

토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 추적하기 위한 Lumped 모형의 개발*

손 일**

토지이용수문학을 위한 하나의 대안으로, 모형의 단순성, 모형 변형의 용이성, 그리고 모의된 모형으로부터 지속적인 유량 예측 능력을 지닌 Lumped 모형을 이용해 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 추적하였다. Blackie(1972)의 모형을 근간으로, R1131(11-parameter, 3-storage, 1-input option) 모형을 구축하였다. 연구 대상 유역분지는 케냐에 있는 Kimakia Catchment K11이며, 이곳의 토지이용은 3번 변화하였다. 3단계의 토지이용 기간에 대해 모형을 보정한 결과, 모형유효도는 96.78%, 97.20%, 94.62%이며, 전체유량오차는 각각 -1.78%, -3.36%, -5.32%였다. 보정된 모형을 이용해 각 토지이용 단계별로 확장유출량을 발생시키고, 빈도해석을 시도했다. 홍수 규모가 작은 경우 식생변화에 따라 31.3%와 32.1% 정도로 홍수량이 줄어들었으나, 홍수 규모가 커짐에 따라 홍수량의 감소 정도는 점차 작아지고 있다. 이와 같은 현상은 갈수량의 변화에서도 발견된다. 또한 식생이 어느 정도까지 성장한 이후에는 계속된 식생 성장에도 불구하고 홍수량과 갈수량은 큰 변화가 없다.

主要語 : 토지이용 변화, Lumped 모형, 최적화, 모형 보정, 모형유효도, 수문 모형

1. 연구 업적

최근 들어 골프장 건설과 택지 및 공단 조성 등으로 말미암아 산지의 토지이용이 급속하게 변화하고 있으며, 그 결과 유역분지내 수문학적 특성이 달라지고 있다. Dunne and Leopold(1978)가 지적했듯이, 현재의 지식 수준에서 가장 중요한 수문학적 과제 중의 하나는 토지이용의 변화에 따른 강수-유량-침식 간의 관계가 언제, 어디서, 어느 만큼 변화하는가를 예측하는 일이다. 즉, 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화, 이에 따른 하천의 침식 및 퇴적 환경의 변화를 밝혀내는 일은, 수문지형학(hydrogeomorphology)의 중심 과제이다.

일반적으로 토지이용을 전제로 하는 수문지형학에서는, 토지이용 변화와 수문 특성 변화, 그리고 수문 특성 변화와 하도 변화라는 두 개의

고리를 상정할 수 있다(그림 1). 후자의 경우 기존의 하천지형학 연구 결과에서 원용된 다양한 개념적 그리고 계량적 접근방법으로 나름의 연구방법이 정립된 상태이나, 전자의 경우 하천지형학에서는 문헌 증거, 퇴적학적 증거, 생물학적 증거 등이 이용되고 있지만 아직 그 관계를 정량화하지 못한 상태이다(Son, 1990).

토지이용수문학(landuse hydrology)이란 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 정량화하기 위해 여러 다양한 수준의 수문 모형을 개발하고 연구하는 분야이다. 1910년 토지이용과 수문 특성과의 관계를 밝히기 위해 미국 콜로라도주에 있는 Wagon Wheel Gap에 최초의 실험유역분지가 개설된 이래 전세계에 걸쳐 수많은 연구가 시도되었다(Sopper and Lull, 1967; Ward, 1971; Bosch and Hewlett, 1982; Son, 1990 참조). 또한 이들 관계를 계량적으로 모형화하기 위해 다양한 수문 모형이 개발되었다. 단위유량

* 이 논문은 1992년도 문교부 지원 학술진흥재단의 지방대 육성 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

** 경상대학교 사범대학 교수

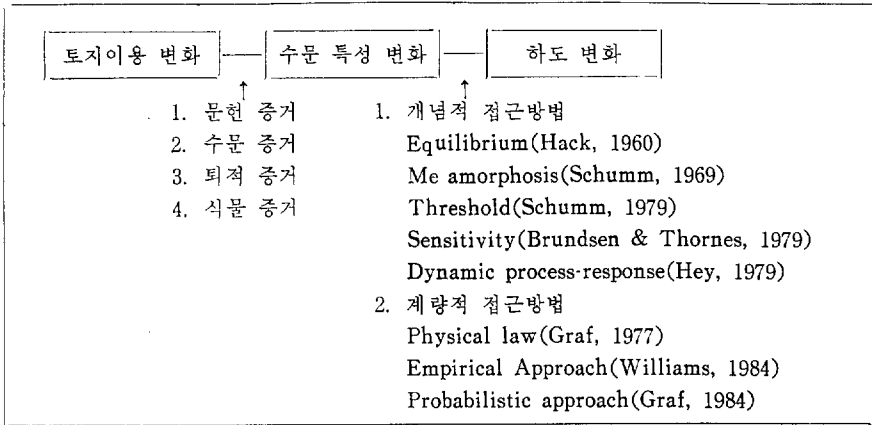


그림 1. 토지이용 변화와 하도 변화와의 관계

도, 회귀식, 경험식 등의 블랙박스 모형, 1960년대 초 Stanford Watershed 모형에서 비롯된 수많은 Lumped 모형, 그리고 전자계산기의 경이적인 발달을 배경으로 하여 수리학적 개념을 다양한 수치해석기법으로 해석한 SHE나 IHDM과 같은 Distubed 모형들이 토지이용수문학에 이용되고 있다.

본 연구에서는 토지이용수문학을 위한 하나의 대안으로, 모형의 단순성, 모형 변형의 용이성, 그리고 모의된 모형으로부터 지속적인 유량 예측 능력을 지닌 Lumped 모형을 이용해 토지이용 변화에 따른 수문 특성, 특히 홍수량과 갈수량의 변화를 추적하기 위한 틀(framework)을 개발하려 한다. 본 연구에 사용된 자료는, 동아프리카농림연구소(East Africa Agriculture and Forestry Research Organization: EAAFRO)와 영국수문연구소(Institute of Hydrology)가 14년 6개월 동안 공동으로 관리한 케냐의 실험유역분지 중의 하나인 Kimakia Catchment K11의 수문 자료이며, 원자료는 영국수문연구소로부터 제공받았다.

2. 토지이용 변화와 수문 모형

1) 수문 모형의 필요성

토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 고려할 경우, 유역분지 내 도시화와 삼림벌목 혹은 식생 변화가 주된 대상이 된다. 도시화에 따른

수문 특성의 변화에 대해서는 다양한 수준의 수학적 수문 모형이 이용되고 있다. 하지만 유역분지 내 삼림벌목이나 재식림과 같은 식생 변화의 경우, 기존의 지표 상태, 벌목 방식, 벌목 후 식생의 재성장 등 다양한 조건을 고려해야 하므로 도시화의 경우와는 달리 수학적 수문모형의 적용에는 한계가 있다. 일반적으로 식생 변화의 경우 대표유역분지와 실험유역분지의 유출량 비교가 전통적인 방법이며, 지금까지 여러 연구에서 이 방법을 시도하여 왔다(Hibbert, 1967; Ward, 1971; Bosch and Hewlett, 1982 참조).

Dunne and Leopold(1978)와 Bosch and Hewlett(1982)은 실험유역분지의 연구 결과를 이용해 식생 피복의 변화에 대한 연 유출량의 변화를 단순회귀식으로 나타냈다. 이들의 결과로부터 식생 피복의 감소에 따른 연 유출량의 증가라는 일반적인 경향을 확인할 수 있다. 실제로 연 유출량의 변화는 수자원 관리라는 측면에서는 유용하지만, 하도 변화를 고려할 경우 연 유출량보다는 홍수량 혹은 첨두홍수량에 대한 자료가 요구된다. 또한 재해 연구, 하도 정비, 댐 규모 산정에 요구되는 수문 정보 역시 홍수량과 관련된 것이다. 식생 피복의 변화에 따른 홍수량의 변화에 대하여 단순회귀식을 통해 일반적인 관계식을 도출할 수 있다면 그 유용성은 의심할 바 없다.

Son(1990)은, 43편 개별 연구로부터 62개의

실험유역분지에서 실시한 식생 변화에 따른 각종 홍수량의 변화에 대한 자료를 도표화하였다. 그리고 이들 자료를 이용해 식생 피복의 변화와 침투홍수량의 변화 사이의 관계를 단순회귀식을 이용해 분석하였지만 만족스런 결과를 얻지 못했다. 식생 변화와 연 유출량의 변화는 일차적으로 증발산량의 변화로 설명될 수 있어 단순회귀 분석으로도 가능하나, 홍수량의 경우는 이와는 다르다. 즉, 홍수량의 비선형성, 홍수 자료의 다양성, 상이한 실험유역 관리 방식, 유역분지의 지형적 특성, 벌목 후 식생의 재성장 등에서 그 원인을 찾을 수 있을 것이다.

Rogers(1986)는, 다양한 종류의 토지이용 변화의 수용, 모형 내 변수의 상호독립성, 유역분지 내 공간적 특성의 반영, 타 유역분지로의 모형 전이 가능성을 토지이용수문학에 이용되는 수문 모형의 4가지 조건으로 제시했다. 이는 Distributed 모형의 개발 이유와 일치하며 기존의 블랙박스 모형과 Lumped 모형의 결합이기도 하다. 다시 말해, 식생 변화의 규모와 위치, 그에 따른 수문 요소들의 process 변화 그리고 유역분지의 제반 특성 모두를 고려할 수 있는 일반 모형이 개발되어야 토지이용수문학의 과제에 접근할 수 있다. 더군다나 하도변화와 관련된 홍수량의 변화를 추적해야 하는 경우 이러한 일반 모형의 개발은 절대적이다.

다음 절에서는 토지이용 변화와 관련된 다양한 수준의 수문 모형의 적용 사례들을 살펴보고, Lumped 모형을 사용해야 하는 현실적인 한계에 대해 살펴 보고자 한다.

2) 토지이용 변화와 수문 모형

수학적 수문 모형은 크게 블랙박스(black-box) 모형, Distributed 모형 그리고 Lumped 모형 세 가지로 나눌 수 있다. 블랙박스 모형에서는 물리적 process에 근거한 인풋과 아웃풋 사이의 전달 함수에 대해서는 고려하지 않고 단지 둘 사이의 통계적 관련성만을 고려한다. 단위유량도, 극치빈도분석, 회귀분석, 실시간예측분석 등이 이에 해당된다(Anderson and Burt, 1985). 이와는 반대로 Distributed 모형에서는 현재의 과학 수준에

서 예상할 수 있는 모든 수문 순환 과정을 수리학적 함수로 바꾸고 또한 유역분지를 삼차원으로 구획하여 각 Cell에 획득가능한 모든 수문 정보를 투입하여 수문 순환 과정을 모의한다. 한편 Lumped 모형은 이들 모형의 중간 단계에 해당되며, 이 모형에서는 수문 순환 과정을 몇 개의 수문 요소로 단순화시키고 각 요소들을 비선형 함수로 대체시킨다. 이 경우 해당 수문 요소의 물리적 특성은 각 함수의 변수들에 일부 반영되지만 이들 변수 사이의 상관성은 제거할 수 없다.

