 및 공익기능량의 년도별 전망값을 추정할 수 있으므로, 다양한 요소들을 고려한 여러 가지 정책시나리오별로 산림자원과 공익기능량에 대한 정량화된 정책효과를 측정할 수 있다. 그러나 국립산림과학원의 다년간의 연구결과라고는 하나 김종호 외(2010)가 제시한 공익기능량 추정방법론이외에 다른 방법론에 대한 심도 있는 연구가 이루어지지 못한 점과 산림자원의 통계자료 산정방식의 변화에 따른 통계자료 보정이 이루어지지 않았다는 한계점을 가지고 있다.

2. 향후 연구추진 계획

이 연구는 산림청에서 추진하고 있는 “산지전용권 거래제도”에 대한 타당성 검토와 파급효과 분석을 위한 연구 중의 하나로, 산림자원과 공익기능량을 계량화하는 시스템다이나믹스 모형의 개발 가능성을 확인하였다. 향후 이 연구가 가지고 있는 한계점을 보완하는 연구와 산지전용권 거래를 가상으로 시뮬레이션하는 연구를 수행할 계획이다. 즉 공익기능량을 추정하는 방법론에 대한 심도 있는 연구를 추가적으로 수행하여 모형의 정확성을 확보할 것이며, 산림자원에 대한 통계자료도 일관된 규칙하에 보정하여 적용할 것이다. 또한 다른 공익기능량에 대한 서브모형을 추가로 개발할 계획이며, 산림의 공익기능량을 기반으로 하는 산지전용권(크레딧)의 가치산정 시나리오에 따른 산지전용권 거래패턴을 가상으로 시뮬레이션하여, 산림자원의 보전과 공익기능량의 극대화를 꾀할 수 있는 정책의사결정을 지원하는 시스템다이나믹스 모형을 개발할 계획이다.

【참고문헌】

- 국립산림과학원. (2011). 『제5차 국가산림자원조사 보고서』.
- 김종호 · 김기동 · 김래현 외. (2010). 『산림의 공익기능 계량화 연구』. 국립산림과학원.
- 산림청. (2012). 『임업통계연보』.
- 산림청. (2011). 『산림기본통계』.
- 신용광 · 장철수. (2006). 『산림의 공익적 가치와 환원방안에 관한 연구』. 산림청.
- 정필균 · 고문환 · 임정남 외. (1983). 『토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석』. 한국토양비
료학회지.
- 조윤숙 · 정운영. (2013). 『산지전용권 거래제도 시행효과분석을 위한 시스템다이나믹스 모형
개발』. 국토연구원.
- 채미옥 외. (2010). 『산지전용권 거래제도 연구』. 산림청.
- 채미옥 외. (2011). 『산지관리 성과향상을 위한 산지보전 및 개발제도 개선연구』. 산림청.

▶ 접수일 : 2014. 8. 27. / 수정일 : 초심완료 / 게재확정일 : 2014. 10. 26.

【부록: 모형방정식】

Name	Dimensions	Unit	Definition
2001년이후 저류량 총증가분	토층구분, 임상구분	억톤	0 <<억톤>>
2008년 기준 당해 화폐가치			(1+deflator) ^ (YEAR()-2008)
2008년기준 ha당 조림비		만원/ha	292 <<만원/ha>> // 2008년기준 1ha의 산지에 4년생 잣나무 묘목 3천 그루를 심는 경우 총 292만원의 비용이 발생// 출처 산림청 산림자원팀
3개년 임상별 임목축적 초기값	1.4, 임상구분	m3	XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "과거 임상별 임목축적", "B5:F8") <<m3>> //2005년도, 2004년도, 2003년도, 2002년도
3년전 임목축적	1.4, 임상구분	백만m3	FOR(i=1.4 IF(i=4, '최근 3개년 임상별 임목축적'[i], 0 <<m3>>))
Aging	1.3, 임상구분	백만m3	FOR(i=1.3 '최근 3개년 임상별 임목축적'[i])
A층 모암별 저류량	화성암, 석회암	억톤	FOR(구분=화성암,석회암 ARRSUM('임상별 모암별 A층 저류량'[*,'구분']))
A층 토양의 연간저류량		억톤	ARRSUM('임상별 A층 토양의 연간저류량')
