소유역내 수자원관리를 위한 체계생태계 모델링에 관한 연구*

—전주시 덕진공원 유역을 사례로—

이 명 우**
김 정 욱***
최 진 규****

차 례

제 1 장 서 론
제 2 장 선행연구의 고찰
제 3 장 체계생태계모형의 수립
제 4 장 체계 생태계 모형의 적용
제 5 장 결 론

제 1 장 서 론

1.1. 연구의 목적

이 연구는 체계 생태계모형의 하나로서, 토지이용변화에 따른 하천의 수질예측모형을 수립하는 것이 목적이다. 그리고 이 모형수립을 통하여 하천의 자연적 기능을 살릴 수 있는 적정 토지이용대안을 수립하는데 기여하고자 한다. 이 연구에서는 미국에서 개발된 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)에서 기본원리를 도출하고, 비점오염원에 인한 수질에의 영향을 예측하기 위한 소유역에서의 종합적 모형 WQMS(Water Quality Model for Small Watershed)을 개발하였다. 이 모형을 종합적 모형으로 개발하고자 하는 이유는 이미 이용되고 있는 많은 모형들이 물, 침식 또는 수질 등 개개의 단일 현상을 중심으로 개발되었기 때문에, 종합적 유역특성이 연계된 수질현상을 예측하는 데는 한계가 있기 때문이다. 그리고 소유역을 대상으로 하게 된 이유는 실제 그 변화양상이 무시되기 쉽지만, 이 소유역별 토지이용변화가 합쳐지면서 수질에 큰 영향을 미치기 때문이다. 아울러 비점오염원적 특성으로서 토지이용을 고려한 것은 가정하수와 같은 점오염원의 경우는 그로 인한

* 이 논문은 1988년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.
** 전북대학교 조경학과 교수
*** 서울대학교 환경대학원 교수
**** 전북대학교 농공학과 교수

하천에의 영향을 예측하거나, 그 방지대책을 수립하는 방법이 비교적 명료하지만, 산림황폐로 인한 토사유출, 농약 및 비료의 하천유입, 도시의 지표면 오염물질의 하천유입으로 인한 비점오염원의 경우에는, 그것이 하천 수질에 미치는 영향이 큼에도 불구하고 그 기작 등이 명확하게 밝혀지지 않았기 때문이다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

1.2.1. 모형의 수립과 적용의 방법

이 연구에서는 종합적 수질예측모형을 개발하기 위해서 1980년 미국 환경청에서 개발된 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)모형에서 기본 원리를 도출하였다. 이 HSPF모형은 종합적 수질예측모형으로 개발되기는 하였으나 그 프로그램이 지나치게 방대하여 이용상 문제가 있고, 소유역특성을 반영하기 어려운 구조로 되어 있다. 따라서 이 연구에서 소유역 특성을 잘 반영할 수 있고, 개인용 전산기로도 운영이 가능한 모형을 개발하고자 하였다. 그리고 토지이용특성의 입력방법도 국지적 수문환경특성을 잘 반영할 수 있는 분포형모형의 입력방식인 단위격자에 의한 방법을 사용하였다. 이 단위격자의 크기는 50m×50m로 하였으며, 토지이용, 토양, 임상, 경사와 표고등 환경정보들을 단위격자별로 입력하였다.

그리고 현장에서 실측된 자료를 기준으로 한 반복적인 의사화과정을 통해 모형을 검증하였다. 이 모형을 적용한 토지이용 대안은 녹지조성과 관련시켜 가상적으로 설정하였다. 이러한 모형의 수립과 적용의 과정은 〈그림 1-1〉에 나타나 있다.

1.2.2. 유역 환경의 조사 방법

이 연구의 대상유역은 전주시 덕진동 연화천 상류에 위치하여 전북대학교와 면하여 있는 유역 면적 278.8ha의 소유역이다. 유역환경조사는 현지 답사와 관련도면을 검토하여 조사하였다. 먼저 배수유역확인을 위해 전주시 발행(1984) 하수관망도(1 : 500)를, 토지이용은 1 : 5,000 지형도 (1986)를 참고하고 현지답사를 통해 그 경계선을 확인하였으며, 변경된 부분은 보완하였다. 그리고 토양은 농촌진흥청 간행(1974) 정밀토양도(1 : 25,000)를, 임상은 산림청 간행(1983) 임상도(: 25,000)를 참고하였다. 기타 표고도와 경사도는 1 : 5,000 지형도(1986)를 참고하였다.

1.2.3 유출량의 조사 방법

강우량 자료는 전주 측후소의 자료를 이용하였다. 유출량조사는 2개지점(P_1, P_2)에서 하였다. 수위측정결과의 자기지 독치작업(自己紙讀値作業)은 일평균유량의 정도를 좌우하게 되는데, 평상시 수위가 완만하게 변할 때는 자기지로부터 08 : 00 의 수위나 20 : 00시의 수위를 평균하여 사용하였으며, 강우로 인해 수위가 급변하는 경우는 독치기간 간격을 15분으로 하여 매 간격마다 수위를 읽어 합하고, 총 시간간격의 수로 나누어 주는 방법($H_m = \sum H_i/N$)을 적용하였다. 하천의 유속측정은 소형 디지탈식 유속계(spc—5형)를 사용하였다.

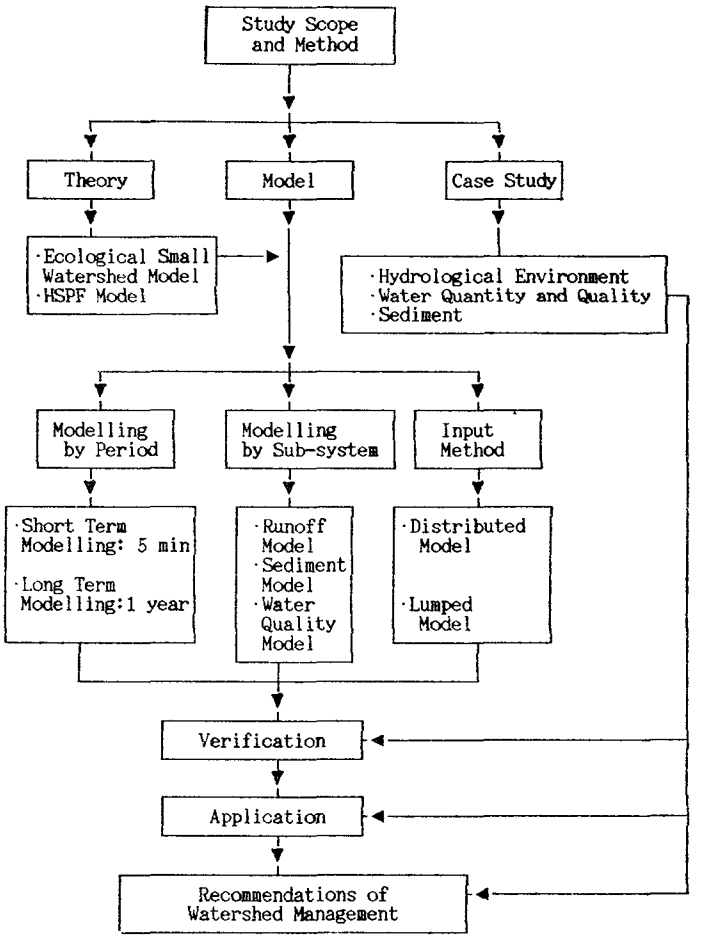


Fig. 1-1. The Phase of Study Process

그리고 실측 유량 Q(m³/sec)는 식(1-1)과 같이 소구간폭의 평균 $W(m)$, 수심 D(m)와 유속 V(m/sec)의 곱으로서 산출했다.

$$Q=\frac{W_1+W_2}{2}V_1D_1+\frac{W_2+W_3}{2}V_2D_3+\cdots\cdots+\frac{W_{n-1}+W_n}{2}V_{n-1}D_{n-1} \qquad (1\text{-}1)$$

이 연구에서는 하천단면을 3등분하였는 데 단면폭 w_1, w_2, w_3의 값은 1.5m−2.8m였고, 유속 V는 25~28cm/sec, 그리고 수심 D는 15cm~50cm의 범위를 보이고 있었다. 한편 수위—유량곡선의 작성은 해당 수위에 대한 유량을 계산하고, 이 결과를 반대수지(半對數紙)에 plot하여 곡선의 방정식을 구하는 것인데, 보통 회귀분석과 최소자승법을 이용한다.[16] 이 분석에서는 $Q=C(H\pm Z)^2$식을 사용하였다. 이 식에서 C와 Z는 계수이며 H는 수위(m)로서 C는 4.0~10.0의 값이, Z는 25~30의 값이, 그리고 H는 24.0~30.0m의 범위를 나타내고 있었다.

1.3.4. 침식량 및 수질의 조사방법

수질조사항목은 pH, DO, BOD와 PO_4-P로 하였으며, 조사지점은 전체 유역을 나타내는 P_1지점. 자연적 토지이용을 나타내는 P_2지점과 도시적 토지이용을 나타내는 P_3지점으로 하였다. 이 조사는 3월부터 11월까지 1주에 1회 조사하는 것을 원칙으로 하였으며, 그 중 단기 모형검증시 사용될 수 있도록 임의 강우시 20~30분 단위로 표본추출하였다. BOD는 BOD-Incubator를 이용하여 5일 BOD를 분석하였으며, PO_4-P는 Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method를[13] 사용하여 분석하였다. 그리고 침식량 조사는 총 부유물질 TS(Total Solids)와 휘발성 부유물질 VSS(Volatile Suspended Solids)를 분석하여 사용하였다.

제 2 장 선행 연구의 고찰

소유역 수문모형은 크게 두가지로 구분된다. 첫번째의 유형은 물의 순환과정을 지배하는 자연계의 물리적인 과정을 수학적으로 서술하여, 한 유역에 떨어지는 강우사상으로부터 유출수문곡선을 계산하고, 이에 따라 침식량과 수질을 분석하는 등 자연현상의 확정성(law of certainty)을 전제로 하므로, 확정론적 수문모형(deterministic hydrologic model)으로 알려져 있다. 수문모형의 다른 부류중 하나는 추계론적 수문모형(stochastic hydrologic model)으로서 이는 실제의 수문사상(水文事象)에 관계없이 실측된 수문시계열(hydrologic time series)의 확률 통계학적 거동을 재연시킴으로서 장래 발생할 수문모형을 예측하고자 하는 모형이다.

수질예측모형의 효시가 되는 수문모형은 SWM모형이다. 이 SWM모형은[47] Stanford대학의 Crawford와 Linsley에 의해 1959년에 개발된 이후 4차례의 개정을 거쳐 1966년 Stanford Watershed Model IV로서 완성되었다. 그 후에도 계속해서 부분적인 수정과 보완을 거쳐 Kenturky version, Texas version, Ohio version 등으로 발전되고, 널리 보급되어 전 세계적으로 이용되기에 이르렀다. Crawford와 Linsley는 유역의 크기나 형태에 제한을 받지 않으며, 어떤 유역에서나 적용이 용이하고 유출량 뿐 아니라 지표류나 증발량등 기타 수문요소의 산정까지도 가능하도록 유역내 실제 수문과정을 현실적으로 재현하고자 하는 개념하에서 이 모형을 개발하였다. 최종적인 Stanford Watershed Model IV 모형에는 총 34개의 입력 파라메타가 사용되는데 대부분이 기상, 지형자료나 기타 관측자료에 의해 결정가능하지만 4개의 파라메타만 반드시 수년간의 유출결과에 의한 보정을 통해서 결정된다. 그것은 이 모형에서도 일반 수문과정에 대해 개념화된 경험모형과 가정이 적용되기 때문이라 할 수 있다.

미국에서 가장 최근에 개발된 HSPF모형은 여러 수문모형중 양적모의 뿐 아니라 수질 및 토사침식 모의도 하도록 개발된 종합적 일반 모형인 HSP(Hydrocomp Simulation Program)

를 개정한 모형으로 SWM(1966)모형을 기본으로 발전하였다.[1] 이 모형은 1972년 개발되어 농경지에서의 의사화에 이용되는 CRAM(Simulation of Contaminant Reactions and Movement), PTR(Pesticide Transport and Runoff)모형과, 1971년 개발되어 도시에서의 유출수와 수질 모의화에 이용되는 SWMM(Storm Water Management Model), STORM 모형에 기본을 두고, ARM(Agricultural Runoff Model(1973))과 NPS(Nonpoint Source Model (1974))모형과 통합되어 HSPF(1980)모형으로 발전되었다. 앞서 분류되었던 모형의 유형으로 보면 이 HSPF 모형은 확정론적 수문모형으로서 장기나 단기를 모두 의사화하며, 집중형 모형으로서의 특징을 가지고 있다. 아울러 도시지역과 자연지역을 모두 의사화할 수 있는 기능을 가지고 있다.