식생 변화와 관련된 블랙박스 모형의 경우, 기존의 지표 상태, 벌목 후 식생의 재성장, 벌목 방식 등 다양한 조건들을 고려해야 하므로 그 일반화가 쉽지 않다. 식생 변화의 수문학적 영향에 대해서는 대표유역분지와 실험유역분지의 유출량 비교가 전통적인 방법이며, Hibbert(1967), Hewlett *et al.*(1977), Owe(1985) 등은 회귀식을 이용해 이를 해결하려 하였다. 하지만 블랙박스 모형이 지니는 한계 때문에 그 성과는 미미하며, 특히 모형 전이의 문제는 여전히 숙제로 남아 있다. 하지만 TVA Storm Model을 이용한 Ardis(1973)는, 단순화시킨 수문곡선으로부터 4개 변수를 추출하고 이를 토지이용 변수와 유역분지 특성 변수들과 중회귀분석하였다. 그리고 이들 변수 4개를 연구지역 전체를 통해 지역화(regionalization)함으로써 나름의 의미있는 결론을 도출하기도 했다.

Distributed 모형은, 단순한 유출량과 각 수문 요소 내 저수량 뿐만 아니라 유역분지 내 상이한 토지이용의 공간적 패턴까지도 반영할 수 있어 토지이용수문학에 가장 적합한 모형이다(Beven, 1985). 하지만 Abbott *et al.*(1986)이 Distributed 모형의 하나인 SHE의 개발 과정에서 지적했듯이, 모형의 개발 및 모형 운영에 대한 경험, 방대한 계산 능력, 엄청난 양의 자료, 매 함수에 대한 적절한 해석, 지역구분 등 극복해야 할 과제가 산적해 있다. 실제로 Distributed 모형은 모형 개발이 힘들고 또한 국내의 여건처럼 수문 자료가 절대 부족한 경우 개발 후의 실용가능성이 의문시된다. 실제로 막대한 비용을 들여 개

발된 몇몇의 Distributed 모형 역시 실제 토지이용수문학에 이용된 사례는 극히 드물다(Ross *et al.*, 1979; Morris, 1980).

Lumped 모형은 블랙박스 모형과 현과학 수준에서 화이트박스 모형에 속하는 Distributed 모형의 중간 단계인 그레이박스 모형에 해당되며, 1966년 Crawford와 Linsley에 의해 처음 개발된 이래 수많은 모형이 개발되었다. 국내에서는 鮮于仲皓(1984)에 의해 Stanford Watershed Model이 소개된 이래, 여러 교과서에서 이 모형의 변종들과 모형의 구조 및 특성이 소개된 바 있다(尹男龍 1988). 그리고 소규모의 실험유역 분지에 Lumped 모형의 일종인 USDAHL-74 모형을 적용한 사례도 있다(權純國·高德九, 1987). 이 모형을 토지이용수문학에 이용하는 것이 모형 개발의 한가지 목적이었으나, 실제로 토지이용수문학에 이용된 예는 드물다. 그 중에서도 USDAHL-74 모형을 이용한 연구들이 주를 이루며, Fisher *et al.*(1979)와 Crow *et al.*(1980) 등이 이에 해당된다.

Lumped 모형은 토지이용과 수문 현상의 공간적 특성을 배제했다는 약점을 지니고 있으나 유역분지 각 수문 순환 과정을 분리하여 모형화하였기 때문에 토지이용 변화에 직접 영향을 받는 수문 순환 과정을 파악할 수 있다. 따라서 이 과정과 관계된 변수들의 변화와 토지이용 변화와의 관계를 밝히게 되면 토지이용 변화에 따른 수문 변화를 예측할 수 있다. 하지만 대규모 유역분지에서는 모형의 효율이 낮아지고 모형 보정 과정에서도 여러가지 문제가 나타난다. 또한 최적화된 변수들간의 상관관계를 밝히고 이를 제거하기란 매우 힘들며, 최적화된 변수들의 물리적 의미를 제대로 밝힐 수 없는 문제점도 대두된다. 본 연구에서는 이와 같은 Lumped 모형의 한계 및 장점을 고려해, Lumped 모형을 이용한 토지이용수문학에 또 다른 접근방법을 제시하고자 한다. Eeles(1978)가 지적했듯이, Lumped 모형의 최대 장점은 미세측 유출량의 확장 능력과 기계측 수문자료의 검정시 모형의 안정성에 있다. 따라서 안정된 모형으로부터의 확장유출량을 이용하여 토지이용 변화에 따른 수문 특성,

그 중에서도 홍수량의 변화를 추적할 수 있다면, 토지이용수문학에 어떤 새로운 대안을 제시할 수 있으리라 판단된다.

3. Lumped 모형의 개발

모형이란 현실의 축소판이다. 실체를 가능한 한 정확히 반영하려면 모형의 규모도 커질 뿐만 아니라 모형의 각 단계를 대표하는 변수들의 값을 정확히 얻는 데 시간과 비용이 많이 든다. 반대로 모형의 규모를 줄이면 변수들의 값은 얻기 쉬우나 실체를 너무 축소해 각 단계의 실질적인 물리적 의미가 왜곡된다. Lumped 모형은 원래 1966년 Crawford와 Linsley에 의해 최초로 개발된 이래 세계 각국에서 많은 모형이 개발되었다. 실제로 尹龍男(1988)의 수문학 교과서에 소개된 Lumped 모형만 해도 수십 개에 달하며, 지금까지 전세계에서 개발되었거나 실습용으로 만들어진 모형은 그 수를 헤아릴 수 없을 정도이다. Linsley(1982)는, 연구자가 모형의 선택이나 비교에서 어려움에 직면하게 되면 자신의 목적에 맞게 스스로 모형을 개발하여 왔기 때문에 이와 같은 모형의 양산으로 귀결된다고 지적한 바 있다.

본 연구에 사용될 Lumped 모형의 기본 골격은 영국수문연구소의 주도하에 Nash and Sutcliffe(1970)와 Mandeville *et al.*(1970)에 의해 개발된 Institute of Hydrology Model(IH 모형)로, 그 후 여러가지 형태로 모형이 수정되었다(Blackie, 1972; Dickinson and Douglas, 1972; Eeles, 1978; Blackie, 1979; Gustard *et al.*, 1989; Son, 1991). 특히 이 모형은 영국을 비롯해 동남 아시아, 아프리카 등의 여러 유역분지에 적용해 상당한 성과를 거둔 바 있다. 이 모형의 기본구조, 최적화 기법 그리고 모형의 응용에 대해서는 Blackie and Eeles(1985)가 자세히 소개한 바 있다.

1) 모형의 기본 구조

Anderson and Burt(1985)가 지적했듯이, Lumped 모형이란 비교적 소수의 수문 요소를 기

본적인 수문 순환에 따라 단순히 배열한 모형으로 각 수문 요소는 비선형 저류지로 표현된다. 수문 순환 과정이 함수의 형태로 표현되기 때문에 각 함수의 변수들은 수문 요소들의 준물리적(quasi-physical) 특성을 반영할 수도 있다. 하지만 한 저류지의 유출이 다음 저류지의 유입이 되기 때문에 각 저류지의 수문 특성을 반영하는 변수들간의 상관관계는 피할 수 없다.

IH 모형은 전체 수문 요소를 3개 내지 5개의 저류지로 구분하는데, 유역분지의 규모나 특성에 따라 저류지의 수가 달라진다. 5개의 저류지로 구분할 경우 엽차단(interception store), 지표지체(detention store), 유로 내 저류(surface runoff store), 토양수(soil moisture), 지하수(groundwater store)로 구분되나, 유역분지의 규모가 작을 경우 지표지체와 유로 내 저류가 제외되기도 한다. 개별 저류지를 정의하는 모든 가능한 함수를 일일이 검증하는 것이 현실적으로 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 기존의 연구와 영국수문연구소에서 제공한 두 종류의 Fortran source code(IH9-A와 IH9-B Model)에서 각 저류지에 대해 사용한 함수들을 추출하고, 이들 중에서 연구대상 유역분지에 적절한 함수를 찾아내려 한다.

2) 모형내 각 저류지에 대한 관계식

(1) 지표 저류지(surface store)

① 엽차단

현재의 엽차단량(CS)이 최대 엽차단량(SS)에 이를 때까지 강수량(RAIN)은 엽차단되며, CS가 SS에 이른 후 계속되는 강수량은 유수를 발생시키는 유효강수량(ERAIN)이 된다.

$$ERAIN = RAIN - (SS - CS)$$

한편 엽차단으로부터의 증발가능량(ES)은 최대증발가능량(EO)에 좌우되며, 이때 비례상수는 FS가 된다. 변수의 수를 줄이기 위해 FS를 1, 혹은 $1 + FC$ 로 대체하거나 CS 모두가 증발되는 것으로 가정하는 모형도 있다. 여기서 FC는 증산량과 관련된 변수이다. 기존의 모형에서 사용된 ES에 관한 관계식은 그림 2-A에 정리되어 있다.