B층 모암별 저류량	화성암, 석회암	억톤	FOR(구분=화성암,석회암 ARRSUM('임상별 모암별 B층 저류량'[*,'구분']))
B층 토양의 연간저류량		억톤	ARRSUM('임상별 B층 토양의 연간저류량')
CO2 전환계수		CO2/C	44 <<CO2>> / 12 <<C>> // CO2변환계수(3.666666667) = 이산화탄소분자량(44) / 탄소원자량(12)
CO2 흡수단가		원/(CO2*톤)	50 <<USD>> * 1101.88 <<원/USD>> * '2008년 기준 당해 화폐가치' / 1 <<CO2*톤>>
CO2흡수량 지수화			'당해 CO2흡수량'/'기준 CO2흡수량' * 1000
CO2흡수량 표준화지수			(CO2흡수량 지수화 - 5498) / 4635 // 표준화지수 Z(t) = [x(t) - 평균] / 표준편차
deflator			0.023573778 // 2000년 부터 2012년까지 12년동안의 평균물가상승율
공기정화가능지수			100 + 100 * (CO2흡수량 표준화지수 ^ (-0.97)) / (2.6 - (-0.97)) // 100 + 지수값 변동폭 * (Z-z의 최소값) / (z의 최대값-z의 최소값)
국토면적		천ha	'국토면적 초기값'
국토면적 변화량		천ha/yr	국토면적 * '국토면적 평균변화율' / 1 <<yr>>
국토면적 초기값		ha	9946075 <<ha>>
국토면적 평균변화율			0.00057395
기준 CO2흡수량		CO2*백만톤	'당해 CO2흡수량'
기준 연간저류량		억톤	'당해 토양의 저류량'
기준 토사유출방지량		백만m3	'당해 토사유출방지량'
단위면적당 CO2흡수가지		만원/ha	'산림의 CO2흡수가지'/산림면적
단위면적당 수원함양가지		만원/ha	'산림의 수원함양가지'/산림면적
단위면적당 토사유출방지가치		만원/ha	'산림의 토사유출방지가치'/산림면적
당해 3년평균 임상별 임목축적	임상구분	천m3	AVERAGE('최근 3개년 임상별 임목축적'[1], '최근 3개년 임상별 임목축적'[2], '최근 3개년 임상별 임목축적'[3])
당해 CO2저장량		CO2*백만톤	ARRSUM('당해 임상별 CO2저장량')
당해 CO2흡수량		CO2*백만톤	'당해 CO2저장량'-'전년도 CO2저장량'
당해 ha당 조림비		만원/ha	'2008년기준 ha당 조림비' * ((1+물가상승율)^(YEAR()-2008))
당해 경영지원액	경영지원분야	억원	'정책 분야별 경영지원액'
당해 산소생산량		천O2*톤	'당해 CO2흡수량'* 산소전환계수
당해 영급별 산림면적 임상비중	임상구분, I영..VI영		TRANSPOSE(FOR(구분=I영..VI영 '영급별 산림면적 임상비중 추산'[*,'구분']/ARRSUM('영급별 산림면적 임상비중 추산'[*,'구분'])))
당해 영급별 임목축적 임상비중	임상구분, I영..VI영		TRANSPOSE(FOR(구분=I영..VI영 IF('영급별 임목축적 임상비중 추산'[*,'구분] = 0, 0, '영급별 임목축적 임상비중 추산'[*,'구분']/ARRSUM('영급별 임목축적 임상비중 추산'[*,'구분'])))
당해 임상별 CO2저장량	임상구분	CO2*백만톤	'당해 3년평균 임상별 임목축적'*탄소전환계수*CO2 전환계수'
당해 임상별 CO2흡수량	임상구분	CO2*백만톤	'당해 임상별 CO2저장량'-'전년도 임상별 CO2저장량'
당해 임상별 산림면적 비중	임상구분		(임상별 산림면적 비중 추산) /ARRSUM('임상별 산림면적 비중 추산')
당해 임상별 임목축적 비중	임상구분		(임상별 임목축적 비중 추산) /ARRSUM('임상별 임목축적 비중 추산')
당해 임상별 저류량 증가분	토층구분, 침엽수,혼효림	백만톤	'임상별 연간 저류량 증가분'
당해 저류량 증가분		백만톤	ARRSUM('임상별 연간 저류량 증가분')
당해 조림 경영지원액		억원	'정책 분야별 경영지원액'[조림]