그러나 이 HSPF 모형은 소유역 적용상에 몇가지 문제가 있는 것으로 판단된다. 첫째는 프로그래밍 규모가 너무 방대하고, 세분화된 각 시간대에 대해 연속적으로 모의화되므로 계산의 양이 방대할 뿐 아니라, 사용되는 변수도 엄청나 대형전산기의 도입이 필연적이어서 프로그램조치 및 비용상의 문제가 있다. 둘째는 입력자료의 구성방법이 집중형방식으로서 소유역의 국지적특성을 반영하기에는 적합하지 않다. 셋째는 TSS 방식에 맞도록 기초자료를 작성하도록 되어 있어, 이를 입력 시키기가 매우 어렵다.

그리고 비점오염원을 모형의 주 대상으로 하는 수질 예측모형으로 널리 알려진 PTR, ARM, SWMM, NPS 모형은 미국에서는 활발이 이용되고 있으나[7,11,12,28] 우리나라에서는 아직 소개된 단계로서 거의 이용되고 있지 않다. 우리나라에서 소유역을 대상으로 하여 외국의 수문모형을 활발히 적용하고 있는 분야는 농공분야로서 주로 물 수지에 관한 연구이다. 즉 권순국등이[49] 1987년에 USDAHL-74 모형을 경기도 도택시험유역에 적용하여 장기유출해석을 하였고, 김병진등이[50] 1988년에 ANSWERS 모형을 반월유역에 적용하였으며, 이기춘등이[57] 1989년에 FESHM 모형을 연화천유역에 적용하였다.

수학적 모형을 이용한 것은 아니지만 토지이용과 수질과의 관계에 관한 연구로는 구분경이[48] 1988년에 의암호유역을 대상으로 연구하였으며, 임봉수등이[62] 1984년에 서울 성북천과 경기도 고양군을 대상으로 도시와 농촌의 비점오염원 배출양상에 대해 연구하였다. 토지이용중 산림지와 관련된 물 수지 연구로는 오두영이[54] 1986년에 소양강 다목적 댐 유역의 산림이수효과에 대해 연구하였으며, 유택규가[55] 1986년에 서울과 양주에 설치된 시험구에서 조사된 자료를 통해 산림의 물수지에 대해서 연구하였다. 한편 임업연구원에서는[63] 광릉 연습림 및 양주사방의 시험구에서 1980년부터 1987년에 이르기까지 이수효과, 유수량, 유토량 등에 대한 보고서를 낸 바 있다. 그리고 최근에 홍성구등이[67](1989) 농경지로부터의 총 질소 및 총 인의 유출부하특성에 대해 연구하였다. 한편 해외에 있어서 간단한 통계적 모형을 이용해서 PO_4-P와 BOD 등 오염물질을 연구한 예로 Novotony는[32] 1985년에 도시유역에서의 비점오염 부하량을 조사 분석하였고, Wanielista는[42] 1977년에 비점오

염원이 수질에 미치는 영향을, Dillon은[9] 1974년에 토지이용과 지질특성에 따른 인의 배출양상을 연구 발표한 바 있다.

제 3 장 체계 생태계 모형의 수립

3.1. 모형수립의 방향

1. 침식부하 수질모형을 중심으로 한 모형의 수립

이 연구에서 모형을 개발한 것은 자연적 토지이용에 있어서의 비점오염원적 특성을 파악하는데 그 목적이 있다. 이러한 비점오염원(non-point source)의 경우는 Potency Factor에 의한 통계적 추정을 주로 하는 연구가 주종을 이루고 있다.[27] 이를 산출하기 위한 이론으로서 지표면 유출 발생 이론은 Chezy-Manning 공식을, 하도추적이론은 Clark방법을 기초로 하였다. 즉 각 단위격자에서의 유출량은 전자를, 이렇게 모여진 유출량이 전파속도에 따라 하천으로 유출되는 것은 후자를 이용하였다. 침식모형에서는 USLE(Universal Soil Loss Equation)공식을 이용하여 각 단위격자에서의 침식량을 산출하였고, 운반율을 적용하여 도달하는 양을 추적하였다. 모든 수질부하량은 이 침식량에 비례한다고 가정하였다.

2. 소유역 특성을 고려한 모형변수의 조정

일반적으로 소유역의 경우는 대유역의 경우와는 차이가 있다. 유역이 커지면 커질수록 지중수에 의한 영향이 커지지만, 유역이 작아질수록 지중수의 영향이 작게 된다. 또한 소유역인 경우는 표면 유출수의 흐름이 중요하고, 유역이 커질수록 하천 유출수의 기작이 더 중요하게 된다.[6,17,37] 이 연구대상유역은 유역정상에서 조사지점까지의 유달시간이 30분인 소유역이므로 지중수, 하천 및 증발산의 영향이 없다고 가정하고, 침투와 지표면 추적변수만 사용하였다.

3. 국지적 특성을 반영하기 위한 입력방식의 도입

일반적으로 SWM 모형이나 HSPF 모형에서 사용하고 있는 입력방식은 동질적 반응단위를 기본으로 한 집중형모형(lumped model) 입력방식으로서 전체 유역을 개략적인 지형특성에 따라 구분하므로 공간 분할이 많지 않아 의사화의 효율성은 높지만, 소유역의 국지적 특성을 반영하기에는 적합하지가 않다.[52] 따라서 이 연구에서는 유역에서의 환경특성이 좀 더 예민하게 반응할 수 있는 분포형 모형(distributed model)의 입력방식인 격자형 입력방식(grid cell input method)을 도입하였다.

3.2. 모형의 이론적 배경

3.2.1. 지표면 유출 및 유역 추적

1. 차단 및 침투

강우가 발생했을 때 이 전체가 지표면에 도달하지 못하고 식생등의 지표피복물에 저류되

며, 일부는 대기중으로 증발된다. 이러한 현상을 차단이라고 한다. 이 차단량은 1일을 단위로 수목, 초본류나 경작식물의 피복상태가 최대일 때를 기준으로 한, 해당 계절의 피복도의 비로 나타낸다.[11] 즉

$$C_i = C_{max} \times (D_i / D_{max}) \tag{3-1}$$

여기서 C_i는 1일 차단량(mm/day)이며, C_{max}는 최대 피복시의 1일 차단량(mm/day)이며, D_i는 해당 계절의 피복밀도이고, D_{max}는 최대 피복계절의 피복밀도이다.

토양의 침투능을 결정하기 위한 경험공식으로는 Philip공식을 기초로 하여 유도하였다. 즉

$$F(t) = St^{1/2} + At \tag{3-2}$$

$$f(t) = 1/2St^{-(1/2)} + A \tag{3-3}$$

여기서 $F_{(t)}$는 시각 t에 있어서의 누가(累加) 침투량(cm)이며, S는 sorptivity (cm/sec$^{1/2}$)이고, A는 토양의 특성함수이다. Philip에 의하면 시간 t가 커질 때 A의 값은 토양의 투수계수와 같으며 대단히 작은 값이 되고, S는 최종 누가(累加) 침투량 F를 총 침투시간 t의 제곱근으로 나누어 얻을 수 있다. 즉

$$S = \frac{F}{\sqrt{t}} \tag{3-4}$$

2. 지표면 유출

지표면 유출과 하도유출은 비정상류(unsteady flow)이므로 이를 지배하는 연속 방정식과 운동량 방정식을 해석하므로서 유역 출구에서의 유출수문곡선을 구할 수 있다.[47] 연속 방정식은 질량보존의 법칙에 의하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 즉

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_1 \tag{3-5}$$

여기서 Q는 유량(m^3/sec), A는 유수단면적(m^2), X는 구간의 길이(m), t는 시간(sec)이고, q_1은 단위 쪽당의 횡유입량(m$_3$/sec)이다. 한편, 운동량 방정식은 운동량 보존법칙에 의하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 즉

$$\frac{\partial A}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial X} + \frac{Vq}{A} = g(S_0 - S_f) - \frac{g\partial(yA)}{A\ \partial X} \tag{3-6}$$

여기서 V는 유속(m/sec), y는 하상으로부터 유속단면 무게중심까지의 거리(m), g는 중력가속도(9.81m/sec^2)이고, S_0 및 S_f는 각각 하상경사와 마찰경사이다. $\partial V/\partial t$와 $V(\partial V/\partial X)$는 관성력에 의한 가속도 항이며, $V(q/A)$는 유입량에 의한 운동량의 변화량, $\partial(yA)/X$는 수면변화에 따른 압력을 나타내는 항이다. 이 식은 동수파이론(kinematic wave theory)에 따라 $g(S_0 - S_f)$ 이외의 모든 항이 소거될 수 있다. 즉

$$S_0 \cong S_f = \frac{Q^2}{C^2 \times A^2 \times R} = \frac{n^2 \times Q^2}{R^{4/3} \times A^2} \tag{3-7}$$

여기서 C는 Chezy의 계수이며, n은 Manning의 조도계수이고, B은 동수반경이다. 이 식에

서 유량 Q는 식 (3-8)과 같이 표시할 수 있다.

$$Q=A\times C\times R^{1/2}=A\times(1/n)\times R^{2/3}\times S^{1/2} \quad (3\text{-}8)$$

이를 지표면 유출에 적용하기 위해서는 지표면 흐름의 수심 $h(m)$와 유입쪽 l(m)로써 나타낼 수 있다. 즉

$$Q=l\times(1/n)\times h^{5/3}\times s^{1/2} \quad (3\text{-}9)$$

$$\text{또는 } q=(1/n)\times h^{5/3}\times s^{1/2} \quad (3\text{-}10)$$

한편 지표면 흐름의 수심 h는 현재의 저류량 D(current detention storage)와 평형상태에서의 저류량 De에 의해 결정된다.[8] 즉

$$h=(D/L)\times(1.0+0.6\times)D/De)^3) \quad (3\text{-}11)$$

이 식 (3-11)을 식 (3-10)에 대입하면 아래와 같다.

$$q=(1/n)\times S^{1/2}\times(D/l)^{5/3}\times(1.0+0.6(D/De)^3)^{5/3} \quad (3\text{-}12)$$

$$\text{또는 } q'=\frac{1630680}{nL}S^{1/2}\left(\frac{D}{l}\right)^{5/3}\ (1.0+0.6\left(\frac{D}{De}\right)^3)^{5/3} \quad (3\text{-}13)$$

여기서 q는 단위시간당, 단위폭당 유량(m^3/(sec.m))이며, q'는 시간당 우량(mm/hr)이다. 여기서 현재의 저류량 D는 표면저류량(SURS)과 우량공급량(PSUR)의 평균으로서 나타나며, 평형저류량 De는 Manning의 조도계수(n), 지표면길이(l)와 경사도(s)에 의해 결정된다. 즉

$$D=1/2\times(\text{SURS}+\text{PSUR}) \quad (3\text{-}14)$$

$$De=0.00982\times(\text{PSUR}-\text{SURS})^{3/5}\times(n\times 1/\sqrt{s})^{3/5} \quad (3\text{-}15)$$

3. 하도 추적

앞서서 유도된 Chezy-Manning공식에 따른 지표면 유출량은 하천에 유입되면서 하천유량을 형성하게 된다. 이때 사용되는 개념이 홍수추적(flood routing)으로서 이는 상류의 한 지점에 있어서의 기지의 수문곡선으로부터 하류의 어떤 지점에 있어서의 수문곡선을 결정하는 절차라고 할 수 있다. 이 홍수 추적 중 유역 홍수 추적 방법은 유역전체를 일련의 저수지와 하도로 구성되어 있다는 가정하에 개발된 것으로서 이 연구에서는 그 중 Clark의 유역 추적법을 이용하였다.

Clark는 유역의 출구에 1개의 선형저수지가 존재한다고 가정하였다.[56] 이 저수지에서의 저류량—유출량의 관계는 선형성으로 가정하였으므로 식 (3-16)과 같다.

$$S=KO \quad (3\text{-}16)$$

여기서 S는 하도저류량, K는 구간내 저류량의 유출량에 대한 비를 나타내는 저류상수(storage constant), O는 유출량이다. 한편 수문학적 추정방법에서 사용되는 저류방정식은 다음 식과 같다.

$$I-O=\frac{dS}{dt} \quad (3\text{-}17)$$

여기서 I, O는 하도의 임의구간으로 흘러 들어가는 유입량과 유출량을 각각 표시하고 있으며, S는 저류량을 나타낸다. 이 식 (3-17)을 미분의 항으로 표시하면

$$(I-O)\Delta t=\Delta S \tag{3-18}$$

이는 곧 $\frac{I_1+I_2}{2}\Delta t-\frac{O_1+O_2}{2}\Delta t=S_2-S_1$ (3-19)

여기서 Δt는 추적시간(routing period)라고 부른다.