만약 현재의 엽차단량이 증발가능량보다 적을 경우 잔여증발가능량(EEVAP)은 증산에 의해 채워진다.

$$\text{if } CS < ES, \text{ then } EEVAP = EVAP - CS$$

$$\text{if } CS \geq ES, \text{ then } EEVAP = 0$$

② 지표지체

지표지체란 유효강수량이 우수 발생 전에 지표의 와지에 의해 차단되는 양으로, IH9-A Model에서만 이를 고려하고 있다. 지표지체량은 잔여증발가능량에 의해 제거되는데, 현재의 지표지체량(CSTOR)과 유효강수량(ERAIN) 그리고 최대 지표지체량(SDS)과의 관계, 지표지체로부터의 최대증발가능량(EEC), 그리고 잔여증발가능량(EEVAP)의 관계식은 다음과 같다.

$$EEC = ERAIN - (SDS - CSTOR)$$

$$EEC = FC \cdot EEVAP$$

$$\text{if } EEC > CSTOR,$$

$$\text{then } EEVAP = EEVAP - CSTOR$$

$$\text{if } EEC \leq CSTOR,$$

$$\text{then } EEVAP = 0$$

그리고 IH9-A Model에 포함된 지표지체에 대한 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$EEVAP = EVAP - ES$$

$$EEC = FC \cdot EEVAP$$

(2) 토양수 저류지(soil moisture store)

① 지표유출

엽차단과 지표지체를 거친 후에도 여전히 유효강수량이 남아 있을 경우, 이 강수량은 우수 발생기구(surface runoff-generating mechanism)에 의해 지표유출과 삼투로 나누어진다. 지표유출의 발생은 토양수 부족량, 강우강도, 유효강수량의 크기 등에 좌우된다. 실제로 기존의 각 모형마다 지표유출에 대한 관계식이 다양하게 표현되고 있으며, 최적화하여야 하는 변수 수도 다양하다. 유효강수량 중에서 지표유출량(ROFF)은 매개 변수 ROP에 의해 결정되는데, 나머지(ERAIN')는 토양수로 유입된다. 기존의 모형에 사용된 ROP와 관련된 관계식은 그림 2-B에 정리되어 있다. Eeles(1978)의 경우와 같이 강우강도와 강우지속 기간을 자세히 고려한 경우는 우수발생기구가 어느 정도 정확하게 표현되기는

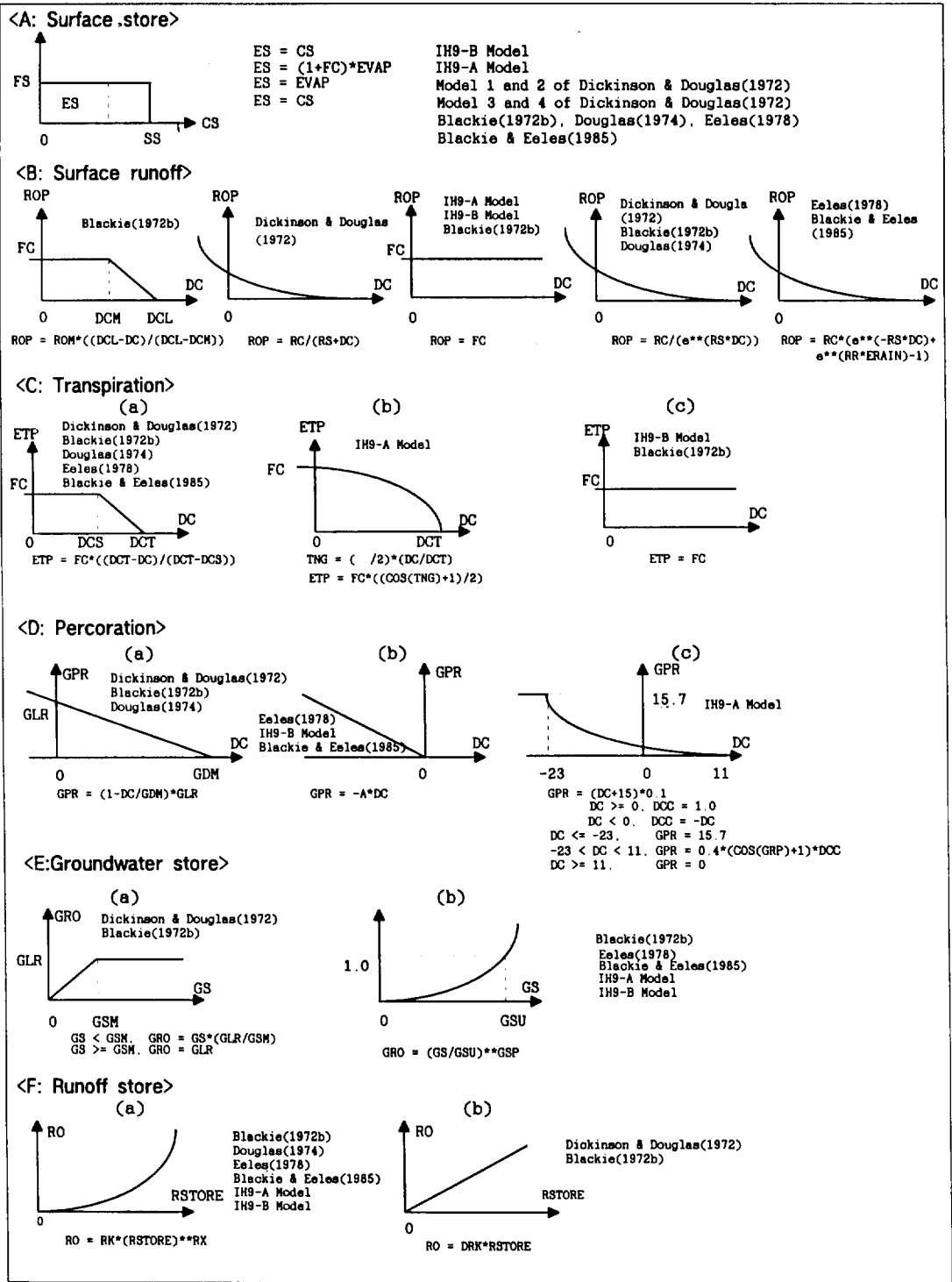


그림 2. 각 저류지에 대한 관계식

하겠지만, 최적화하여야 하는 변수의 수가 많아 지는 부담도 있다.

② 증산

엽차단과 지표지체로부터의 증발에도 불구하고 계속 증발가능량이 남아 있을 경우, 그 잔여분(EEVAP)은 토양수로부터 식물에 의해 증산된다. 증산량(EC)은 매개 변수 ETP에 의해 결정되며, 이는 주로 토양수 부족량(DC)에 좌우된다.

$$EC = ETP \cdot EEVAP$$

일반적으로 DC가 증가하면 증산량이 줄어드나, 토양수가 충분할 경우 DC에 영향을 받지 않고 잔여증발가능량 모두가 증산될 수 있다(IH9-B Model; Blackie, 1972). 증산량과 관련된 매개 변수 ETP의 관계식은 그림 2-C에 정리되어 있다.

③ 삼투(percolation)

토양수 저류지에서 지하수 저류지로 유입되는 물을 삼투라고 한다. 이는 주로 토양수 부족량(DC)에 의해 좌우되는데, 삼투량(GPR)에 관한 관계식은 그림 2-D에 정리되어 있다. 두 가지 상황을 가정하고 있는데, (b)와 같이 DC가 양수이면 삼투가 전혀 없는 것으로 가정하는 경우와 (a)나 (c)와 같이 DC가 양수라 할지라도 삼투가 있을 것을 가정하는 경우이다. 삼투량은 주로 토양의 투수성에 의해 좌우되며, 1차 하천의 유역분지와 같이 유수가 거의 지하수로부터 공급되는 경우 삼투에 대한 보다 정확한 관계식이 요구된다.

한편, 토양수의 변화는 다음 식으로 정리될 수 있다.

$$DC = DC + (ERAIN - ROFF) - (EC + GPR)$$

(3) 지하수 저류지(groundwater store)

지하수 저류지로부터 하도로 유입되는 기저유출량(base flow)을 결정하는 관계식에서는, 감수곡선(recession curve)의 비선형성 때문에 일반적으로 비선형 함수를 이용한다. 초기 IH 모형(Dickinson and Douglas, 1972; Douglas, 1974)에서는 Muskingum의 홍수추적방정식을 이용해 그림 2-E의 (a)와 같이 표현했다. 그림 2-E의 (b)는 그 이후의 모형에서 주로 사용되는 비

선형 관계식이다. 두 개의 변수 GSP와 GSU는 최적화해야 하는 변수이나, 감수곡선으로부터 개략적인 값을 구해 모형 보정시 초기 값으로 사용할 수 있다(Son, 1991 참조).

(4) 유로 내 저류(runoff store)

유수발생기구에서 하도로 공급된 유수는 하도 내에서 저류된 후, 직접유출의 형태로 유역분지를 떠나게 된다. 초기 IH 모형(Dickinson and Douglas, 1972; Blackie, 1972)에서는 그림 2-F의 (b)와 같은 선형 함수를 사용하였으나, 그 이후의 모형에서는 그림 2-F의 (a)와 같은 비선형 함수를 사용했다. 이 경우 RK와 RX는 최적화하여야 하는 변수에 해당된다.

(5) 시간지체(time delay)

기저유출량과 하도로부터의 직접유출량은 전체 유출량으로 유역분지를 떠나기 전에 GDEL과 RDEL이라는 시간 변수 만큼 지체된다. 이러한 시간지체를 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$FLOW(n) = RO(n - RDEL) + GRO(n - GDEL)$$

여기서 FLOW(n)은 n번째 시간 간격에서의 총 유출량이다. 대부분의 모형에서는 GDEL과 RDEL을 고려하고 있으나, 실제로 유역분지의 규모나 경사와 같은 유역분지의 물리적 특성에 따라 이들 변수들이 제외될 수 있다.

3) 자동최적화 기법

Dawdy and O'Donnell(1965)이 Lumped 모형에 Rosenbrock(1960)의 자동최적화 기법(automatic optimization technique)을 사용한 이래, 이 기법은 IH 모형의 보정을 위한 기본적인 기법으로 사용되어 왔다. 본 연구에 사용될 기법 역시 Rosenbrock의 것으로 IH9-A Model에 sub-program으로 부착된 것을 일부 변형하여 사용하였다.

Rosenbrock의 자동최적화 기법에서는 몇 가지 초기값을 지정해 주어야 한다. 첫째, 최적화시킬 각 변수의 최대값과 최소값을 지정해야 하고; 둘째, 한 개 이상의 변수를 최적화할 경우 변수의 중요도와 민감도에 따라 최적화 순서를 정해야 하고; 셋째, 목적함수값 차이의 하한을

설정해야 하며 ; 마지막으로 목적함수값의 역전 회수의 하한을 지정해야 한다.