당해 토사유출방지량		백만m3	'무림목지 토사유출량'-'임목지 토사유출량'
당해 토양의 저류량		억톤	ARRSUM('A층 모암별 저류량') + ARRSUM('B층 모암별 저류량')
당해년 임상별 임목축적	1.4, 임상구분	백만m3	FOR(i=1.4 IF(i=1, '임상별 임목축적', (0, 0, 0, 0) <<m3>>)) //('전국 임목축적', 0 <<ha>>, 0 <<ha>>, 0 <<ha>>)
모양군의 면적비율	모양군구분	%	{25.5, 15.5, 13.4, 21.6, 24.0} <<%>> // 전국 모양별 분포비율
모양별 무림목지 토사유출량	모양군구분	천m3	'모양별 임목지면적' * '모양별 무림목지 평균 토사유출량_USLE방식'
모양별 임목지면적	모양군구분	천ha	'임목지 산림면적' * '모양군의 면적비율'
모양별 저류량	화성암, 석회암	백만톤	'A층 모암별 저류량'+B층 모암별 저류량'

Name	Dimensions	Unit	Definition
모암별 토사유출 방지량	모암구분	천m3	'모암별 무림목지 토사유출량'-임령고려 모암별 토사유출량'
모암별 토층별 평균토심	토층구분, 모암구분	cm	{(22, 22, 24, 12, 15, 15), (46, 60, 38, 40, 45, 55)} <<cm>> // 공익가능 계량화연구 p30
모암의 분포비율	모암구분	%	{31.3, 35.0, 9.9, 14.1, 4.5, 5.4} <<%>> // 전국 모암별 분포비율
무림목지 산림면적		천ha	'임상별 산림면적[무림목지]
무림목지 토사유출량		백만m3	ARRSUM('모암별 무림목지 토사유출량')
변성암지역 영급별 단위토사유출량	영급구분	m3/ha	4.7115 * (EXP(-0.0694 * '영급별 임령중간값')) * 1 <<m3/ha>>
변성암지역 토사유출량	영급구분	m3	'영급별 산림면적' * '모암군의 면적비율[기타변성암]' * '변성암지역 영급별 단위토사유출량'
산림면적		천ha	산림면적 2000
산림면적 변화량		천ha/yr	산림면적 * '산림면적 평균변화율' / 1 <<yr>> + '조림_당해 산림면적 증가' / 1 <<yr>>
산림면적 2000		ha	6422128 <<ha>>
산림의 CO2흡수가치		조원	'당해 CO2흡수량' * 'CO2 흡수단가'
산림의 단위면적당 공익가치		만원/ha	'산림의 총공익가치/산림면적
산림의 산소생산가치		조원	'당해 산소생산량' * '산소 생산단가'
산림의 수원함양가치		조원	'당해 토양의 저류량' * '수원함양 단가'
산림의 총공익가치		조원	'산림의 수원함양가치'+ '산림의 토사유출방지가치'+ '산림의 CO2흡수가치'
산림의 총공익가능지수			ARRSUM(수원함양가능지수, 토사유출방지가능지수, 공기정화가능지수)'공익가능별 가중치')
산림의 토사유출방지가치		조원	'당해 토사유출방지량' * '토사유출방지비 단가'
산소 생산단가		원/(O2*톤)	394650 <<원/O2*톤>> * '2008년 기준 당해 회폐가치'
산소전환계수		O2/CO2	32 <<O2>> / 44 <<CO2>> // 산소전환계수(0.727272727) = 산소분자량(32) / 이산화탄소분자량(44)
산지전용면적 변화량		ha/yr	IF(YEAR() < 2010, '산지전용면적 평균변화량', '산지전용면적 평균변화량' * (1-'산지전용면적 평균변화량 감소율')^(YEAR()-2010)) / 1 <<yr>>
산지전용면적 2000		ha	6827 <<ha>>
산지전용에 의한 산림면적감소량		ha	'추세_산지전용 허가면적' * '산지전용허가대비 산림면적감소비율'
산지전용정책에 의한 산림면적감소량		ha	'정책_산지전용 허가면적' * '산지전용허가대비 산림면적감소비율'
산지전용허가 추세면적		ha	XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "전용허가", "R3C2") <<ha>>