식 (3-16)을 식 (3-19)에 대입하면

$$\frac{I_1+I_2}{2}\Delta t-\frac{O_1+O_2}{2}\Delta t=K(O_2-O_1) \tag{3-20}$$

식 (3-20)을 O_2에 관해서 풀면

$$O_2=M_0I_2+m_1I_1+m_2O_1 \tag{3-21}$$

여기서 $m_0=\frac{0.5\Delta t}{K+0.5\Delta t}$ (3-22)

$$m_1=\frac{0.5\Delta t}{K+0.5\Delta t} \tag{3-23}$$

$$m_2=\frac{K-0.5\Delta t}{K+0.5\Delta t} \tag{3-24}$$

그런데 추적기간 Δt의 시점과 종점 유입량이 동일할 경우 $I_1=I_2$이다. 따라서 식 (3-21)은 아래 식과 같이 된다.

$$O_2=(m_0+m_1)I+m_2O_1 \tag{3-25}$$

3.2.2. 침식 발생

1. 토양유실

자연지역에서의 침식모형은 토양 유실량 예측 공식인 USLE(Universal Soil Loss Equation)에 기초한다. 토양 유실량 예측 공식은 강우특성, 토양의 종류, 지형, 식생의 피복정도 및 토양관리방법 등과 관련된 인자들을 고려하여 식 (3-26)과 같이 표현한다.[35]

$$Sl=RK\ Ls\ CP \tag{3-26}$$

여기서 Sl은 토양유실량(ton/ha/hr), R은 강우인자(/hr), K는 토양 침식성인자, Ls는 경사인자, C는 식생피복인자 또는 작촌인자이며 P는 토양 보존인자이다. 여기서 강우인자 R은 가장 중요한 인자로서 강우의 운동에너지와 최대 강우강도에 의해 좌우되는 바, 다음과 같이 정의된다.[64]

$$R=EI_{30} \tag{3-27}$$

여기서 E는 강우에너지로서 강우의 운동에너지 KE와 강우량 RF(cm)에 의해 결정된다. 그리고 I_{30}은 30분 최대 강우강도이다. K는 토양 침식성 인자로서 토양의 잠재적 침식성을 나타내는 척도이다. 또한 Ls는 경사도(S)와 경사장(L)이 토양유실에 미치는 영향을 설명하는 인자로서 경사도와 경사장이 클수록 큰 값을 갖는다.

즉 $$Ls_1 = \frac{Ls_{I}A_{I} + Ls_{II}A_{II} + Ls_{III}A_{III}}{A_1} \quad (3\text{-}28)$$

여기에서 Ls_1은 토지이용형태에 대한 가중 평균 경사 인자이며, A는 토지이용 형태의 토지 면적이다. I는 낮은 경사지로서 경사도 4% 이하, II는 보통경사지로 4~8%, III은 급경사지로 8% 이상을 뜻한다. 그리고 식생피복인자 C는 특정한 조건하에서 식생지역의 토양유실량과 나지의 토양유실량과의 비로서 나타낸 값으로 정의되므로 그 값은 나지에서는 1이고, 식생지역에서는 1 이하로 된다.[11] 토양보존인자 P는 등고선 재배, 등고선대상재배 및 테라스 조성 등으로 인한 효과를 나타내며 상하경(up & down slope culture)에서의 토양유실량을 1로 하였을 때 토양보전농법을 적용하여 감소되는 토양유실량의 비로서 나타낸다.[11]

3. 유출에 의한 토양이동

대개 토양유실량과 유출 사이에는 특정한 관계가 성립한다고 보기 어렵다. 왜냐하면 침식된 토양이 수체에 이르는 비율, 즉 유실률은 재퇴적 작용(redeposition), 식생에 의한 퇴적물 차단작용(trapping) 및 유로에서의 침식등 많은 복합적 요소가 작용한다고 보기 때문이다. 그러나 이 토양운반율 r(ton/ha/hr)은 일반적으로 식 (3-29)와 같이 표현된다.[20] 즉

$$r = k(S+Q)^j \quad (3\text{-}29)$$

여기서 k는 경사, 지표면 길이, 유실토양의 입자와 지표면 조도 특성에 따라 결정되며, 0.01에서 5.0의 값을 갖게 되나 그 변이가 크다. S는 지표면 저류량(mm), Q는 지표면 유출량이며 J는 지표유출강도와 토양 유실량 운반율의 관계를 결정하는 지수로서 대개 1.6에서 2.0의 값을 갖지만 초기치는 보정을 통해 선택되어야 한다. 따라서 총 토양유실량 SD (tons/ha/hr)은 토양운반율 r과 지표면 유출량에 따라 결정된다. 즉

$$SD = r\ \frac{Q}{S+R} \quad (3\text{-}30)$$

이다. 이렇게 발생된 총 토양 유실량이 하천까지 운반되는 데는 유역면적과 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.[30]

3.2.3. 수질 오염 부하

1. 비 점오염원

비점오염원은 주로 자연적 토지이용에서 발생되는데 모형의사화의 대상에는 수온, 용존산소, CO_2, N, P 및 살충제 등이 있다. 비점오염원을 의사화하는 방법에는 단순히 유출량이나 침식량의 부하비(pontency factor)로서 나타내는 방법과 각개 오염물질의 기작을 추적하는 방법으로 나누어진다.[20] 이 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 전자의 방법을 이용하고자 한다. 부하비는 KN비라고도 하는데 이는 토양의 오염물질 함량비 CS와 토양입자에의 고정비 r을 곱한 값으로 표현될 수 있다. 즉

$$KN = CS\ r \quad (3\text{-}31)$$

인산의 경우는 지역에 따라 상당한 차이가 있기 때문에 특정 수식으로 표현하는 것은 무

리가 따른다. 대개 인산의 경우, 평균적 수치를 보면 $Cs(PO_4\text{-}P)$는 0.0001−0.0005, 고정비는 1.5로서 적용할 수 있다.[27] BOD의 경우는 토양중의 유기탄소 함량비에 산화반응식에서의 산소 소모량비 (32/12)를 곱하여 BODu의 비를 구하고, 여기에 다시 2/3(BODu≒1.5BOD_5)를 곱하여 BOD_5비를 구한다. 즉 KN_{BOD}=1.778×(토양중의 유기 탄소 함량비)로 표현된다.[47]

이러한 KN비의 개념은 각각의 토지이용 특성에 따라 적용된다. 대개 자연적 토지이용인 논, 밭에나 산림지역인 경우에는 침식량 Sl(ton/ha/hr)을 KN비에 곱한 값에 시비량중 함유량을 더한 값으로 나타낸다. 즉

$$Np=Sl\times KN+Ffa \tag{3-32}$$

여기서 Np는 오염물질의 양(kg/ha/hr), Sl은 토양 침식량(ton/ha/hr), KN은 오염부하비(kg/ton), F는 해당계절의 오염물질 시비량(kg/ha/day), f는 비료중 오염물질 함량비이고, a는 오염물질의 시비 유출률이다.

한편 도시적 토지이용에서의 비 점오염원 부하량은 다음 식 (3-33)과 같이 표현될 수 있다.[41]

$$Np=365\times(sk/y)(1-z)\ (48L(1-w)kn+0.1p((1-s)En+sEs))/A \tag{3-33}$$

여기서 Np는 비점오염부하량(kg/ha/month), z는 오염물질에 대한 하수 처리 효율, sk는 월간 유출수량(m^3/month), Y는 연간 유출 수량(m^3/year), L은 도로연석길이(km), w는 가로 청소에 의한 총 고형물 제거효율, KN은 총 고형물 중 오염물질 부하량, P는 거주인구(명), s는 수세식변소 사용 가옥 비율, En과 Es는 재래식 변소와 수세식 변소에서의 오염부하단위(kg/명/day)이며, A는 면적이다.

2. 점 오염원

그리고 도시지역이나 농촌지역에서의 점오염부하는 다음과 같이 표현된다.

$$P=27(1-z)p((1-s)En+sEs)/A \tag{3-34}$$

여기서 P는 점오염부하량이며, z, p, s, En, Es와 A는 비점오염원에서와 같다.

3. 오염부하 및 오염유하

비점오염원에 있어서 수질오염부하모형은 크게 둘로 구분된다. 첫번째는 침식부하모형으로서 이 모형에서는 앞서서 계산된 침식량에 각 수질요소별 부하비를 곱하여 산출하게 된다. 즉

$$C=P\cdot S \tag{3-35}$$

여기서 C는 오염발생량(g/5 min), P는 potency factor(g/kg)이고 S는 침식 발생량(kg/5 min)이다.

두번째는 수질 요소 유하모형으로서, 일단 하천에 도달한 오염물질이 하천을 따라 유하하면서 시간에 따라 변화되는 기작에 대한 모형으로서 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{dp}{dt}=-k\cdot p \tag{3-36}$$