만약 두 개의 변수 A와 B를 최적화할 경우, 함수 공간에서 변수 A의 변화에 따라 목적함수값이 계속해서 작아진다면(다시 말해 새로운 변수값이 보다 성공적인 결과를 가져다 준다면), 변수 A의 탐색 벡터(search vector)의 길이가 계속해서 증가한다. 이 과정에서 목적함수값이 증가한 경우, 탐색 벡터의 방향은 역전되고 목적함수값이 감소할 때까지 탐색은 계속되거나 탐색 벡터의 길이는 줄어든다. 본 연구에서 목적함수값의 역전은 최소 3회 이상 되도록 했다. 이 과정에서 목적함수값 차이의 하한(본 연구에서는 그 값을 0.1%로 했다)보다 적은 값으로 목적함수값이 수렴되는 경우, 반복 계산은 중단되고 그 변수의 변수값으로 지정된다. 첫번째 변수값이 지정되면, 순서에 따라 다음 변수의 탐색을 위해 함수 공간의 축이 직각을 회전하여 첫번째 변수와 마찬가지로의 과정을 통해 변수값을 찾는다.

4. 사례 연구

1) 사례 연구지역과 수문 자료의 개관

(1) 연구지역 개관

Russell(1962)의 지적에 따르면, 동 아프리카 고산지대는 연간 강수량이 1,200mm 이상되는 습윤한 곳으로 이곳에는 영구하천이 흐르고 식생들이 왕성하게 자란다. 하지만 경제적 가치가 낮은 식생들로 가득차 있고 저지의 과잉인구가 이곳으로 몰려와 인구밀도가 낮은 곳에서도 적용가능한 이동식농업을 무차별적으로 강행한 덕분에 토지 뿐만 아니라 수자원에도 심각한 영향을 미쳤다. 동 아프리카 각 정부는 이러한 문제를 해결할 대안으로, 동 아프리카 농림연구소

(EAAFRO)의 주관하에 1956년부터 토지이용에 따른 수문학적 영향을 밝히기 위해 케냐에서 유역분지 연구가 진행되었다(Blackie, 1972).

연구지역인 Kimakia 지역은 Rift Valley 동편 가장자리에 있는 Aberdare 산맥에 위치하고 있으며, 산맥의 높이는 3,000m가 넘고 길이는 약 50km에 달한다(Pereira, 1962b). 또한 이 산맥의 해발 2,000~3,000m 지대는 대나무가 주식생을 이루고 있다. 케냐 삼림청(Kenya Forest Department)에서는 이곳을 목재생산지역이나 목양지대로 전환할 계획으로 이러한 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 추적하기 위해 2개의 실험유역분지와 1개의 대표유역분지를 관리하였다(Blackie and Edwards, 1979).

Kimakia 지역은 적도(남위 0.5도)에 위치해 있고 평균 해발고도는 2,400m이다. Rift Valley 형성과 관련된 화성쇄설성 퇴적물(Pyroclastics)이 60m 두께로 현무암을 덮고 있다. 이 퇴적물이 풍화를 심하게 받아 형성된 황갈색 silty clay가 지표층을 덮고 있는데, 이 퇴적물의 투수성은 매우 높다(Pereira, 1962). Kimakia 지역에는 3개의 유역분지가 있는데, Catchment 10(K10)은 대표유역분지이고, Catchment 11과 17(K11과 K17)은 실험유역분지이다. 본 연구의 대상 유역분지는 유역면적이 36.4ha에 달하는 K11 유역분지이다. 1958년 1월부터 1974년 6월까지 이 유역분지의 토지이용 변화는 표 1과 같다.

(2) 수문 자료의 개관

IH 모형의 보정에 이용될 자료는, 비교적 쉽게 획득할 수 있는 수문 자료인 일평균유량, 일평균강수량, 그리고 일평균증발량 등 3종류이다. 이곳은 적도수렴대의 남북 이동으로 2번의 우기(4~5월과 10~11월)가 나타나고, 일 강수는 주로 21시부터 24시 사이에 지형성 강우의 특성을 보인다(Edwards, 1979). K11 유역분지에

표 1. K11 유역분지의 토지이용 단계

기 간	토 지 이 용	모형 보정 기간
K11-A(1958~1960)	소나무 묘목의 식재 및 소채류의 간작	1/1/1958~31/12/1960
K11-B(1961~1966)	소나무가 5~15m까지 급성장하여 수관이 서로 맞닿음.	1/1/1961~30/11/1966
K11-C(1967~1974)	소나무가 15~25m까지 계속 성장하여 안정된 수관 형성	1/12/1966~30/6/1974

서는 초기(1958~1967)에 10군데의 우량관측지점이 운영되었으나, 후기(1967~1974)에 들어 6군데로 줄어들었다(Blackie and Edwards, 1979). K11 유역분지의 유량은 복합 weir를 이용하여 측정하였다. 한편, 실험유역분지에서 북쪽으로 약 2km 떨어진 동 아프리카 차연구소(Tea Research Institute of East Africa) 내 기상관측소의 자료를 이용해, Penman 공식에 따라 최대증발가능량을 구했다. 그리고 이를 일평균증발량으로 사용하였다.

2) 모형의 개발

보정기간 내 수문 특성 범위 밖의 극단적 상황을 예측하기 위해서는 가능한 한 수문학적 실체를 정확히 반영하는 모형을 구축해야 하지만, 계산 능력, 최적화 기법, 시간, 경험 등의 제약으로 수문 요소들의 관계, 특히 변수의 수는 줄어 들 수 밖에 없다. 본 연구에서는, 케냐 실험 유역분지에 성공적으로 검정된 바 있는 Blackie (1972)의 9-변수 모형(Stage IV)을 유역분지의 특성에 맞게 일부 수정하여 이용했다. Blackie의 모형을 수정하는 데는 다음의 5가지 사항이 고려되었다.

첫째, 본 연구는 토지이용 변화(식생 변화)에 따른 수문 특성의 변화를 추적하는 것이 목적이기 때문에, 식생 변화에 직접적인 영향을 받는 수문 요소를 가능한 한 정확히 반영하여야 한다. 즉, 엽차단과 토양수 변화에 따른 증산량의 변화를 정확히 반영하기 위해 엽차단을 나타내는 관계식의 변수로 2개의 변수(SS와 FS)를 사용했다.

둘째, Dagg and Pratt(1962)의 지적처럼 K11 유역분지 전체 유량의 90% 이상이 기저유출에서 비롯된 것이기 때문에, 증산과 삼투량을 결정하는 토양수량에 대한 정확한 관계식이 모형의 성공 여부와 밀접한 관계를 갖는다. Blackie의 모형에서는 증산량이 건조한 시기에도 항상 일정한 것으로 가정했다. 하지만 Pereira(1957)는, 이 지역의 대나무와 열대산지교목 지대에서 건조한 기간에 상대증산율(ET/EO)이 0.5에서 0.8로 증가한다고 지적한 바 있다. 따라서 토양

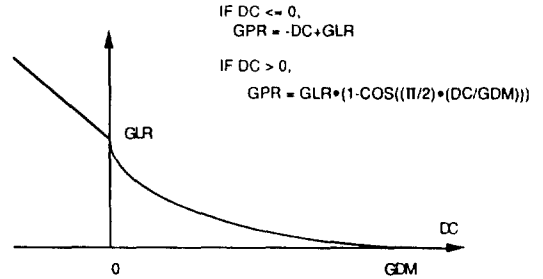


그림 3. 본 모형에 적용된 삼투의 관계식

수 부족에 따른 증산량의 감소를 나타내고 또한 변수의 수를 줄이기 위해 <그림 2-C>의 (a) 대신 <그림 2-C>의 (b)를 사용했다.

셋째, K11 유역분지 토양의 투수성이 매우 높기 때문에, Blackie는 토양수의 삼투를 다음과 같이 표현했다.

$$\begin{aligned} \text{if } DC \leq 0 \quad & GPR = -DC + GLR \\ \text{if } DC > 0 \quad & GPR = GLR \cdot (1 - DC/GDM) \end{aligned}$$

하지만 삼투량은 토양수 장력의 증가에 따라 감소하는 것이 일반적인 현상이기 때문에, 토양수 부족시(DC > 0) 삼투량의 변화율이 점차 감소하는 관계식으로 표현하는 것이 보다 정확할 것으로 판단된다. 이러한 관계를 나타낸 것이 그림 3이며, 변수의 수를 줄이기 위해 cosine함수를 이용했다.

넷째, 실험유역분지의 규모가 단지 0.364km²에 지나지 않아 하도 내 유수는 단지 하나의 선형저류지에 의해 지체되는 것으로 가정했다. 실제로 선형저류지를 고려할 경우 이는 유로 내 유수의 지체시간(RDEL)을 고려하는 것과 마찬가지로 변수의 수를 줄이기 위해 하도 내 저류와 하도 내 유수의 지체 시간을 하나의 변수 RDEL로 가정하였다.

다섯째, 일반적으로 모든 저류량(엽차단, 유로내 저류 등)이 전혀 없는 시기, 다시 말해 5내지 6일 정도의 무강수일 이후를 모형 보정의 시작 시기로 정한다. 하지만 토양수 부족량은 증산, 증발, 삼투량 등 수문 요소 내 물 순환량을 결정하는 가장 중요한 수문량이기 때문에 정확한 양이 초기 조건으로 지정되어야 한다. 본 연구에서는 초기 토양수 부족량을 모형보정 초

토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 추적하기 위한 Lumped 모형의 개발

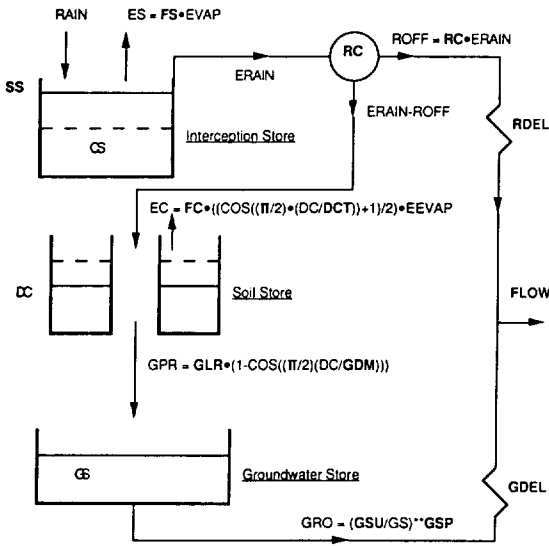


그림 4. 본 연구에서 사용된 R1131 모형의 기본 구조기에 직접 산입하는 방법을 택했다.

Blackie(1972)의 9-변수 모형에 이상의 5가지 유역분지 특성을 반영하여 수정한 모형이 R1131 (11-parameter, 3-storage, 1-input option) 모형인데, 이 모형의 구조를 개략화한 것이 그림 4이다.