산지전용허가대비 산림면적감소비율			0.670657 // 과거 10년간 평균값
생장	1.59	ha	FOR(영급구분=1.59 '조림_임령별 산림면적'(영급구분))
생착율			0.8 //조림한 나무가 살아남을 확률
수원함양 단가		원/톤	969.5 <<원/톤>> * '2008년 기준 당해 회폐가치' // 2008년 기준 수원함양가치임// // 다목적댐 건설비(959.91원/톤) * 1.01(감가상각비 1%) = 969.5원// // 12,968원/톤 * 0.0717 * (1+0.0717)^50 /((1+0.0717)^50-1) = 959.91원/톤// // 다목적댐 건설비 12,968원/톤// // 내구연하 50년 이자율 7.17%
수원함양가능지수			100 + 100 * ('연간저류량 표준화지수' - (-2.57)) / (0.45 - (-2.57)) // 100 + 지수값 변동폭 * (Z-z의 최소값) / (z의 최대값-z의 최소값)
엑셀입력 산지전용 허가면적		ha	XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "전용허가", "R3C3") <<ha>>
엑셀입력 화면입력 선택			0 // 0=화면입력, 1=엑셀입력
연간저류량 지수화			'당해 토양의 저류량'/기준 연간저류량*1000
연간저류량 표준화지수			('연간저류량 지수화'-1054)/21 // 표준화지수 Z(t) = [x(t) - 평균] / 표준편차
영급별 단위면적당 임목축적	영급구분	m3/ha	'영급별 단위면적당 임목축적_2000' * (1+'영급별 단위면적당 임목축적 평균증가율')^(YEAR()-2000)
영급별 단위면적당 임목축적 평균증가율	영급구분		{ 0.0, 0.063001749, 0.051510273, 0.051139098, 0.042391037, 0.042924694 } * 0.7
영급별 단위면적당 임목축적 2000	영급구분	m3/ha	// 2000년 기준 '영급별 임목축적'/영급별 산림면적// {0, 42, 62, 96, 131, 164} <<m3/ha>>
영급별 산림면적 비중	영급구분		'영급별 산림면적/ARRSUM('영급별 산림면적')
영급별 산림면적 임상비중	임상구분, 영급구분		'영급별 산림면적 임상비중_2000'
영급별 산림면적 임상비중 변화율	임상구분, 영급구분		XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "영급별 임상비중", "b12:q16")
영급별 산림면적 임상비중 추산	임상구분, 영급구분		'영급별 산림면적 임상비중'*(1+'영급별 산림면적 임상비중 변화율')
영급별 산림면적 임상비중_2000	임상구분, 영급구분		XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "영급별 임상비중", "b4:q8")
영급별 임령중간값	영급구분		{5, 15, 25, 35, 45, 55}

Name	Dimensions	Unit	Definition
영급별 임목축적	영급구분	백만m3	'영급별 산림면적' * '정책별영 영급별 단위면적당 임목축적'
영급별 임목축적 비중	영급구분		'영급별 임목축적/임목축적'
영급별 임목축적 임상비중	임상구분, 영급구분		'영급별 임목축적 임상비중_2000'
영급별 임목축적 임상비중 변화율	임상구분, 영급구분		XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "영급별 임상비중", "b29:q33")
영급별 임목축적 임상비중 추산	임상구분, 영급구분		'영급별 임목축적 임상비중*(1+'영급별 임목축적 임상비중 변화율)'
영급별 임목축적 임상비중_2000	임상구분, 영급구분		XLDATA(" 초기값-산지전용권 거래제도.xlsx", "영급별 임상비중", "b21:q25")