여기서 p는 오염물질의 양(g), t는 시간(min)이고 k는 감소계수이다. 이 식을 p와 t에 대해서 적분해서 풀면

$$\int_{p_0}^{p}\frac{dp}{p}=-k\int_0^t dt \tag{3-37}$$

$$p_0-p=p_0(1-e^{(-kt)}) \tag{3-38}$$

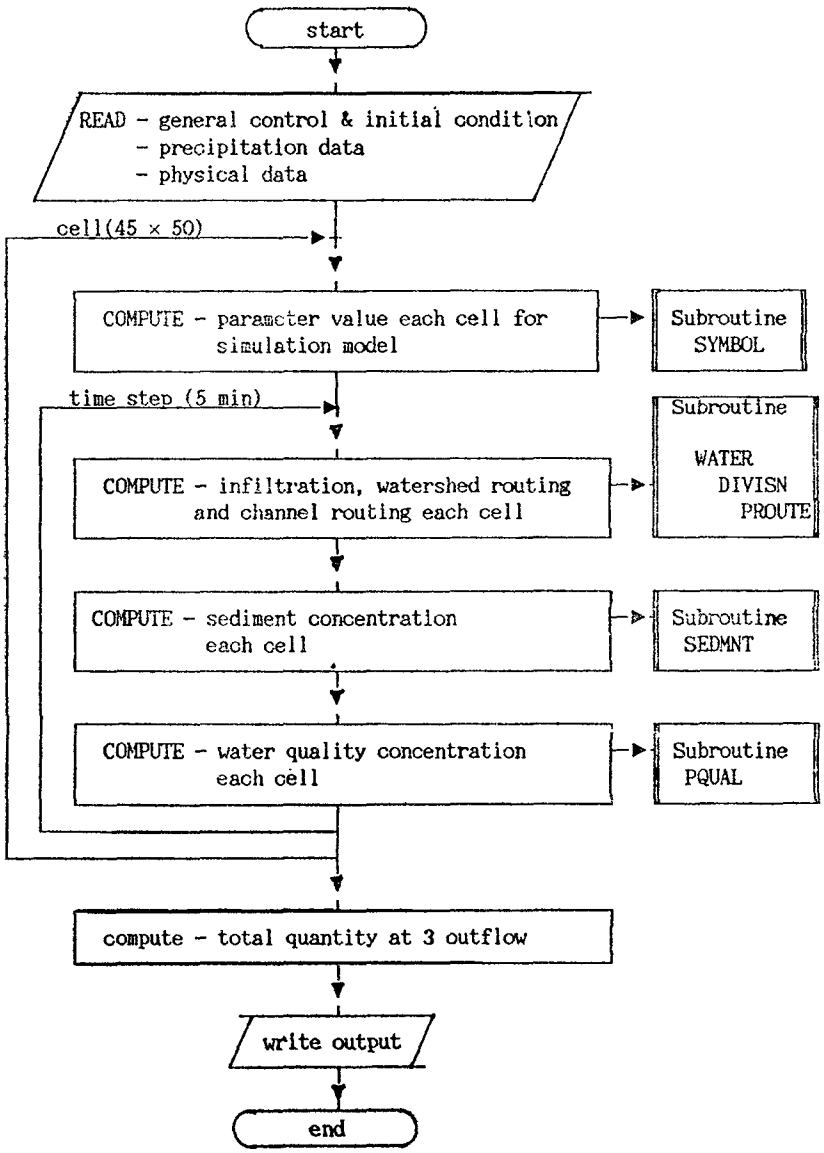


Fig. 3-1. Flow Chart of Computer Program, WQMS

〈**Table 3-1**〉 Variable Names and Description of Input Parameters

Classification	Variable	Description
General Watershed Parameter	IBOUND	boundary and stream location
	ISEG	segment identification
	ILAND	land use type
	IELE	elevation type
	ISOIL	soil type
	ISLOPE	slope type
	IFOREST	forest type
	DELT	simulation time(sec)
	DELT 60	simulation time (min)
	IP	total simulation number each event
	IT	output interval
	$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$	cooridination identifier each environmental data
	$IM_1, IM, IM_3, IM_4, IM_5, IM_6$	recoding variables
Water Quantity Parameter	CPREC	precipitation variable (mm)
	PREC	precipitation variable (inch)
	CEPSC	interception storage capacity
	NSUR	Manning coefficient
	INFILT	infiltration index
	SLSUR	slope
	SURS	intitial moisture quantity
	InFEXP	ratio between the max and mean infltration capacities over the PLS
	LZSN	lower zone nominal storage
	LZS	lower zone storage
	INTFW	inter flow inflow parameter
	UZSN	upper zone nominal storage
	TO	total surface runoff quantity each time unit
	AM_1, AM_2	Clark coefficient
	A, B, C	sub-total runoff quantity at sub-watershed unit
Sediment Parameter	SMPF	supporting management practice factor
	DUMP	soil erodbility factor, k
	KRER	coefficient in the soil detachment equation
	JRER	exponent in the soil detached sediment storage decrease
	KSER, JSER	coefficient and exponent in the detached sediment washoff equation
	KGER, JGER	coefficient and exponent in the matrix sediment scouring equation
	STCAP	sediment transportation capacity
	DET	sediment detached from the soil matrix by rainfall
	RAIN	rainfall
	WSSD	washoff of detached sediment
	SCRSD	scour of matrix soil

	TS	total sediment quantity each time unit
	AS, BS, CS	sub-total sediment quantity at sub-watershed gate
Water Quality Parameter	POTFW	washoff potency factor
	SQO	initial storage of available quality constituent on the surface
	SOQO	washoff of the quality constituent from the land surface
	WSFAC	susceptibility of the quality constituent to washoff
	ACQOP	accumulation rate of the constituent
	REMQOP	unit removal rate of the stored contituent
	WASHQS	flux of quality constituent associated with detached sediment washoff
	TQ	total concentration of quality constituent each time unit
	AQ, BQ, CQ	sub total sediment quality at sub watershed gate
Symbol Parameter	IM	element identifier
	IFRQ	frequency of each group of element
	NI, NJ, NK,	symbol name
	ISY	final symbol identifier

가 된다. 이 식에서 k값을 유출률 r(mm/hr)로 나타내면

$$p_0 - p = p_0\ (1 - e^{(-117rt)}) \qquad (3\text{-}39)$$

로서 나타낼 수 있다. 여기서 p_0는 강우 초기에 유출이 일어나는 지표면상의 오염물질의 양(g), p는 강우시 어느 시점의 양이며 r은 유출률, t는 의사화 시간간격이다.

이 식은 씻겨 내려가는 양을 추정하는 식이므로, 씻겨 내려온 양을 추정하기 위해서 이 식을 $pt = p_0\ e^{(-kt)}$의 식으로 변형하여 사용하였다. 즉 각 소유역별로 하천에 도달한 오염물질의 양은 시간이 지남에 따라 멱지수 함수로 감소되어 유하한다고 가정하였다.

3.3. 전산 프로그램의 구성

3.3.1. 모형의 구성

이 연구를 통해 개발된 전산모형은 1개의 주 프로그램과 6개의 부 프로그램으로 구성되어 있다. 이 부 프로그램중 3개는 유출모형을 수행하기 위한 것이며 수질모형과 침식모형은 각각 1개씩으로 구성된다. 그리고 SYMBOL 부 프로그램은 각 단위 격자별로 환경정보사항이나 유출 발생량을 출력하는데 사용될 수 있다.

주 프로그램에서는 모든 입출력 file을 조정하고 모든 파라메타를 초기화 시킨다. 그리고 수문환경정보를 단위격자별로 읽혀 수문환경 및 기타 모형의 파라메타 값을 결정한 후, 각 단위격자마다의 유출량, 침식량 및 수질을 계산하기 위해 부 프로그램을 부르게 된다. 이러한 계산은 의사화 시간 단위마다의 강우량을 읽어 연속적으로 수행되며, 모든 단위 격자에서의 계산이 완료되면 최종적으로 3개소의 유출구에서의 총량이 계산된다.

부 프로그램 WATER에서는 각 단위격자 마다의 직접유출량을 계산하기 위해, 침투량계산에 사용되는 DIVISN과 지표면 유출에 사용되는 PROUTE를 부르게 된다. 부 프로그램

SEDMNT에서도 각 단위격자 마다의 침식량이 시간단위마다 계산되며, PQUAL에서는 이 침식량에 부하되는 수질의 양을 계산하게 된다. 이 프로그램의 유통도는 〈그림 3-1〉과 같다.

3.3.2. 입력 및 출력 변수의 성격

이 프로그램에서 사용되는 주요 파라메타들은 크게 분류하여, 일반적인 유역환경입력자료 운용에 대한 파라메타, 유출수에 대한 것, 침식량에 대한 것과 수질에 관한 것의 4가지로 구분할 수 있다. 운용자료에 대한 파라메타는 22개, 유출수의 그것은 16가지, 침식량은 17가지 그리고 수질에 관한 것이 9가지가 〈표 3-1〉에 나타나 있다.

제 4 장 체계생태계모형의 적용

4.1. 유역 환경자료의 구성

4.1.1. 유역의 설정

덕진공원유역은 (그림 4-1)과 같이 제 1 유역(전북대 유역), 2유역권(동물원 유역)과 3유역권(육지구 유역)의 각각이 종합적 토지이용, 자연적 토지이용, 도시적 토지이용의 성격을 나타내도록 하였다.

4.1.2. 환경 정보 자료의 구성

각종 환경정보의 입력기본단위인 단위격자의 크기는 1 : 25,000 지형도에서의 조사 정도(精度)인 2.5ha 보다 작으면서[58], 지형특성을 표현할 수 있는 최소단위로서 50m×50m (0.25ha)로 설정하였다. 유역의 분할은 유역내 모든 단위격자를 유달거리 5분 단위로 구분

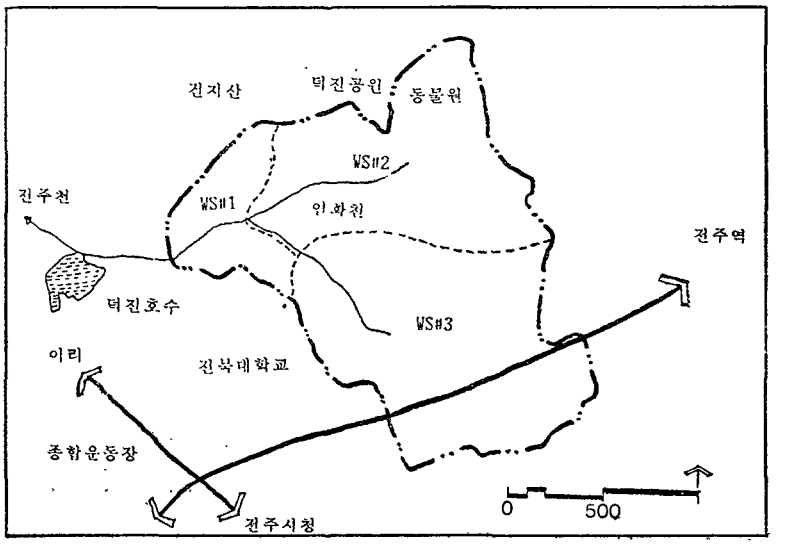


Fig. 4-1. Subdivision of Study Area

Fig. 4-2. Sector Classification (Cell Size=50m×50m)

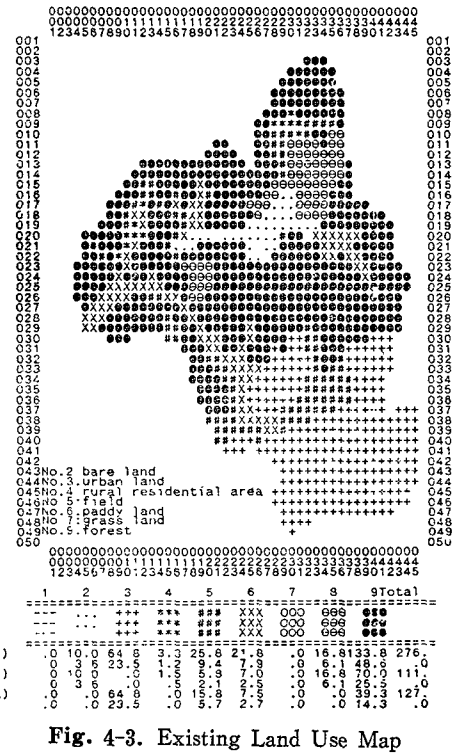


Fig. 4-3. Existing Land Use Map

하여 (그림 4-2)와 같이 다시 총 10개의 소유역으로 구분하였다. 토지이용은 (그림 4-3)과 같이 산림지, 초지, 밭, 취락지, 도시지역과 나지로 구분하여 입력하였다. 토양은 정밀토양도의 토양번호를 그대로 입력하였고, 재분류시 토양과 침식정도에 따라 8가지로 구분하였다. 즉 토양통에 관계없이 토성으로서는 미사양토, 양토, 사양토, 자갈양토의 4가지로 침식정도는 없거나, 다소 있거나, 심한 경우의 3가지로 구분하였다. 경사는 등고선 5m마다 수평거리를 재서 5등급으로 구분하였다. 보통 환경정보체계구성시 이 경사를 최고와 최저 표고가 입력된 표고도를 통해서 좀 더 정밀하게 분석할 수 있다. 이 연구에서는 편의상 1~4%, 5~10%, 11~14%, 15~20% 이상으로 구분하였는 바, 이는 (그림 4-5)과 같다. 임상자료는 임상이 3유형(H=활엽수, C=침엽수, M=혼효림), 흉고직경이 4유형(0=치수(~6cm), 1=소경목(6~18cm), 2=중경목(18~28cm), 3=대경목(28cm~)), 수령이 10년씩 단위로 6유형(Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ, Ⅵ), 수관밀도가 3유형(저밀도(~40%), 중밀도(40~70%), 고밀도(70%~))로 되어 있으나[51], 이 연구에서는 전부 13가지로 구분된다. 이 자료를 수관밀도를 기준으로 하여(그림 4-6)과 같이 No. 2인 경우는 소밀도, No. 3과 No.

5는 중밀도로, 그리고 No. 7, No. 8, No. 9는 고밀도로 나타내었다. 이 중 많이 나타나는 임상은 수관밀도 40% 이하의 소밀도로서 74.5ha(27.11%)이며, 주변 산의 정상주변은 중밀도로서 주로 혼효림 2 영급으로 구성되어 있으며 32ha(11.65%)이다. 수관밀도 70% 이상의 임상은 23.25ha(8.46%)이다.