3) 모형 보정

① 모형 보정

모형 보정시 초기조건을 결정하는 데 상당한 주관성이 개입되므로 Lumped 모형의 운영에는 많은 경험이 요구된다. 실제로 변수의 초기치와 허용 범위, 변수의 민감도에 따른 각 변수의 최적화 순서, 그리고 모든 변수를 한꺼번에 최적화할 수 없는 최적화 기법 내의 한계 등 자동최적화 기법을 모형 보정에 도입하더라도 주관적 판단과 경험이 내재될 가능성은 충분히 있다. Blackie(1972)의 모형, IH 모형의 상업용 프로그램인 HYRRM, 그리고 그 밖의 모형에서 사용된 초기치를 근거로 하여 다음과 같은 모형 보정 초기조건을 정했다(표 2). 특히 GSP와 GSU의 초기치는 K11 유역분지의 감수곡선으로부터 구한 것으로 실제 기저유출량을 추정하는 데 도움이 된다(Blackie, 1972; 자세한 과정에 대해서는 Son, 1991 참조).

표 2. 모형 보정의 초기 조건

변수의 최적화 순서	분석 1	분석 2	분석 3
1	FC(0.8)	GDEL(1.0)	FC
2	GSP(5.7)	GLR(20.0)	GSP
3	RC(0.03)	GDM(90.0)	RC
4	SS(2.0)	DCT(350.0)	SS
5	GSU(225.0)	FS(1.5)	GSU
6		RDEL(0.5)	

표 3. 각 토지이용 단계에 대한 모형 보정 결과

	K11-A	K11-B	K11-C
DC 초기치	50	60	150
FC	0.728841	0.883406	0.890421
GSP	5.593234	5.341726	5.650184
RC	0.029753	0.037374	0.034551
SS	0.095649	1.364673	1.039375
GSU	237.2735	227.5164	251.6851
GDEL	1.069107	0.468977	0.801991
GLR	8.305387	16.02746	9.326280
GDM	136.0138	111.1191	95.88032
DCT	214.6666	279.1732	287.0988
FS	0.132725	1.023249	1.027904
RDEL	0.399216	0.301858	0.420537
모형유효도	96.78%	97.20%	94.62%
전체유량오차	-1.78%	-3.36%	-5.32%
총유량 관측치	3352.847	8484.199	6199.692
총유량 예측치	3293.219	8189.786	5869.818
총강수량 관측치	6034.011	15184.44	15157.43
기저유출량 예측치	3115.483	7691.215	5399.777
최대증발가능량	4624.012	8510.282	110057.4
기저유출률	94.60%	93.81%	91.99%
수분이용률	61.60%	82.81%	83.98%
DC 초기치	50	60	150
DC 최종치	126.06	131.42	13.32
GS 초기치	283.14	246.88	292.24
GS 최종치	251.55	256.42	320.50

〈분석 1〉에서는 각 변수에 대한 모형의 민감도(sensitivity)에 따라 5개의 변수를 선정해 그 차례를 따라 자동최적화하였고, 〈분석 2〉에서는 나머지 변수들을 민감도에 따라 자동최적화하였다. 〈분석 1〉과 〈분석 2〉에서 얻은 변수의 값을

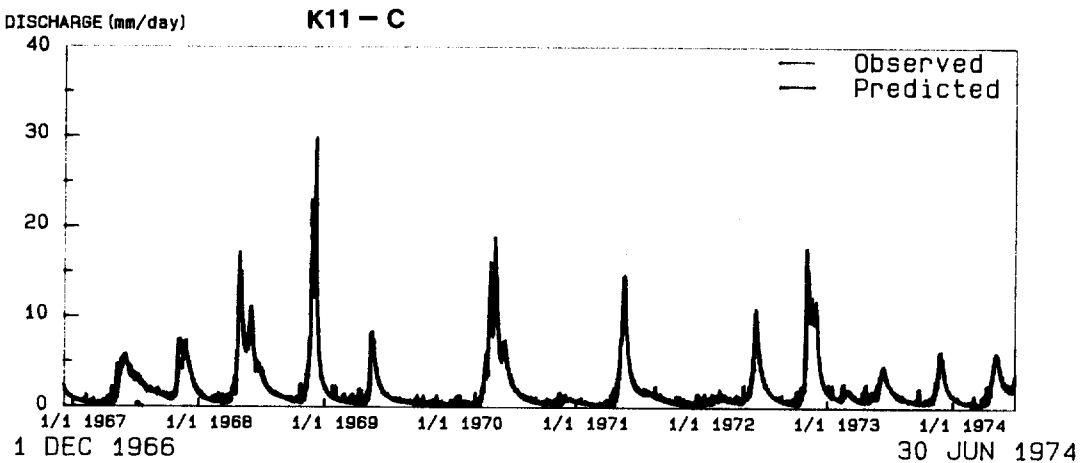
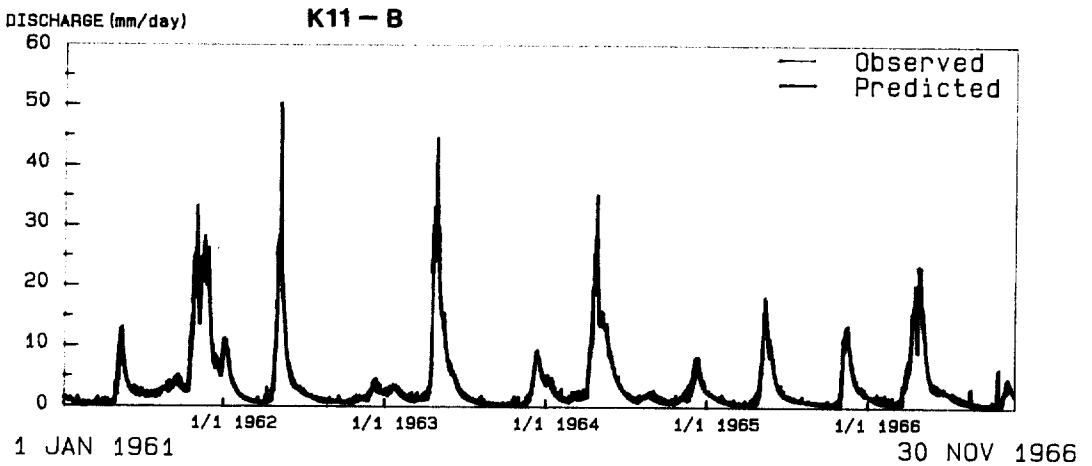
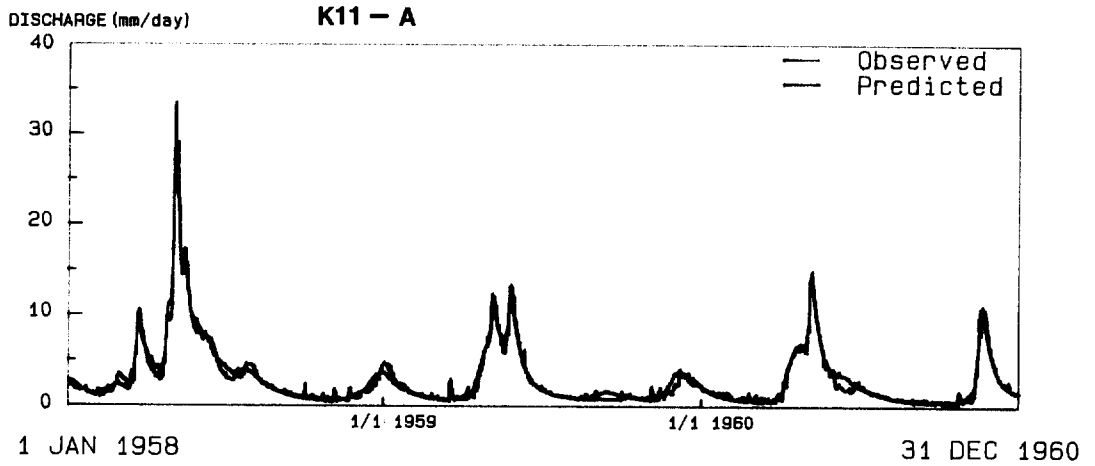


그림 5. 각 보정기간에 대한 모형 보정 결과

초기치로 하여 <분석 1>에서 자동최적화한 주요 변수들은 <분석 3>에서 다시 최적화하는 방법을 택했다. 실제로 11개 변수 모두를 한꺼번에 최적화할 수도 있으나, 계산기 내 sine 함수의 계산 능력 때문에 프로그램이 중단되는 경우가 빈번해 11개 변수를 2집단으로 나누어 최적화하였다.

3단계로 구분된 각각의 보정기간에 대해 모형 보정을 실시했다(표 1 참조). 각 토지이용단계(K11-A, K11-B, K11-C)에 대한 모형 보정 결과는 표 3에 요약되어 있다. 그리고 각 단계의 실측유량과 예측유량과의 비교는 그림 5에 나타나 있다. 모형유효도¹⁾는 각각 96.78%, 97.20%, 94.62%이며, 전체유량오차²⁾는 각각 -1.78%, -3.36%, -5.32%이다.

(2) 모형 보정 결과에 대한 검토

비록 변수의 최적화에는 자동최적화 기법을 이용했으나, 초기조건을 결정하는 데는 지금까지의 연구 결과를 바탕으로 Trial-and-Error 방식의 접근이 불가피했다. 모형 보정 결과 각 토지이용 단계별로 보정된 모형의 유효도는 95%에 접근하거나 그 이상이었고, 전체유량 오차는 5% 이내였다. 하지만 이러한 모형 보정 결과를 최상의 것으로 판정할 만한 아무런 합리적 그리고 논리적 증거를 확보할 수 없다. 실제로 모형유효도와 전체유량오차가 수문곡선의 모든 특성을 제대로 설명해 주지는 못한다. 하지만, 다음과 같은 몇 가지 점을 통해 이들 보정 결과가 나름대로의 의미를 가지고 있음을 추론해 볼 수 있다.

첫째, 지금까지 여러 유역분지에서의 IH 모형의 보정 결과를 상회하며, 특히 동일한 수문 자료에 대한 Blackie(1972)의 보정 결과를 상회하고 있다.

둘째, 그림 6에서 보듯이, 수분이용률(relative water use ratio)³⁾과 증발산을 통제하는 변수(FC, SS, FS) 사이에서 정성적인 상관 관계가 발견된다. 또한 Blackie(1979)의 수분수지 분석에 따른 수분이용률과 본 연구의 보정 결과가 거의 같은 경향을 보이고 있다.