영급별 임목축적 임상비중변화량	임상구분, 영급구분	yr^-1	('당해 영급별 임목축적 임상비중'-'영급별 임목축적 임상비중') * 1 <<1/yr>>
임령별 산림면적 변화량	1.60	천ha	('임목지 산림면적' * '임령별 산림면적 비중')-'임령별 산림면적'
임령별 산림면적 비중	1.60		'임령별 산림면적 비중추산'/ARRSUM('임령별 산림면적 비중추산')
임령별 산림면적 비중추산	1.60		('임령별 산림면적 증가+'임령별 산림면적') / '임목지 산림면적'
임령별 산림면적 증가	1.60	ha	'임령별 자연변화량'+FOR(구분=1.60 IF(NUMERICAL(구분)=4, '조림_당해 산림면적 증가', 0 <<ha>>)) // 당해 조림에 의한 나무는 4년차 나무로 가정
임령별 산림면적_2000	영급구분	ha	{ 524993, 1503198, 2487349, 1233139, 399898, 113641 } <<ha>>
임목축적		백만m3	ARRSUM('영급별 임목축적')
임상별 A층 조공극량	침엽수..무림목지	천ha	FOR(구분=침엽수..무림목지 ARRSUM('임상별 영급별 A층 조공극량 [구분]'))
임상별 A층 토양의 연간저류량	침엽수..혼효림	억톤	FOR(구분=침엽수..혼효림 ARRSUM('임상별 모암별 A층 저류량[구분]'))
임상별 A층 토양의 연간저류량 증가분	침엽수..혼효림	백만톤	'임상별 A층 토양의 연간저류량'-'DELAYMTR('임상별 A층 토양의 연간저류량'[침엽수], 1 <<yr>>), DELAYMTR('임상별 A층 토양의 연간저류량'[활엽수], 1 <<yr>>), DELAYMTR('임상별 A층 토양의 연간저류량'[혼효림], 1 <<yr>>))
임상별 B층 조공극량	침엽수..무림목지	천ha	FOR(구분=침엽수..무림목지 ARRSUM('임상별 영급별 B층 조공극량 [구분]'))
임상별 B층 토양의 연간저류량	침엽수..혼효림	억톤	FOR(구분=침엽수..혼효림 ARRSUM('임상별 모암별 B층 저류량[구분]'))
임상별 B층 토양의 연간저류량 증가분	침엽수..혼효림	억톤	'임상별 B층 토양의 연간저류량'-'DELAYMTR('임상별 B층 토양의 연간저류량'[침엽수], 1 <<yr>>), DELAYMTR('임상별 B층 토양의 연간저류량'[활엽수], 1 <<yr>>), DELAYMTR('임상별 B층 토양의 연간저류량'[혼효림], 1 <<yr>>))
임상별 모암별 A층 저류량	침엽수..무림목지, 모암구분	억톤	FOR(구분=침엽수..무림목지 '임상별 A층 조공극량'[구분] * '모암의 분포비율' * '모암별 토층별 평균토심'[A층] * 100<<톤/ha/cm>>))
임상별 모암별 B층 저류량	침엽수..무림목지, 모암구분	억톤	FOR(구분=침엽수..무림목지 '임상별 B층 조공극량'[구분] * '모암의 분포비율' * '모암별 토층별 평균토심'[B층] * 100<<톤/ha/cm>>))
임상별 바이오매스 확장계수	임상구분		{1.6512, 1.7202, 1.6857, 0, 0} / 1.6857 = (1.6512+1.7202)/2
임상별 산림면적	임상구분	천ha	산림면적 * '임상별 산림면적 비중_포괄'
임상별 산림면적 비중 변화율	임상구분		{-0.0041024, 0.0039950, -0.0002506, 0.0154829, 0.0260769}
임상별 산림면적 비중 추산	임상구분		'임상별 산림면적 비중_포괄'*(1+'임상별 산림면적 비중 변화율)'
임상별 산림면적 비중_포괄	임상구분		'임상별 산림면적 초기비중'
임상별 산림면적 비중변화량	임상구분	yr^-1	('당해 임상별 산림면적 비중'-'임상별 산림면적 비중_포괄') * 1 <<1/yr>>
임상별 산림면적 초기비중	임상구분		{0.42219978, 0.25934550, 0.29355488, 0.00094782, 0.02395203}