4.2. 유출모형의 검증

4.2.1. 유출모형 입력변수의 구성

1. 수관차단량

수관차단량 변수(CEPSC)를 나타내기 위한 최대 밀도시의 차단량은 아직 우리나라에서 조사된 바가 없으므로 (표 4-1)과 같이 ARM(Agricultural Runoff Model)에서 제시하는 기준을 따랐다. 즉 초지인 경우는 2.5mm/day, 경작지인 경우는 2.5에서 6.5에 이르기까지 작물의 성장에 따라 차이가 있으며 疎林산림지인 경우는 3.5mm/day이고 고밀산림지인 경우는 5.0mm/day이다. 도시지와 나지인 경우는 실제수관 차단량보다는 지면 또는 건물 저류량 개념이 큰 바, 이 연구에서는 수관차단량이 초지보다 낮다고 가정하여 1.00mm를 기준으로 삼았다. 이 연구에서는 앞서 입력되었던 환경정보자료중 (표 4-2)과 같이 FOREST. DAT와 LAND. DAT의 자료를 그 특성에 맞도록 변수값을 부여하였다. 즉 FOREST. DAT의 임상유형중 활엽수림과 혼효림의 고밀 임상인 경우는 최대 차단량인 4.0mm/day로 하였

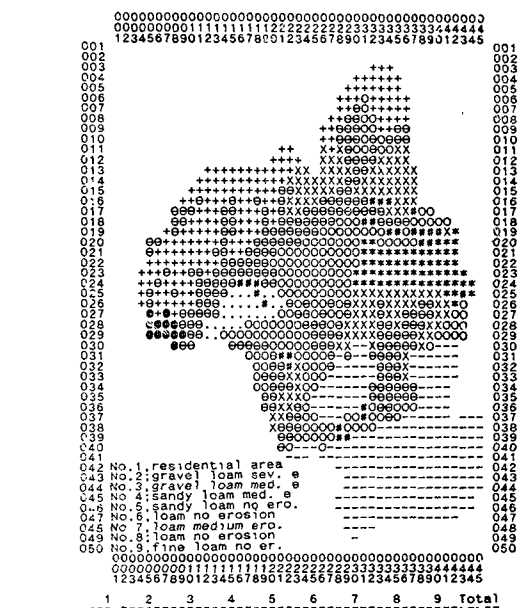


Fig. 4-4. Existing Soil Map

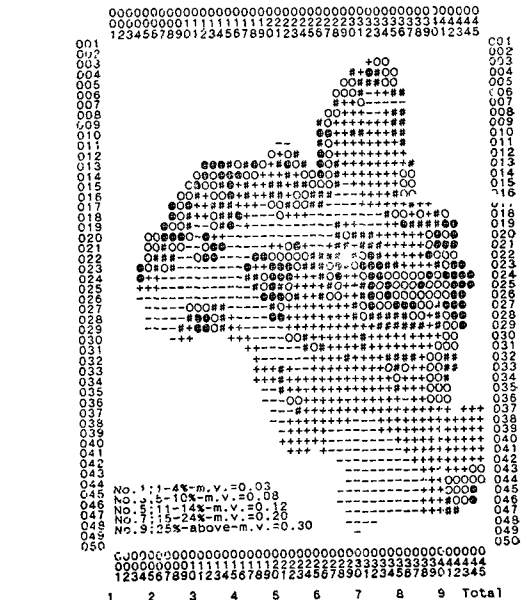


Fig. 4-5. Existing Slope Map

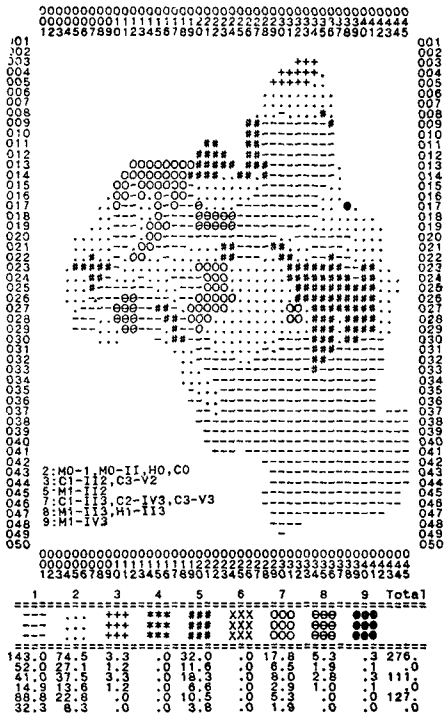


Fig. 4-6. Existing Forest Map

고 소멸 임상인 경우는 3.5mm/day로 값을 부였했다. 그리고 LAND. DAT 파일의 초지인 경우는 2.5mm/day로서, 취락지는 도시지역보다 다소 높은 1.2mm/day를 부여하였다.

2. 토양특성에 따른 변수

침투계수(INFILT)는 평균 침투율로서 나타내는데, 대개의 경우 0.25~2.5(mm/hr)의 범위이며, 토양의 응결성과 투수성에 따라 결정된다. 침투계수의 초기치는 (표 4-3)과 같이 미국 토양보전국(U.S. Soil Conservation Service, SCS)에서 제시하고 있는 토양유형에 의해 결정될 수 있다. 즉 배수의 형태에 따라 A, B, C, D로 구분되는 토양형에 따라 최대 침투율은 25.0mm/hr이고 최저 침투율은 0.25mm/hr로 제시하고 있다. 이 기준을 근거로 하여 (표 4-4)에서와 같이 자갈양토는 A형으로, 사토양는 B형으로, 양토는 C형으로 그리고 미사양토는 D로 값을 부여하였다. 기타 토양특성에 관련되는 변수인 경우는 실제 현장측정을 통해 값이 추정되어야 하나, 이 연구의 한계상 일반적으로 사용되는 값을 사용하였다. 즉 침투지수(INFILD)와 침투능비(INFEXP)의 값은 2.0으로, 토양저층부의 상시 저류량(LZSN)은 125mm로서 지중수 유출 계수(INFFW)은 1.5mm로 사용하였다.

3. 유역 기하학적 특성

유역의 기하학적 특성으로는 만닝의 조도계수(NSUR), 지표면 길이(LSUR)와 경사(SL-

〈**Table** 4-1〉 The Value of Interception Storage

Vegetation	Interception Storage(mm/day)
Grass Land	2.5
Crop Land	2.5~6.5
Light Forest	3.5
Heavy Forest	5.0
Urban	1.0
Bare Land	1.0

(Source) Donigian, A.S. Jr., et al.(1978) User's Manual for Agricultural Runoff Management (ARM) Model, EPA: p.54.

〈**Table** 4-2〉 Coded Interception Storage Value of Forest Type and Land Use Type

File	Code No.	Type	Interception Storage(mm/day)
FOREST. DAT	9	M1-Ⅳ3	4.0
	8	M1-Ⅱ3, H1-Ⅱ3	4.0
	7	M1-Ⅱ3, C2-Ⅳ3, C3-Ⅴ3	3.8
	5	M1-Ⅱ2	3.8
	3	C1-Ⅱ2, C3-Ⅴ2	3.5
	2	MO-Ⅰ,MO-Ⅱ,H-1,O-1	3.5
LAND. DAT	7	Grass land	2.5
	6	Paddy land	2.0
	5	Field land	1.5
	4	Rural residential A.	1.2

〈**Table** 4-3〉 The Value of Infilration Rate

Soil Group	Soil Class	Infiltration rate(mm/hr)
A	very good drainage, gravel loam	10.0~25.0
B	good drainage, sand	2.5~10.0
C	bad drainage, fine sand	1.24~ 2.5
D	poor drainage, silt	0.25~ 1.2

(Source) Donigian, A.S. Jr., et al (1978) User's Manual for Agricultural Runoff Management (ARM) Model, EPA: p.61.

〈**Table** 4-4〉 Recoded Value of Infiltration rate according to Soil Type

File	Code No	Soil Group	Soil Class	(mm/hr)
SOIL. DAT	2,3	gravel loam	A	10.0
	4,5	sandy loam	B	2.5
	6,7,8	loam	C	1.25
	9	fine sandy loam	D	0.25

〈**Table 4-5**〉 Manning's n for Overland Flow

Surface Type	Manning's n
smooth, packed surface	0.05
normal roads and parking lots	0.10
disturbed land surface	0.15
turf	0.25
heavy turf and forest litter	0.35

(Source) Crawford, N.H., R.K. Linsley(1966) Digital Simulation in Hydorlogy: Stanford Watershed Model IV, Dept. of civil Engineering, Stanford University, p.68.

SUR)가 있다. 만닝계수 n은 일반적으로 하천에서 적용되는 계수이다. 근사치로서 (표 4-5)와 같이 제시하고는 있지만, 지표면 유출의 특성상 그 수심이 매우 작기 때문에 국지적인 변이가 크다. n의 값은 정지(整地)된 표면인 경우의 가장 낮은 0.05에서부터, 초지가 무성할 경우의 0.35에 이르기까지 다양한 양상을 보이고 있다. 이 연구에서는 토지이용자료인 LAND. DAT에서 지표면의 특성을 추출했는 바, 산림지인 경우는 0.05로, 도시지역은 0.1로 하였으며, 나지인 경우는 0.15로서 값을 부여하였다. 그리고 지표면 길이 변수(LSUR)은 30~90m의 범위로서 적용되는데, 이 연구에서는 단위격자 단위거리인 50m로 입력하였다. 경사 변수(SLSUR)은 경사자료로부터 도출하였으며 1~4%는 0.03으로, 5~10%는 0.08로, 11~14%는 0.12로, 15~20%는 0.2로서 값을 부여하였고 21% 이상은 0.3으로 나타내었다.

4.2.2. 유출량의 검증

유출량의 검증을 위한 강우사상은 강우량이 30mm 이상이 되는 날로서 가능하면 수질조사가 된 날짜를 선택하였다. 즉 (그림 4-7)과 같이 39.2mm가 온 88년 5월 7일, 30.2mm가 온 88년 9월 10일과 33.1mm가 온 89년 7월 15일을 선택하였다.

한편 유량을 산정하기 위한 수위—유량곡선식의 유도결과 산출된 회귀식은[58] ws #1인 경우는 $Q=6.625(H-26.566)^2$, ws #3인 경우는 $Q=2.054(H-29,990)^2$로서 F-test검증결과 5%이내의 유의성이 있었다. 이 결과는 (표 4-6)에 나타나 있다.

모형의 검증 또는 보정이란 프로그램화된 모형이 어느 정도의 정확도 기준을 만족시키면서 발생한 호우로 인한 유역의 유출을 재연할 수 있도록 모형의 변수를 조정시키면서 발생한 호우로 인한 유역의 유출을 재연할 수 있도록 모형의 변수를 조정하는 과정이라고 할 수 있다. 이는 결국 모형이 포함하고 있는 변수의 최적화(paramater optimization)을 의미한다. 이 연구에서는 이 변수의 최적화를 위해서 Dawdy와 O'Donell이 제안한 방식을 사용하였다.[54] 이 방식은