셋째, Dagg and Pratt(1962)의 결과에 의하면 K11 유역분지에서 총유출량에 대한 기저유출량의 비율이 98.19%였다. 보정 결과 역시 90%를 상을 상회하고 있어, 투수성이 강한 유역분지의 특성을 반영하고 있다. 토지이용의 변화에도 불구하고 기저유출량의 변화가 거의 없는데, 이 역시 기저유출량을 통제하는 변수(GSP, GSU, GLR, GDM)의 변화가 비교적 적다는 사실과 일치하고 있다.

마지막으로 그림 5에서 보듯이 예측유량의 침투홍수량이 관측유량의 침투홍수량을 제대로 추적하고 있다는 점과 감수곡선의 형태가 유사하다는 점 역시 보정 결과의 유의성을 보장해 주는 또 다른 특성으로 볼 수 있다.

4) 확장유출량의 모의 발생과 이를 이용한 수문 변화 추적

(1) 확장유출량의 모의 발생

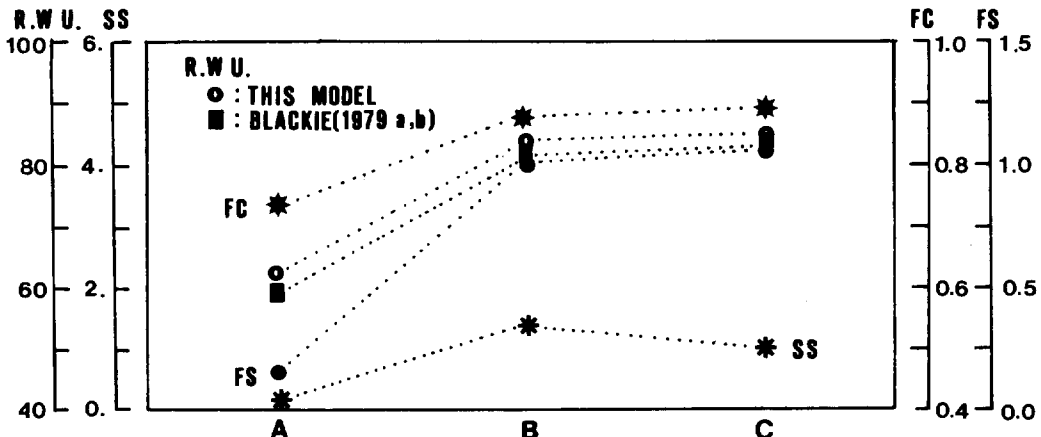


그림 6. 수분이용률과 이와 관련된 변수치와의 관계

모형 보정 결과가 보정 기간 내 특이한 수문 현상(극심한 홍수나 갈수)에 의해 왜곡되지 않았다면, 비교적 측정이 용이한 장기간의 강수량 자료와 증발량 자료를 이용해 모형으로부터 장기간의 유출량을 확장시킬 수 있다(그림 7). 이러한 확장유출량의 모의 발생은 Lumped 모형의 최대 장점의 하나로, 유량측정 기간이 짧다 하더라도 확장유출량을 이용하게 되면 장기간에 걸친 해당 유역분지의 수문 특성을 파악해 낼 수 있다. 또한 침투홍수량과 감수곡선의 형태를 제대로 반영한 모형일 경우, 확장유출량으로부터 통계학적인 유출 특성(예를 들어 빈도해석을 통한 특정 재현주기에 대한 홍수량의 규모)을 파악해 낼 수 있다.

K11 유역분지의 수문 자료는 3단계의 토지이용으로 나누어져 있어, 각 단계별 수문자료의 기간이 10년 미만이고 K11-A의 경우 2년에 불과하다. 따라서 모형을 통해 각 단계별로 16년 6개월씩의 유출량을 확장시킬 수 있다면, 장기간의 자료를 기반으로 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 추적할 수 있다. 이는 마치 실험유역분지를 49년 6개월 동안 관리해 온 셈이 된다.

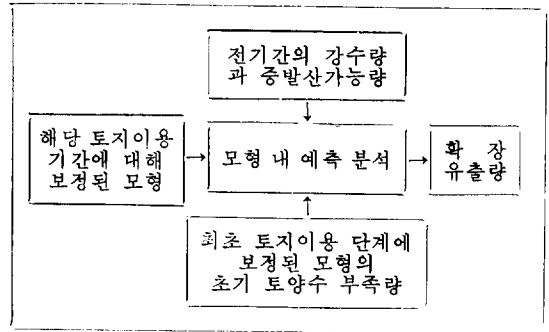


그림 7. 예측 분석의 개념도

(2) 수분수지의 변화

모형 보정 결과와 확장유출량으로부터의 수분 이용률과 기저유출률을 비교해 보면 거의 유사하다(표 4). 이는 각 모형보정 결과가 짧은 보정기간 동안의 특이한 수문 환경에 의해 왜곡되

표 4. 토지이용 변화에 따른 수분수지의 변화

구 분	분석 방법	K11-A	K11-B	K11-C
수분이용률	모형 보정	61.60%	82.81%	83.98%
	예측 분석	60.21%	81.23%	83.78%
기저유출률	모형 보정	94.60%	93.81%	91.99%
	예측 분석	95.07%	92.81%	92.90%

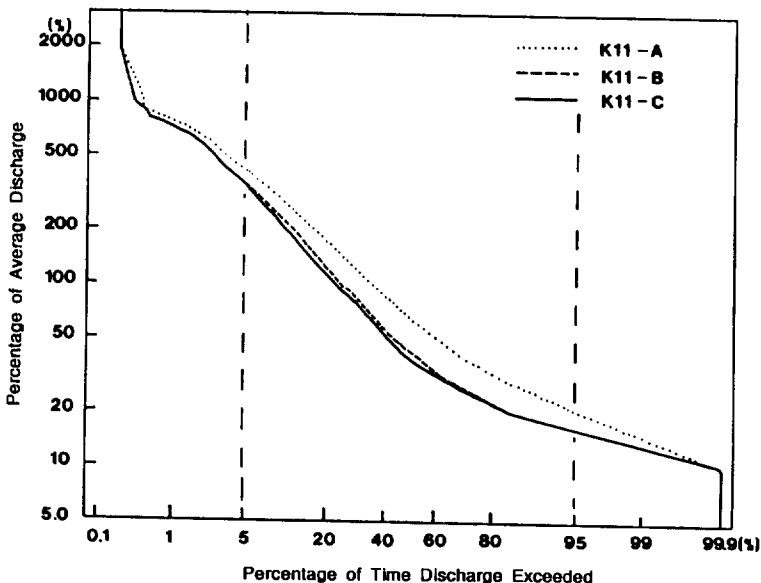


그림 8. 토지이용별 유량빈도곡선

토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 추적하기 위한 Lumped 모형의 개발

지 않았음을 반영하며, 확장유출량으로 토지이용 변화에 따른 수분수지의 변화를 추론하는 것이 어느 정도 타당함을 시사해 준다.

기존의 삼림을 제거하고 묘목을 식재한 초기(K11-A) 단계의 수분이용률은 60.2%이나 그 이후의 단계에서는 각각 81.23%와 83.78%이다. 이는 소나무의 성장에 따른 엽차단과 증산량의 증가를 반영해 주고 있으며, 어느 정도까지 식생이 성장하면 엽차단과 증산량은 그다지 변화하지 않음을 알 수 있다. 한편 기저유출률은 95.07%에서 92.81%, 92.90%로 약간 줄어들었다. 이는, 식생의 성장에 따라 식물뿌리의 토양

수 이용량의 증가로 지하수 저류량에 일부 영향을 미쳤음을 시사해 준다.

(3) 홍수량의 변화

토지이용 변화에 따른 홍수 특성의 변화를 확인하기 위해 두 가지 방법을 사용했다. 그 하나는 유량빈도곡선(flow duration curve)으로 유출량과 그 유출량을 초과하는 기간의 백분율과의 관계를 나타내는 곡선이다. Shaw(1988)는 이 곡선의 형태가 평균적인 강수 특성에 대한 유역분지의 반응을 잘 나타낸다고 지적한 바 있다. 또한 이 곡선의 경사가 급하면 홍수가 빈번하고 기저유출량이 상대적으로 적으며, 반대로 경사

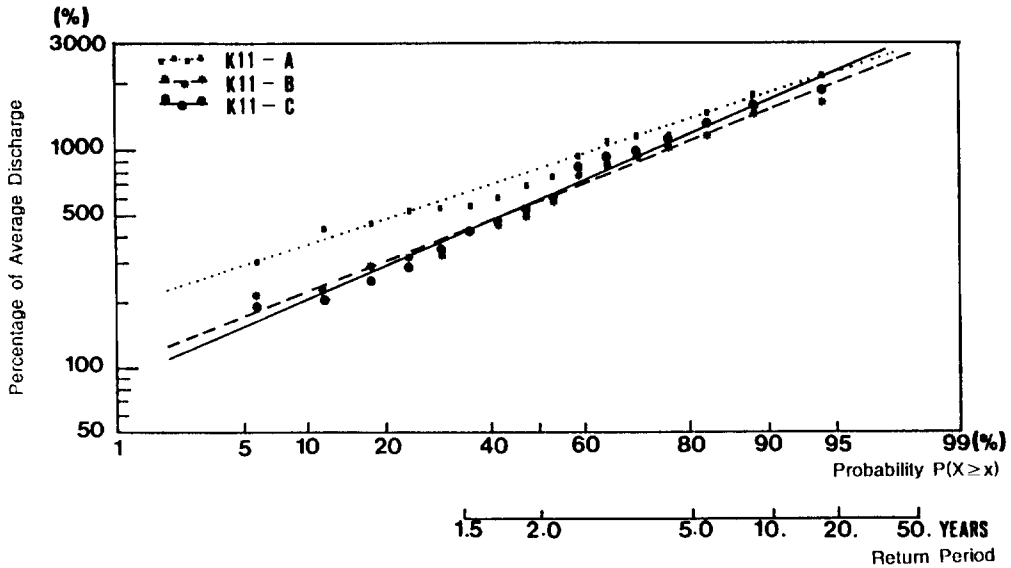


그림 9. 각 토지의용별 홍수량 빈도해석

표 5. 각 재현주기별 홍수량의 변화

구 분	K11-A		K11-B		K11-C	
회귀식	$Y=0.265X+2.278$		$Y=0.322X+2.006$		$Y=0.354X+1.940$	
R ²	98.01%		97.84%		98.09%	
재현주기 (년)	홍수량(관측치 평균유량에 대한 %)	홍수량(관측치 평균유량에 대한 %)	변화 (%)	홍수량(관측치 평균유량에 대한 %)	변화 (%)	
1.5	610.01	419.09	68.7	614.19	67.9	
2.0	788.55	572.49	72.6	583.54	74.0	
5.0	1317.67	1068.28	81.1	1158.24	87.9	
10.0	1724.27	1481.13	85.9	1658.64	96.2	
20.0	2148.65	1935.10	90.1	2225.11	103.2	
50.0	2771.51	2643.39	95.2	3134.84	112.9	

가 완만하면 홍수가 드물고 기저유출량이 상대적으로 많다(尹龍男, 1984). 한편 홍수량의 빈도 해석에는 여러가지 방법이 있으나, 본 분석에서는 연최고치계열(annual maximum series)의 홍수자료를 이용하고, plotting position 공식으로는 Weibull 공식을 이용했으며, 정규대수확률지(log-normal probability paper)를 사용했다.