임상별 영급별 산림면적 비중	침엽수..무림목지, 영급구분		FOR(구분= 침엽수..무림목지 '영급별 산림면적 임상비중'[구분.] * '영급별 산림면적 비중'
임상별 영급별 임목축적 비중	침엽수..무림목지, 영급구분		FOR(구분= 침엽수..무림목지 '영급별 임목축적 임상비중'[구분.] * '영급별 임목축적 비중'
임상별 영급별 A층 공극율	임상구분, 영급구분	%	{침엽수 토층별 영급별 공극율[A층], '활엽수 토층별 영급별 공극율 [A층], '혼효림 토층별 영급별 공극율[A층], {0,0,0,0,0} <<%>>, {0,0,0,0,0} <<%>>}
임상별 영급별 A층 조공극량	임상구분, 영급구분	천ha	'임상별 영급별 산림면적' * '임상별 영급별 A층 공극율'
임상별 영급별 B층 공극율	임상구분, 영급구분	%	{침엽수 토층별 영급별 공극율[B층], '활엽수 토층별 영급별 공극율[B층], '혼효림 토층별 영급별 공극율[B층], {0,0,0,0,0} <<%>>, {0,0,0,0,0} <<%>>}
임상별 영급별 B층 조공극량	임상구분, 영급구분	천ha	'임상별 영급별 산림면적' * '임상별 영급별 B층 공극율'
임상별 영급별 산림면적	침엽수..무림목지, 영급구분	천ha	'임목지 산림면적' * '임상별 영급별 산림면적 비중'
임상별 영급별 임목축적	침엽수..무림목지, 영급구분	천m3	임목축적 * '임상별 영급별 임목축적 비중'
임상별 용적비중	임상구분	톤/m3	{0.47, 0.80, 0.635, 0, 0} <<톤/m3>> // 목재 기본밀도// // 0.635 = (0.47+0.8)/2 혼효림 용적비중 확인
임상별 임목축적	임상구분	백만m3	임목축적 * '임상별 임목축적 비중'
임상별 임목축적 비중	임상구분		'임상별 임목축적 초기비중'

Name	Dimensions	Unit	Definition
임상별 임목축적 비중 변화율	임상구분		{-0.002073185, -0.000395259, 0.003240161, 0, 0}
임상별 임목축적 비중변화량	임상구분	yr^-1	(‘당해 임상별 임목축적 비중’-‘임상별 임목축적 비중’) * 1 <<1/yr>>
임상별 임목축적 초기비중	임상구분		{0.4292, 0.2702, 0.3006, 0, 0}
임야면적		천ha	‘임야면적 초기값’
임야면적 변화량		천ha/yr	임야면적 * ‘임야면적 평균변화율’ / 1 <<yr>>
임야면적 초기값		ha	6422128 <<ha>>
임야면적 평균변화율			0.00043995
임목지 산림면적		천ha	ARRSUM(‘임상별 산림면적’)-‘임상별 산림면적[죽림]-‘임상별 산림면적[무림목지]
임목지 토사유출량		천m3	ARRSUM(‘임령고려 모암별 토사유출량’)
전년도 3년평균 임상별 임목축적	임상구분	천m3	AVERAGE(‘최근 3개년 임상별 임목축적[2], ‘최근 3개년 임상별 임목축적[3], ‘최근 3개년 임상별 임목축적[4])
전년도 CO2저장량		CO2*톤	ARRSUM(‘전년도 임상별 CO2저장량’)
전년도 임상별 CO2저장량	임상구분	CO2*톤	‘전년도 3년평균 임상별 임목축적*탄소전환계수*CO2 전환계수’
정책 단위면적당 임목축적 비중 증가	영급구분	m3/ha	‘정책_영급별 임목축적 증가’/영급별 산림면적’
정책_산지전용 허가면적		ha	IF(‘엑셀입력_화면입력 선택’=0, ‘산지전용허가 추세면적’, IF(‘엑셀입력_화면입력 선택’=1, ‘엑셀입력 산지전용 허가면적’, IF(YEAR() <= 2010, 0 <<ha>>, IF(YEAR() <= 2020, 허가면적2020, IF(YEAR() <= 2030, 허가면적2030, IF(YEAR() <= 2040, 허가면적2040, 0 <<ha>>))))))
조림		%	50 <<%>>
조림 당해 산림면적 증가		ha	‘당해 조림 경영지원액’ / ‘당해 ha당 조림비’