$$F^2=|\Sigma(q_i-r_i)^2|\text{minimized} \qquad (4\text{-}1)$$

여기서 F^2는 목적함수 있으며 q_i, r_i는 각각 시각 i에 있어서의 관측 유량 및 모의 유량이

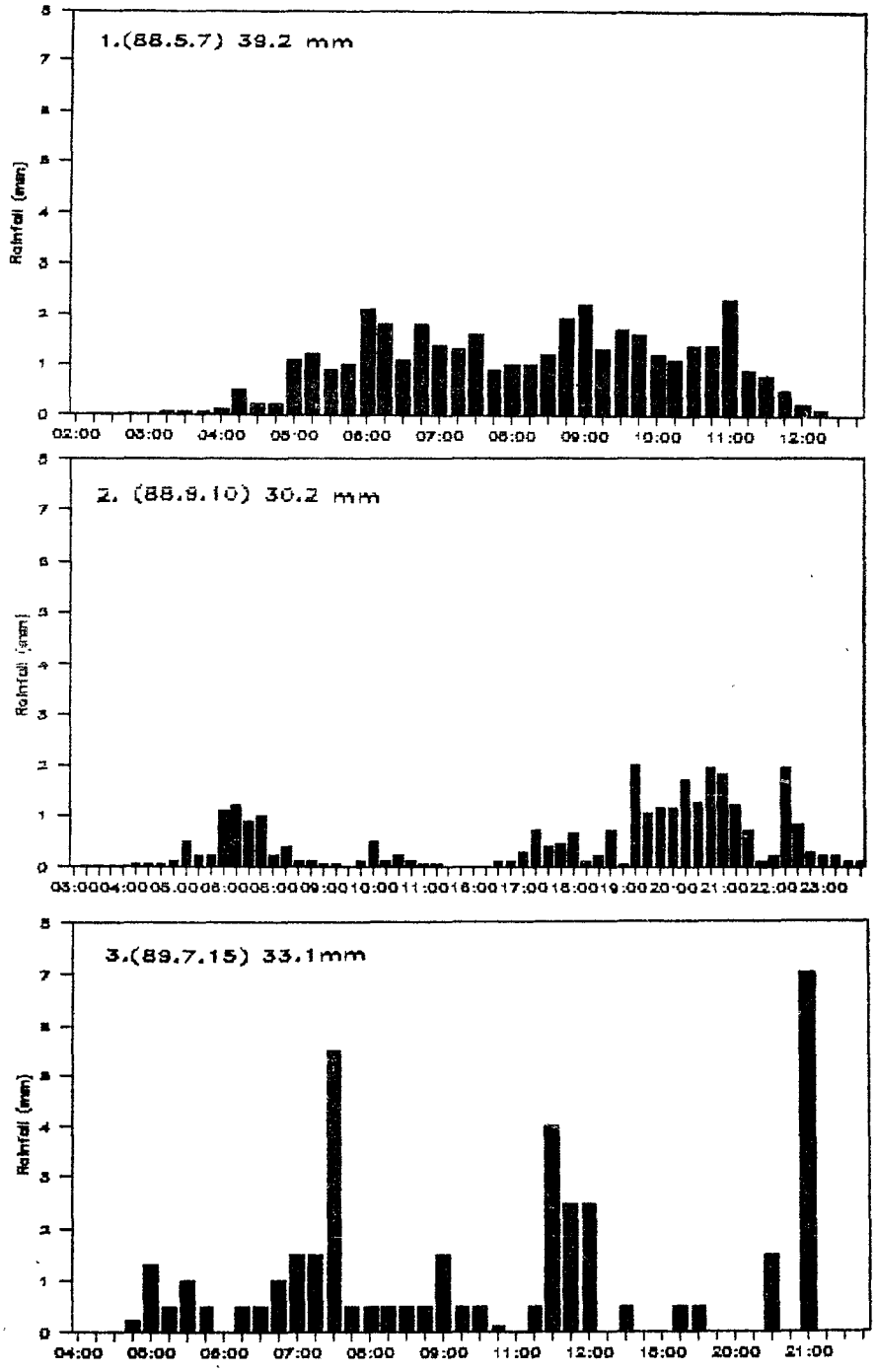


Fig. 4-7. Rainfall Event for Calibration

〈**Table 4-6**〉 Regression Analisis of Water Level and Discharge Curves

Station	Discharge eq.	Corre. coeff.	F-Value	Remark(α=0.05)
ws #1	$Q=6.625(H-26.566)^2$	0.885	14.55	$F_{1,4}=7.71$
ws #2	$Q=2.054(H-29.990)^2$	0.769	8.31	$F_{1,6}=5.99$

〈**Table 4-7**〉 Calibration of the Major Parameter of Runoff at ws #1

	Infiltration Rate(mm/hr)					Manning's n					MRS
	Soil Type					Surface Type					
	A	B	C	D	U[1]	A[2]	B[3]	C[4]	D[5]	E[6]	
Verifi-1	10.16	2.54	1.27	0.25	0.03	0.05	0.10	0.15	0.25	0.35	1.757
Verifi-2	25.41	0.16	2.54	1.27	0.25	0.02	0.07	0.12	0.22	0.32	5.063
Verifi-3	2.54	0.63	0.38	0.13	0.003	0.03	0.08	0.13	0.23	0.33	4.475

1) Urban Area 2) Smooth Asphalt 3) Asphalt or Concrete Paving
4) Packed Clay 5) Turf 6) Forest Litter

다. 일반적으로 이 값에는 제곱근을 사용하기 때문에 RMS(root-mean squares)라고 한다.

이 연구에서는 검증의 대상을 1988년 5월 17일 강우사상과 관측치중 ws #1 지역을 택하여 시행하였으며 유출에 큰 영향을 미치는 주요 매개변수로서 침투율(INFILT)과 만닝의 조도계수(NSUR)를 선택하여 RMS 차를 비교하였다. 즉 (표 4-7)와 같이 첫번째의 변수치값은 침투율의 값을 0.03~10.16(mm/hr)로, 조도계수의 범위는 0.05~0.35로서 부여하

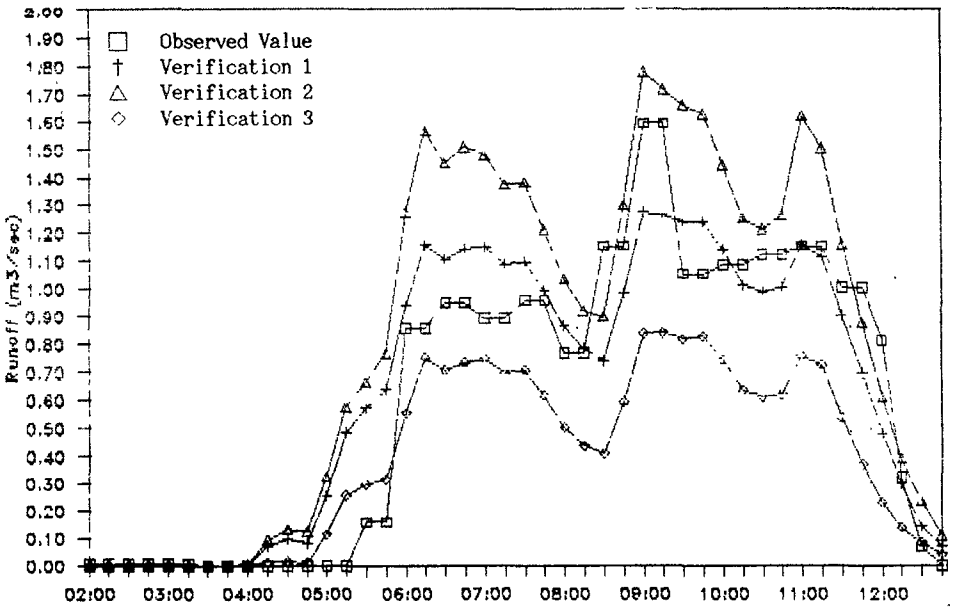


Fig. 4-8. Runoff Verification

였다. 그리고 두번째의 경우 침투율값은 0.25~25.4(mm/hr)로, 조도계수 값은 0.02~0.32로서, 세번째는 각각 0.003~2.54(mm/hr)로서, 0.03~0.33으로 부여하였다. 그 결과 첫번째의 경우는 RMS값이 1.757, 두번째는 5.063, 세번째는 4.753이 도출되어 첫번째의 값이 가장 작은 RMS값이 나타났다. 이 결과는 (그림 4-8)과 같다.

유출량에 가장 큰 영향을 미치는 변수로서의 침투율의 값을 (표 4-3)의 값과 비교해 보면 RMS의 값이 가장 낮은 경우의 침투율값은 침투율의 범위중 가장 낮은 범위라는 것을 알 수 있다. 이는 토양의 경도가 높든지 하여 나타난 현상으로서 판단된다. 도시유역에 적용된 침투율의 값은 토양형 D에 해당되는 값의 1/8정도의 값을 보이고 있다.

첨두 유량시의 관찰치와 모형치는 (표 4-8)과 같으며 88.5.7의 비교 그림은 (그림 4-9), 88.9.10의 것은 (그림 4-10), 89.7.15의 것은 (그림 4-11)에 나타나 있다. 대개 오차의 범위는 1~40%까지를 보이고 있으며, 9월 10일의 ws #3의 경우에는 큰 편차가 나타나고 있다. 이는 국지적 강우특성으로 인한 것으로 판단된다.

4.3. 침식모형의 검증

4.3.1 침식모형 입력변수의 구성

침식모형의 경우는 토양분리방정식을 풀기 위한 변수가 이용되는데 Wischmeir와 Smith (1965)가 제안한 USLE식의 토양분리방정식계수의 값(KRER), 그 지수값(JRER) 지피율과 식생유형에 따라 결정되는 식생피복인자(COVER)의 값과 침식량 운반능력에 부여되는 값 (JSER, KSER)으로 구분된다.

1. 토양 분리 방정식의 계수와 지수

토양 분리 방정식의 계수로서의 KRER값은 토양유형이나 토양표면 특성에 따른 침식도 (erodibility)와 관계되며, USLE식의 P요소(SMPF)와 K요소의 곱으로서 나타낸다.[11] 즉 KRER=$K \times P$이다. 여기서 K값은 (표 4-9)과 같이 토성유형과 유기물함량에 의해 결정된다. 이 (표 4-9)는 3장에서 나왔던 (표 3-1)중 적용에 필요한 자료만 발췌한 것이다. 이 연구에서의 K값은 SOIL. DAT를 이용하여 자갈토양인 No. 3과 No. 2는 유기물함량을 0.5% 이하인 0.35로서, 미사양토인 No. 9는 유기물함량 2%의 값인 0.38로 그리고 양토인 No. 6, No. 7, No. 8도 유기물함량 2%인 0.34로서 초기치를 부여하였다.

한편 토양보전인자 P값의 기준 중 이 연구 대상 지역특성에 맞는 등고선식 경작형태와 정지되지 않은 토양에 해당되는 기준은 (표 4-10)과 같다.

그리고 P값의 경우를 결정하기 위해서 LAND. DAT의 토지이용자료와 SLOPE. DAT의 경사자료를 이용하였다. 즉 경지지역에 해당되는 LAND. DAT의 No. 5와 No. 6은 모두 1.0으로 부여했으며, 기타 비경지지역은 1~4%인 경우는 0.6, 5~10%는 0.5, 11~15%는 0.6, 16~20% 0.8, 그리고 20% 이상은 0.9로 값을 부여하였다.

그리고 토양 분리 방정식의 지수(JRER)값은 강우강도와 토양분리 에너지사이의 계수로

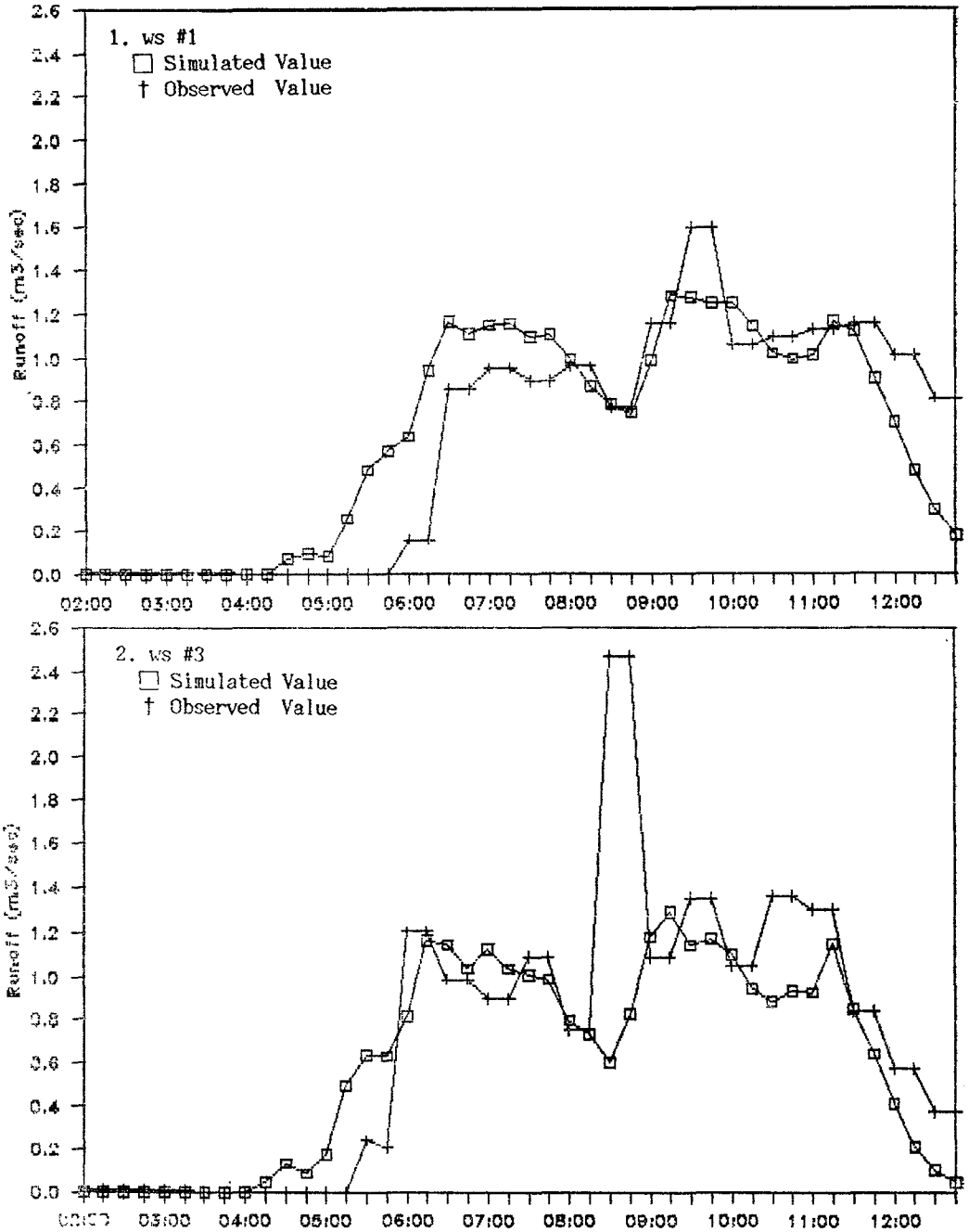


Fig. 4-9. Comparison of Simulated and Cbserved Runoff value(88.5.7)