그림 8에서 보듯이 토지이용 단계 중 초기(K11-A)의 유출 특성은 중기(K11-B)와 후기(K11-C)의 것과는 다르다. 이는 수분이용률과 기저유출량의 변화 경향과 마찬가지로이다. 본 분석에 사용한 유량은 10일 이동평균유량이며, 중

측에 나타난 유량은 실측된 전체 기간의 평균유량에 대한 백분비이다. 상위 5% 이상의 홍수에 비해 50% 부근의 변동이 큰 것으로 미루어 보아, 토지이용 변화에 따른 유출 특성의 변화는 극단적인 대규모 홍수보다는 정상시의 유량에 반영됨을 알 수 있다.

그림 9는 홍수량 빈도해석을 위한 그래프로, 각 토지이용 단계에 대한 16년 6개월간의 확장 유출량으로부터 16년간의 연 최고치계열 자료를 얻고 이를 정규대수확률지에 옮겨 놓은 것이다. 각 회귀식의 결과와, 재현주기별로 초기 단계의 홍수량에 대한 중기와 후기의 홍수량 변화 정도

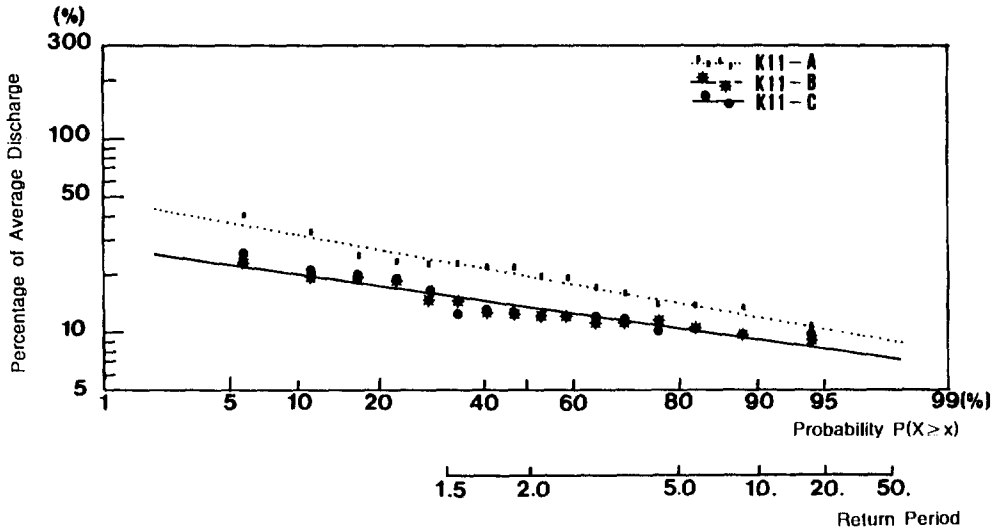


그림 10. 각 토지이용별 갈수량 빈도해석

표 6. 각 재현주기별 갈수량의 변화

	K11-A	K-11-B	K11-C		
회귀식	$Y = -0.1677X + 1.683$	$Y = -0.1335Y + 1.437$	$Y = 0.134X + 1.439$		
R ²	96.04%	91.83%	99.72%		
재현주기 (년)	갈수량(관측치 평균유량에 대한 %)	갈수량(관측치 평균유량에 대한 %)	변화 (%)	갈수량(관측치 평균유량에 대한 %)	변화 (%)
1.5	23.19	15.25	65.8	15.23	65.7
2.0	19.73	13.41	68.0	13.28	67.8
5.0	14.29	10.37	72.6	10.32	72.2
10.0	12.07	9.07	75.1	9.00	74.6
20.0	10.51	8.12	77.3	8.05	76.6
50.0	8.94	7.14	79.8	7.07	79.1

가 표 5에 정리되어 있다. 홍수 규모가 작은 1.5년 주기의 홍수의 경우 식생변화에 따라 31.3%(K11-B)와 32.1%(K11-C) 정도로 홍수량이 줄어들었으나, 홍수 규모가 커짐에 따라 홍수량의 감소 정도는 점차 작아지고 있다. 재현주기가 20년 이상인 홍수의 경우 홍수량 변화가 거의 없다.

(4) 갈수량의 변화

홍수량의 빈도해석과 마찬가지로 Weibull 공식과 정규대수확률지를 사용하였고, 연 최소치계열의 자료를 사용해 갈수량 빈도해석을 시도했다. 홍수량의 경우 연 최고유량이 다른 유량과 확연히 구분되는 순간 유량으로 나타나나, 갈수량의 경우 극심한 갈수기가 오랫동안 지속되는 경우가 일반적이다. 따라서 일년 중 최소유량을 연 최소치계열의 자료로 사용하기보다는 7일 내지 10일간의 평균유량 중 최소치를 해당 연도의 최소유량으로 사용하는 것이 보다 적절하다 (Ward and Robinson, 1990). 본 연구에서는, Drayton *et al.*(1980)이 열대지역 갈수량 분석에 사용한 바 있는, 매 10일 동안의 평균유량을 연 최소치계열의 자료로 사용했다.

그림 10은 갈수량의 빈도해석을 위한 그래프로, 각 회귀식의 결과와 각 재현주기별로 초기 단계의 갈수량에 대한 중기 및 후기의 갈수량 변화가 표 6에 정리되어 있다.

재현주기가 짧은 경우(재현주기 1.5년) 갈수량의 변화 폭이 크나(34.2%, 34.3%), 재현주기가 긴 경우(재현주기 50년) 갈수량의 변화 폭이 작다(20.2%, 20.9%). 결국 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화, 그 중에서도 갈수량과 홍수량은 일반적인 한발이나 홍수 규모가 작은 경우 영향을 받으나, 극심한 한발이나 홍수 규모가 큰 경우 그다지 영향을 받지 않는다. 이와 같은 사실은 도시화에 따른 홍수량의 변화에서도 마찬가지로의 결과가 보고된 바 있다(Hollis and Lukett, 1976).

5. 결 론

본 연구에서는 토지이용수문학을 위한 하나의

대안으로, 모형의 단순성, 모형 변형의 용이성, 그리고 모의된 모형으로부터 지속적인 유량 예측 능력을 지닌 Lumped 모형을 이용해 토지이용 변화에 따른 수문 특성, 특히 홍수량과 갈수량의 변화를 추적하기 위한 틀(framework)을 마련하려 했다. Blackie(1972)의 모형을 근간으로 증산량, 삼투량, 기저유추량, 유로 내 저류 그리고 토양수 부족량을 정의하는 함수를 일부 변경하여, R1131(11-parameter, 3-storage, 1-input option) 모형을 구축하였다.

본 연구의 대상 유역분지는 케냐에 있는 실험 유역분지의 하나인 Kimakia Catchment K11인데, 1958년부터 1974년 사이에 3단계로 토지이용이 달라졌다. 그리고 실험유역분지의 수문자료는 본 연구를 위해 영국수문연구소에서 제공되었다. 3단계의 토지이용 기간에 대해 모형을 보정한 결과, 모형유효도는 96.78%, 97.20%, 94.62%이며, 전체 유량오차는 각각 -1.78%, -3.36%, -5.32%였다. 이와 같은 결과는 기존의 연구 결과를 상회하며, 수분이용률과 토지이용 변화와 관련된 변수들 사이에 상관성이 발견된다. 또한 예측된 기저유출량이 투수성이 높은 유역분지의 특성을 반영하고 있으며, 관측 침투홍수량의 peak를 정확히 예측하고 있다. 이러한 점을 미루어 보아 보정된 모형은 각 토지이용 단계의 수문 특성을 제대로 반영하고 있는 안정된 모형으로 간주된다.

보정된 모형을 이용해 각 토지이용 단계별로 16년 6개월 간의 확장유출량을 발생시켰다. 확장유출량을 이용해, 유량빈도곡선을 구성하고 홍수량과 갈수량의 빈도해석을 시도했다. 홍수 규모가 작은 1.5년 주기의 홍수의 경우 식생 변화에 따라 31.3%와 32.1% 정도로 홍수량이 줄어들었으나, 홍수 규모가 커짐에 따라 홍수량의 감소 정도는 점차 작아지고 있다. 재현주기가 20년 이상인 홍수의 경우 홍수량 변화가 거의 없다. 재현주기가 짧은 경우(재현주기 1.5년) 갈수량의 변화 폭이 크나(34.2%, 34.3%), 재현주기가 긴 경우(재현주기 50년) 갈수량의 변화 폭이 작다(20.2%, 20.9%). 결국 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화, 그 중에서도 홍

수량은 홍수 규모가 작은 경우 영향을 받으나, 홍수 규모가 큰 경우 그다지 영향을 받지 않는다. 그리고 극심한 가뭄을 겪는 해에는 식생변화에 따른 갈수량의 변화가 거의 없다. 또한 식생이 어느 정도까지 성장한 이후에는 계속된 식생 성장에도 불구하고 홍수량과 갈수량에는 큰 변화가 없다.

결론적으로, 토지이용수문학에서 가장 이상적인 수문모형은 Distributed 모형이다. 하지만, 수문자료가 절대 부족한 아프리카나 우리나라의 경우 Lumped 모형의 장점인 확장유출량을 이용하면 토지이용 변화에 따른 수문 특성의 변화를 어느 정도까지 추적할 수 있다.