조림 산림면적 증가	1.60	ha	FOR(구분=1.60 IF(NUMERICAL(구분)=4, ‘조림 당해 산림면적 증가’, 0 <<ha>>)) * 생착율
조림 영급별 산림면적 비중	영급구분		‘조림_영급별 산림면적’/‘임목지 산림면적’
조림 영급별 임목축적	영급구분	백만m3	‘조림_영급별 산림면적’ * ‘영급별 단위면적당 임목축적’
조림 영급별 임목축적 비중	영급구분		‘조림_영급별 임목축적’/임목축적
조림 임령별 산림면적	1.60	ha	0 <<ha>>
조림 임령별 산림면적 비중	1.60		‘조림_임령별 산림면적’/‘임목지 산림면적’
조림 임상별 영급별 임목축적 비중	침엽수, 무림목지, 영급구분		FOR(구분= 침엽수, 무림목지 ‘영급별 임목축적 임상비중[구분,]* ‘조림_영급별 임목축적 비중’)
최근 3개년 임상별 임목축적	1.4, 임상구분	백만m3	‘3개년 임상별 임목축적 초기값’
추세 산지전용 허가면적		ha	산지전용면적 2000
침엽수 토층별 영급별 공극율	토층구분, 영급구분	%	{40/(1+(0.6*EXP(-0.03 * ‘영급별 임령중간값’))), 35/(1+(0.25*EXP(-0.01 * ‘영급별 임령중간값’)))} * 1 <<%>>
탄소전환계수	임상구분	C*톤/m3	‘임상별 용적비중’ * ‘임상별 바이오매스 확장계수’ * 탄소전환인자
탄소전환인자		C	0.5 <<C>> // 탄소전환인자 = 탄소 / 바이오매스
택벌림 억원당 임목축적 증가량	영급구분	m3/억원	‘조림 억원당 임목축적 증가량’ * ‘택벌림 조림대비 임목축적 증가비’
토사유출방지기능지수			100 + 100 * (‘토사유출방지량 표준화지수’ - (-1.77)) / (1.58 - (-1.77)) // 100 + 지수값 변동폭 * (Z-z의 최소값) / (z의 최대값-z의 최소값)
토사유출방지량 지수화			‘당해 토사유출방지량’/기준 토사유출방지량**1000
토사유출방지량 표준화지수			(‘토사유출방지량 지수화’ - 970) / 19 // 표준화지수 Z(t) = [x(t) - 평균] / 표준편차
토사유출방지비 단가		원/m3	7515 <<원/m3>> * ‘2008년 기준 당해 회폐가치’
퇴적암지역 영급별 단위토사유출량	영급구분	m3/ha	1.2808 * (EXP(-0.028 * ‘영급별 임령중간값’)) * 1 <<m3/ha>>
퇴적암지역 토사유출량	영급구분	m3	‘영급별 산림면적’ * ‘모암군의 면적비율[퇴적암]’ * ‘퇴적암지역 영급별 단위토사유출량’
편마암지역 영급별 단위토사유출량	영급구분	m3/ha	4.7115 * (EXP(-0.0694 * ‘영급별 임령중간값’)) * 1 <<m3/ha>>
편마암지역 토사유출량	영급구분	m3	‘영급별 산림면적’ * ‘모암군의 면적비율[편마암]’ * ‘편마암지역 영급별 단위토사유출량’
훈효림 토층별 영급별 공극율	토층구분, 영급구분	%	{45/(1+(0.6*EXP(-0.02 * ‘영급별 임령중간값’))), 40/(1.2+(4.0*EXP(-0.07 * ‘영급별 임령중간값’)))} * 1 <<%>>
화강암지역 영급별 단위토사유출량	영급구분	m3/ha	1.4431 * (EXP(-0.0233 * ‘영급별 임령중간값’)) * 1 <<m3/ha>>
화강암지역 토사유출량	영급구분	m3	‘영급별 산림면적’ * ‘모암군의 면적비율[화강암]’ * ‘화강암지역 영급별 단위토사유출량’
화성암지역 영급별 단위토사유출량	영급구분	m3/ha	1.4431 * (EXP(-0.0233 * ‘영급별 임령중간값’)) * 1 <<m3/ha>>
화성암지역 토사유출량	영급구분	m3	‘영급별 산림면적’ * ‘모암군의 면적비율[기타화성암]’ * ‘화성암지역 영급별 단위토사유출량’
활엽수 토층별 영급별 공극율	토층구분, 영급구분	%	{50/(1+(0.29*EXP(-0.01 * ‘영급별 임령중간값’))), 45/(1+(0.6*EXP(-0.02 * ‘영급별 임령중간값’)))} * 1 <<%>>