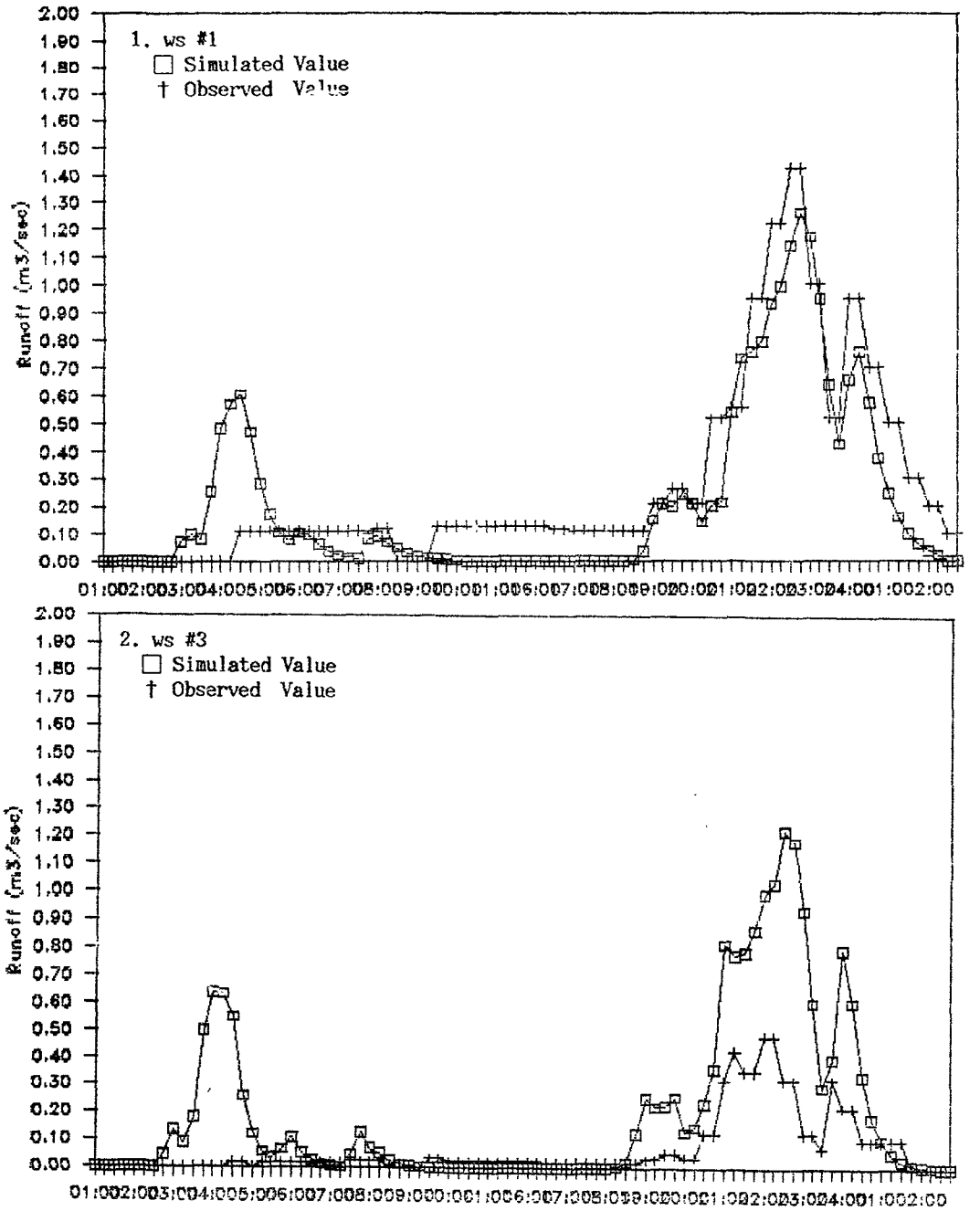


Fig. 4-10. Compraison of Simulated and Observed Runoff value(88.9.10)

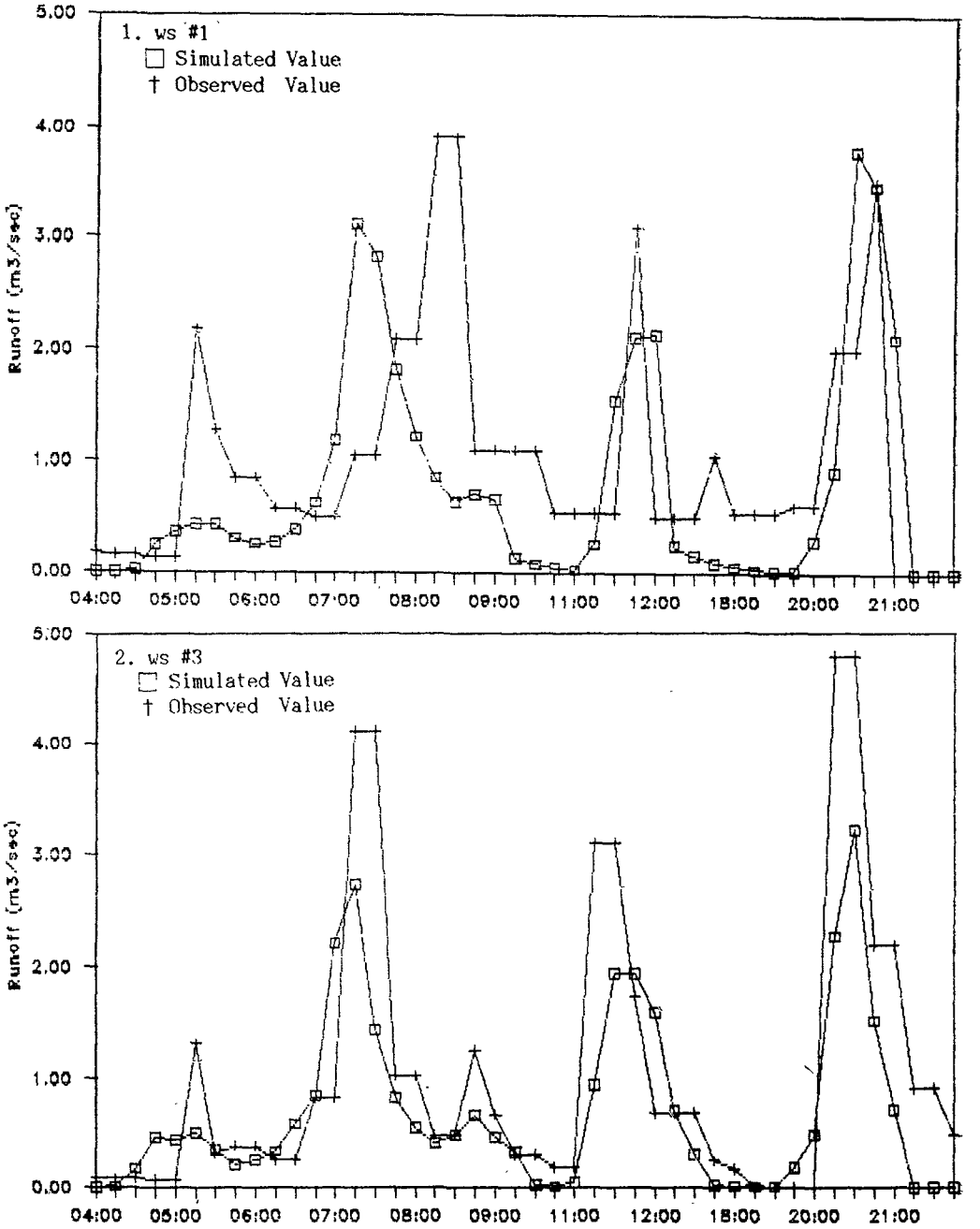


Fig. 4-11. Comparison of Simulated and Observed Runoff value(89.7.15)

〈**Table 4-8**〉 Comparison of Observed and Simulated Runoff Peak Flow(mg/l)

Storm day	88.5.7		88.9.10		89.7.15	
Sub-watershed	ws #1	ws #3	ws #1	ws #3	ws #1	ws #3
Simulated Value	1.445	1.438	1.261	1.222	3.963	3.294
Observed Value	1.765	2.550	1.426	0.487	3.912	4.800
Error(%)	18	44	12	150	1	31

〈Table 4-9〉 The Selected Values of Soil Erodibility Factor for Modelling

texture class	organic matter content		
	0.05%	2%	4%
sandy loam	0.27	0.24	0.19
find sandy lomd	0.35	0.30	0.24
loam very fine sand	0.44	0.38	0.30
loam	0.38	0.43	0.29

〈**Table 4-10**〉 The Selected Values of Support-Practice Factor for Modelling

practice	slope(%)				
	1~2	2.1~7	7.1~12	12.1~18	18.1~24
contour terracing	0.6	0.5	0.6	0.8	0.9
no supporting pratice	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

〈**Table 4-11**〉 The Selected Values of Cover Factor for Modelling

type	ground cover(%)					
	0	20	40	60	80	95~100
weeds	0.45	0.20	0.10	0.042	0.012	0.003
forest	0.02~0.09	0.02~0.09	0.02~0.09	0.01~0.04	0.014~0.04	0.03~0.011

서 $Y=9.6+3.31 \log X$의 식을 통해 산출된다. 여기서 Y는 Kinetic Energy(m/tons)/(ha/mm)이며 X는 강우강도(mm/hr)이다. 이 값은 산출하기가 쉽지 않으나 그 범위는 2.0~3.0이고 대개 2.0을 적용한다.

2. 식생피복인자

식생피복인자변수(COVER)는 지피에 의한 침식 영향변수로서, 지피율을 C라고 할 때 $1-C$의 향태로 나타난다. 앞서 3장의 (표 3-2)와 (표 3-3)에서 소개된 C의 값을 좀 더 단순화시켜 초지와 수림지로 구분하여 나타내면 (표 4-11)와 같다.

이 연구에서는 토지이용자료(LAND. DAT)와 임상자료(FOREST. DAT)에 의해 값을 선택하였다. 즉 초지인 경우는 토지이용상 농경지나 초지가 모두 해당되므로 0.1로 하였으며,

산림지역인 경우에는 다시 임상자료를 3개로 세분하였는 바, 수관밀도가 고밀도인 No. 7, No. 8, No. 9인 경우에는 0.055, 중밀도 No. 5, No. 3인 경우에는 0.025를, 그리고 저밀도인 경우에는 0.007을 부여하였다.

3. 침식량 운반 지수 및 계수

침식량 운반 지수(JSER)값은 표면유출수와 침식운반력과 관계된다. 이 지수의 일반적인 범위는 1.6~2.0이며 이 연구에서는 초기치를 1.8로 하였다. 그리고 침식 운반 계수(KSER)값은 경사, 유출길이, 토양입자크기 및 조도계수에 의해 결정되며 0.01~5.0의 범위로서 보정을 통해 적정값을 부여해야 한다.[11] 이 연구에서는 초기치를 2.0으로 하였다.

4.3.2. 침식량의 검증

침식량의 검증을 위해서 7월 14일 1회와 7월 15일에 4회에 걸쳐서 SS(suspendid solids)를 조사하였다. 단기를 대상으로 한 침식 모형계수에 관한 연구가 거의 없는 상태이므로 계수의 값을 부여하기에 어려움이 있었다. 따라서 이 연구에서는 침식모형은 scouring 요소를 제외한 wash off 요소만을 고려하였다.

이 침식량 관측일인 경우 처음 침식량조사 때에는 강우가 있었으나 그 뒤 30분 간격으로 3회를 더 측정할 때는 강우가 없었다. 따라서 유출량과 침식량이 줄면서 12 : 40분 때에는 774mg/l이던 것이 계속해서 331mg/l, 175mg/l, 102mg/l로 감소되는 현상을 보였다. 이 관측치를 기준으로 유출량과 같은 방법으로 수행하였다.

침식량모형에 있어서는 그 양에 가장 큰 영향을 미치는 매개 변수로서 운반율(r)과 토양 침식성 인자(k)를 선택하여 RMS값을 산출하였다. 이 매개변수들을 최종적으로 비교하기 전에 여러 범위의 운반율과 침식성인자의 값에 대한 모형수행을 통해 실측된 3개 지점에서의 침식량과 비교하였다.