(投稿 1994년 7월 19일)

註

- 1) 모형유효도(Model efficiency)란 회귀분석에서 결정계수와 같은 개념으로 다음 식으로 표현된다. 여기서 Q_{obs} 는 관측 일유량이고 Q_{mean} 는 관측 일유량의 평균값이며, Q_{pre} 는 예측 일유량이다.

$$\text{모형유효도} = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{mean})^2 - \sum(Q_{obs} - Q_{pre})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{mean})^2} \times 100\%$$

- 2) 전체유량오차(Error of total flow)란 관측 총유량에 대한 관측 총유량과 예측 총유량과의 차이의 백분율로 다음 식으로 표현된다. 양수인 경우 예측 유량이 적은 경우이고 음수인 경우 예측 유량이 많은 경우이다.

$$\text{전체유량오차} = \frac{\sum(Q_{obs}) - \sum(Q_{pre})}{\sum(Q_{obs})} \times 100\%$$

- 3) 수분이용률이란 최대증발가능량에 대한 실제 증발산량의 비율로 다음 식으로 표현되며, 식생의 변화에 따른 실제증발산량의 변화를 반영해 준다.

$$\text{Relative water use ratio} = \frac{R - Q + \Delta DC + \Delta GS}{EO}$$

文 獻

權純德·高德九, 1986. “山地流域에 대한 USD-AHL-74 流域水文模型의 長期流出 解析適用,” 韓國農工學會誌, 29(2), 53-63.
 鮮于仲皓, 1984. “降水-流出模型”, 韓國水文學

會誌, 17(4), 250-258.
 尹勇男, 1984. 水文學, 淸文閣, 서울.
 Abbott, M.B., Bathurst, J.G., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J., 1986, An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique European, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
 Anderson, M.G, and Burt, T.P., 1985, Modelling strategies, in M.G. Anderson and T.P. Burt(eds.), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, Chichester, 1-13.
 Ardis, C.V., Jr., 1973, Storm hydrographs using a double triangle model, *TVA Div. of Water Control Planning*, Knoxville, Tennessee, 1-112.
 Beven, K., 1985, Distributed models, in M.G. Anderson and T.P. Burt(eds.), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, Chichester, 405-435.
 Blackie, J.R., 1972, The application of a conceptual model to some East African catchment, *Unpublished M. Sc Thesis*, Imperial College, London.
 Blackie, J.R., 1979, The water balance of the Kimakia catchments, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 43, 155-174.
 Blackie, J.R. and Edwards, K.A., 1979, The Kimakia research project, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 43, 142-147.
 Blackie, J.R. and Eeles, C.W.O., 1985, Lumped catchment models, in M.G. Anderson and T.P. Burt(eds.), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, Chichester, 311-345.
 Bosch, J.M. and Hewlett, J.D., 1982, A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *Journal of Hydrology*,

- 55, 3-23.
- Brunsdon, D. and Thornes, J.B., 1979, Landscape sensitivity and change, *Transactions of IBG*, 4, 463-484.
- Crow, F.R., Ghermazien, T. and Bengtson, R.L., 1980, Application of the USDAHL hydrological model to grassland watersheds, *Transactions of the Amer. Soc. of Agric. Engr.*, 23(2), 373-378.
- Dagg, M. and Pratt, M.C.A., 1962, Relation of stormflow to incident rainfall, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 27, 31-35.
- Dawdy, D.R. and O'Donnell, T., 1965, Mathematical models of catchment behaviour, *Proceeding of ASCE, Journal of Hydraulic Division*, 91(HY4), 123-137.
- Dickinson, W.T. and Douglas, J.R., 1972, A conceptual runoff model for the Cam catchment, *Institute of Hydrology Report*, 17, 1-44.
- Douglas, J.R., 1974, Conceptual modelling in hydrology, *Institute of Hydrology Report*, 24, 1-60.
- Drayton, R.S., Kidd, C.H.R., Mandeville, A.N. and Miller, J.B., 1980, A regional analysis of river floods and low flows in Malawi, *Institute of Hydrology Report*, 72, 1-79.
- Dunne, T. and Leopold, L.B., 1978, *Water in Environmental Planning*, W.H. Freeman and Company, New York.
- Edwards, K.A., 1979, Rainfall, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 43, 8-17.
- Eeles, C.W.O., 1978, A conceptual model for the estimation of historical flows, *Institute of Hydrology Report*, 55, 1-66.
- Fisher, G.T., Ayars, J.E., Holton, H.N. and Nelson, D.L., 1979, USDAHL-74 model as a planning tool, *Transactions of the Amer. Soc. of Agric. Engrs.*, 22(6), 1347-1352.
- Graf, W.L., 1977, The rate law of fluvial geomorphology, *Amer. Jour. of Science*, 277, 178-191.
- Graf, W.L., 1984, A probabilistic approach to the assessment of river channel instability, *Water Resources Research*, 20(7), 953-962.
- Gustard, A., Roald, L.A., S., Lumadjeng, H.S. and Gross, R., 1989, *Flow Regimes from Experimental and Network Data(FREND)*, 1, Hydrological Studies, Institute of Hydrology.
- Hack, J.T., 1960, Interpretation of erosional topography in humid temperate regions, *Amer. Jour. of Science*, 258, 80-97.
- Hewlett, J.D., Cunningham, G.B. and Troendle, C.A., 1977, Predicting stormflow and peakflows from small basins in humid areas by the R-index method, *Water Resources Bulletin*, 13(2), 231-253.
- Hey, R.D., 1979, Dynamic process-response model of river channel development, *Earth Surface Processes*, 4, 59-72.
- Hibbert, A.R., 1967, Forest treatment effects on water yield, in W.E. Sopper and H.W. Lull(eds.), *Forest Hydrology*, Pergamon Press, Oxford, 527-543.
- Hollis, G.E. and Lukett, J.K., 1976, The response of natural river channels to urbanization: two case studies from Southeast England, *Journal of Hydrology*, 30, 351-363.
- Mandeville, A.N., O'Connell, P.E., Sutcliffe, J.V. and Nash, J.E., 1970, River flow forecasting through conceptual models: Part II-the Brosna catchment at Ferbane, *Journal of Hydrology*, 10, 317-329.
- Morris, E.M., 1980, Forecasting flood flows in grassy and forested basins using a deterministic distributed mathematical model, *Hydrological Forecasting IASH*, 129, 247-255.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models: Part

- I—A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Owe, M., 1985, Long-term streamflow observations in relation to basin development, *Journal of Hydrology*, 78, 243-260.
- Pereira, H.C., 1957, Field measurements of water use for irrigation control in Kenyan coffee, *Jour. Agr. Sci.*, 49, 459-467.
- Pereira, H.C., 1962a, The research project, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 27, 18-19.
- Pereira, H.C., 1962b, The research project, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 27, 76-79.
- Rogers, C.C.M., 1986, Further development of distributed hydrological models with reference to the Institute of Hydrology Distributed Model, *Unpublished Ph.D. Thesis*, University of Bristol.
- Rosendrock, H.H., 1960, An automatic method of finding the greatest and least value of a function, *Computer Journal*, 3, 175-184.
- Ross, B.B., Contractor, D.N. and Shanholty, V.O., 1979, A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrological impact of land-use change, *Journal of Hydrology*, 41, 11-30.
- Russell, E.W., 1962, Foreward, *East African Agricultural and Forestry Journal*, Special Issue, 27, 1-2.
- Schumm, S.A., 1969, River metamorphosis, *Proceedings of ASCE, Journal of Hydraulic Divison*, 95, 255-273.
- Schumm, S.A., 1979, Geomorphic threshold: the concept and its applications, *Transactions of IBG*, 4, 485-515.
- Shaw, E.M., 1988, *Hydrology in Practice*, Van Nostrand Reinhold, London.
- Son, I., 1990, The Relationship Between Vegetation Change and Hydrology: A background for river channel change, *University of Southampton, Discussion Paper*, 34, 1-60.
- Son, I., 1991, Modelling the hydrological effects of land-use change in small catchment, *Unpublished Ph.D. Thesis*, University of Southampton.
- Sopper, W.E. and Lull, H.W., 1967, *Forest Hydrology*, Pergamon Press, Oxford.
- Ward, R.C., 1971, Small Watershed Experiments: An appraisal of concepts and research developments, *University of Hull, Occasional Papers in Geography*, 18.
- Williams, G.P., 1984, Paleohydrologic equations for rivers, in J.E. Costa and P.J. Fleisher (eds.), *Development Application of Geomorphology*, Springer-Verlag, Berlin, 343-367.

Development of Lumped Model to Analyze the Hydrological Effects of Landuse Change

Ill Son*

Summary

One of major advantages of Lumped model is its ability to simulate extended flows. A

further advantage is that it requires only conventional, readily available hydrological data (rainfall, evaporation and runoff). These two advantages commend the use of this type of model for the analysis of the hydrological effects

* Associate Professor, Gyeongsang National University

of landuse change.

Experimental Catchment(K11) of Kimakia site in Kenya experienced three phases of landuse change for sixteen and half years. The Institute of Hydrology offered the hydrological data from the catchment for this research.

On basis of Blackie's(1972) 9-parameter model, a new model(R1131) was reorganized in consideration of the following aspects to reflect the hydrological characteristics of the catchment: 1) The evapotranspiration necessary for the landuse hydrology, 2) high permeable soils, 3) small catchment, 4) input option for initial soil moisture deficit, and 5) other modules for water budget analysis. The new model is constructed as a 11-parameter, 3-storage, 1-input option model.

Using a number of initial conditions, the model was optimized to the data of three landuse phases. The model efficiencies were 96.78%, 97.20%, 94.62% and the errors of total flow were -1.78%, -3.36%, -5.32%. The bias of the optimized models were tested by several techniques. The extended flows were simulated in the prediction mode using the optimized model and the data set of the whole series of experimental periods. They are used to analyse the change of daily high and low-flow caused by landuse change.

The relative water use ratio of the clearing

and seedling phase was 60.21%, but that of the next two phases were 81.23% and 83.78% respectively. The annual peak flows of second and third phase at a 1.5-year return period were decreased by 31.3% and 31.2% compared to that of the first phase. The annual peak flow at a 50-year return period in the second phase was an increase of only 4.8%, and that in the third phase was an increase of 12.9%. The annual minimum flow at a 1.5-year return period was decreased by 34.2% in the second phase, and 34.3% in the third phase. The changes in the annual minimum flows were decreased for the larger return periods; a 20.2% decrease in the second phase and 20.9% decrease in the third phase at a 50-year return period.

From the results above, two aspects could be concluded. Firstly, the flow regime in Catchment K11 was changed due to the landuse conversion from the clearing and seedling phase to the intermediate stage of pine plantation. But, The flow regime was little affected after the pine trees reached a certain height. Secondly, the effects of the pine plantation on the daily high- and low-flow were reduced with the increase in flood size and the severity of drought.

Key Words: landuse change, Lumped model, Kimakia Catchment, optimization, Institute of Hydrology.