토양 침식성 인자의 경우 (표 4-9)에 나타난 범위인 0.27~0.44의 초기값에서는 실측치와의 차이가 심했고 그 보다 매우 낮은 범위인 0.02~0.16에서 실측치에 접근하였다. (표 3-1)을 참고하여 비교해 보면 이 값은 유기물 함량 4%에 모래를 주성분으로 하는 토양 성분의 값인 것을 알 수 있었다. 즉 실제 유역에 분포하는 토양은 침식의 정도가 매우 낮은 토성을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

그리고 운반율 계수 r 값을 검토하였는데 면적이 300ha정도 되면 운반율은 최대 40%밖에는 되지 않으나 실제 연구 대상유역에서는 70%까지의 범위일 때 실측치와 근접하는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 침식운반율은 유역의 특성에 따라 큰 변이의 폭을 갖을 수 있다는 것을 보여 주고 있다.

(표 4-12)에서는 최종적으로 검토한 운반율(r)과 도시지역에 대한 침식성 인자 K값을 나타내고 있다. 여기서 r_1은 이전 시간대에 유출된 침식량에 부하되는 운반율이고 r_2는 인접한 50~100ha의 유역면적인 경우의 운반율이고 r_3는 100~200ha인 경우이다.

〈**Table 4-12**〉 Calibration of the Major Parameters of Sediment(1989.8.15)

1. ws #1

	parameters				observed data(mg/l)				
	r1	r2	r3	k	774	331	175	102	RMS
v-1	0.72	0.16	0.14	0.3	714	463	232	123	157
v-2	0.72	0.16	0.14	0.2	529	337	167	89	245
v-3	0.72	0.14	0.12	0.3	612	397	199	105	177
v-4	0.71	0.13	0.11	0.3	629	482	325	239	291

2. ws #2

	parameters				observed data(mg/l)				
	r1	r2	r3	k	566	209	145	59	RMS
v-1	0.72	0.16	0.14	0.3	557	340	180	96	140
v-2	0.72	0.16	0.14	0.2	545	335	178	95	137
v-3	0.72	0.14	0.12	0.3	481	293	155	82	122
v-4	0.71	0.13	0.11	0.3	525	402	294	216	293

3. ws #3

	parameters				observed data(mg/l)				
	r1	r2	r3	k	772	315	200	121	RMS
v-1	0.72	0.16	0.14	0.3	705	413	195	104	120
v-2	0.72	0.16	0.14	0.2	490	282	133	71	296
v-3	0.72	0.14	0.12	0.3	608	355	168	89	174
v-4	0.71	0.13	0.12	0.3	640	459	287	211	232

4.4. 수질모형의 검증

4.4.1. 수질모형 입력변수의 구성

이론적으로 고찰되었던 경작지에서의 오염물질의 시비량 F(kg/ha/day), 토양 특성에 따른 BOD와 PO_4-P의 KN 비 및 도시의 비점오염원 산출식에 있어서의 도로연석 길이당 고형물질 축적량 등은 1일을 기준으로 한 변수로서, 5분단위의 단기유출모형의 계수값으로 사용하는 데는 어려움이 있다.

따라서 실측된 침식량과 오염물질량을 기준으로 단순 부하비를 적용하여 시행착오방법을 사용하였다. 즉 발생된 침식량과 계측된 각 수질요소별 농도를 참고하여 BOD와 PO_4-P의 KN 비의 범위가 60g/kg이하로서 가정하고, 경작지와 초지는 도시나 수림지보다는 부하비가 높다는 가정하에 다음과 같이 초기치를 부여한 다음 연속해서 의사화를 통해 실측치와 가까와지도록 하였다. BOD의 초기 KN비는 나지에 있어서 4.0, 도시는 1.75, 취락지는 10.0, 밭은 45.0, 논은 43.0, 초지는 35.0 그리고 산림지는 20.0으로 부여하였다. PO_4-P의 경우에는 나지에 있어서 20.0, 도시는 0.001, 취락지는 45.0, 밭은 40.0, 논은 40.0,

초지는 55.0 그리고 산림지는 1.0으로 부여하였다. 그리고 유출률(r)은 BOD를 3.5, PO_4-P를 25.0으로 부여하였다.

한편 점오염원적인 요소는 특정 강우시라고 해서 그 양태가 틀려지지 않을 것이므로 강우시의 오염발생량에서 그 시간대에 발생하는 상시 오염량을 빼주어 비점오염원량으로서 추정하였다.

4.4.2. 수질모형의 검증

수질모형의 검증을 위해 사용된 실측치는 침식량 검증에서와 같이 7월 14일과 7월 15일에 조사된 값을 사용하였다. 이때 조사된 실측치의 값은 점오염원의 결과인 평상시의 오염량은 제외해야 하기 때문에 1988년부터 조사된 26회의 조사자료중에서 12시부터 2시 사이에 조사된 자료의 평균치를 점오염원으로 인한 농도로 사용하였다. 즉 (표 4-13)에서와 같이 1988년 10월 30일, 4월 28일, 1989년 6월 4일에 각 유역별로 조사된 농도와 유량에 의해서 점오염량을 추정하였다. 이 결과를 1989년 7월 15일, 12시 40분부터 조사된 오염물질의 양에서 빼서 비점오염원량으로 사용하였다.

이 결과는 (표 4-14)에서 보는 바와 같이 PO_4-P의 경우 제 1 유역과 제 3 유역(도시유역)은 0.00~0.198mg/l이고, 제 2 유역의 경우(공원 유역)는 0.2~1.01mg/l로서 공원 유역의

〈Table 4-13〉 Pollutant Concetration during Dry Weather

Date	Runoff(m^3/sec)			PO_4-P(mg/l)			BOD(mg/l)			PO_4-P(g/sec)			BOD(g/sec)		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
10/30	.083	.014	.053	2.45	0.09	2.79	121.	2.10	174.	.203	.001	.148	10.	.03	9.22
4/28	.110	.000	.065	1.80	0.11	2.90	109.	4.20	161.	.198	.001	.189	12.	.00	10.4
6/4	.150	.014	.079	2.40	0.12	2.30	141.	10.0	117.	.360	.002	.182	21.	.14	9.24
Mean										.254	.001	.173	14.	.06	9.62

〈Table 4-14〉 Nonpoint Source Pollutant Concentration by Rainfall Effect

		PO_4-P(mg/l)			BOD(mg/l)		
		#1	#2	#3	#1	#2	#3
Conc. during Dry Day		0.254	0.001	0.173	14.36	0.057	9.62
Total Concentration on Rainy Day	t 1	0.400	1.113	0.280	30.74	6.68	16.13
	t 2	0.188	0.791	0.211	16.48	5.78	15.60
	t 3	0.144	0.197	0.157	10.19	2.65	7.86
	t 4	0.297	0.541	0.371	7.08	1.56	10.43
Nonpoint Source Concentration by Rainfall Effect	t 1	0.146	1.112	0.107	16.38	6.63	6.51
	t 2	0.000	0.790	0.038	0.12	5.72	5.98
	t 3	0.000	0.196	0.000	0.00	2.59	0.00
	t 4	0.043	0.540	0.198	0.00	1.50	0.81

〈**Table 4-15**〉 Calibration of the Major Quality Parameters at ws #1

1. Parameters Calibr^{e}tion for BOD Modelling

	Potency Factor(g/kg)							K	RMS
	Bare	Urban	Rural	Field	Paddy	Grass	Wood		
veri-1	4.0	1.75	10.0	45.0	43.0	35.0	20.0	3.5	1.878
veri-2	4.0	1.75	10.0	47.0	45.0	35.0	25.0	3.5	1.723
veri-3	2.0	1.75	10.0	47.0	45.0	35.0	26.0	3.5	1.714
veri-4	2.0	1.75	10.0	47.0	45.0	35.0	26.0	3.2	2.928
veri-5[1]	2.0	1.75	10.0	47.0	45.0	35.0	26.0	3.7	1.425

2. Parameters Calibration for PO_4-P Modelling

	Potency Factor(g/kg)							K	RMS
	Bare	Urban	Rural	Field	Paddy	Grass	Wood		
veri-1	20.0	0.001	45.0	40.0	40.0	55.0	1.0	25.0	0.054
veri-3	30.0	0.001	50.0	50.0	45.0	60.0	0.5	25.0	0.052
veri-3	30.0	0.001	50.0	55.0	50.0	55.0	3.0	25.0	0.003
veri-4	30.0	0.001	50.0	60.0	60.0	60.0	10.0	30.0	0.061
veri-5[1]	30.0	0.001	50.0	60.0	60.0	60.0	20.0	27.0	0.212

1) selected parameter values

점오염원의 발생량이 5배 이상 많았다. 그러나 BOD의 경우에는 도시유역인 제 3 유역과 자연유역인 제 2 유역이 0.0~6.6mg/l로서 거의 유사한 특성을 보이고 있었다. 수질모형에 있어서 중요한 매개변수로 선택한 Potency Factor(g/kg)와 유출률 k(/hr)의 값에 대한 검증을 한 결과는 (표 4-15), (그림 4-12), (그림 4-13)과 같다. BOD모형에서는 유출률 K 값이 3.7이고 Potency Factor의 값이 나지는 2.0, 도시는 1.75, 취락지는 10.0, 경작지는 45.0~47.0, 초지는 35.0, 수림지는 26.0일 때 RMS 값이 최소로 나타났다. 그리고 PO_4-P의 경우는 나지가 30.0, 도시가 0.001, 취락지 및 경작지가 50.0~55.0, 수림지가 3.0이고 유출률 K의 값이 25일 때 RMS 값이 최소로 나타났다.

4.5. 토지이용 대안의 작용

4.5.1 토지이용 대안의 유형

이상과 같이 토지이용특성에 따른 수량, 침식량과 수질농도의 특성에 대해 분석하였고 모형을 수립하였다. 이러한 모형을 환경관리의 수단으로 사용하기 위해서는 현재의 상태를 설명하고 이에 따른 관리방안을 제시하는 것 뿐 아니라, 장래에 유역내 토지이용상태가 변화함에 따라 그 결과로서 어느 정도 수자원적 특성에 영향을 미치는가를 예측할 필요가 있다. 아울러 과거의 토지이용상태를 입력하여 과거의 수자원적 특성을 파악하는 데도 유용하게 사용될 수 있다. 따라서 이 연구에서는 현재의 상태를 대안의 제 1 유형으로 보고 이 유역내의 과거, 개발되기 이전의 상태를 제 2 유형으로, 앞으로 이 공원유역내의 농경지가

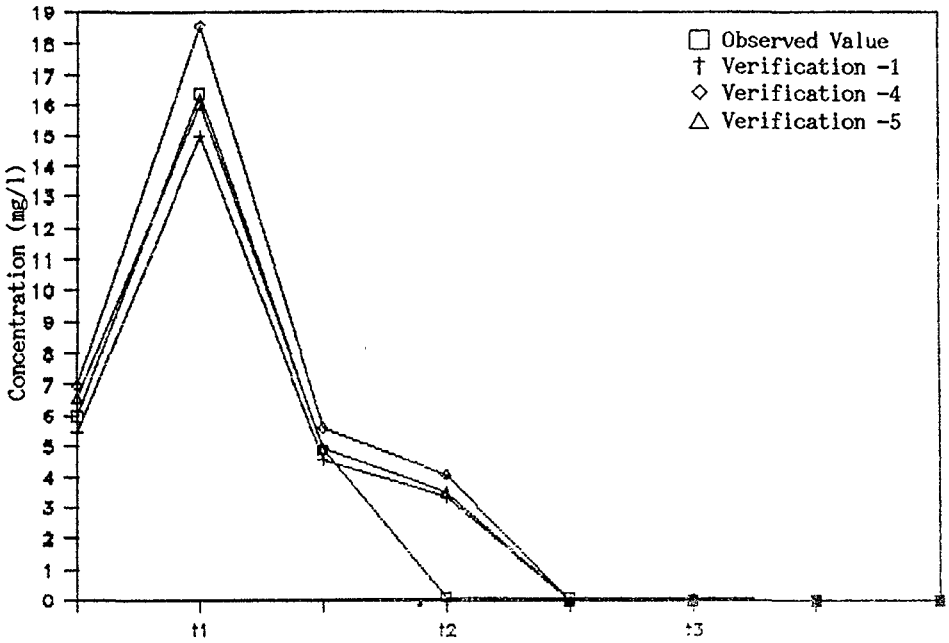


Fig. 4-12. Verification of BOD

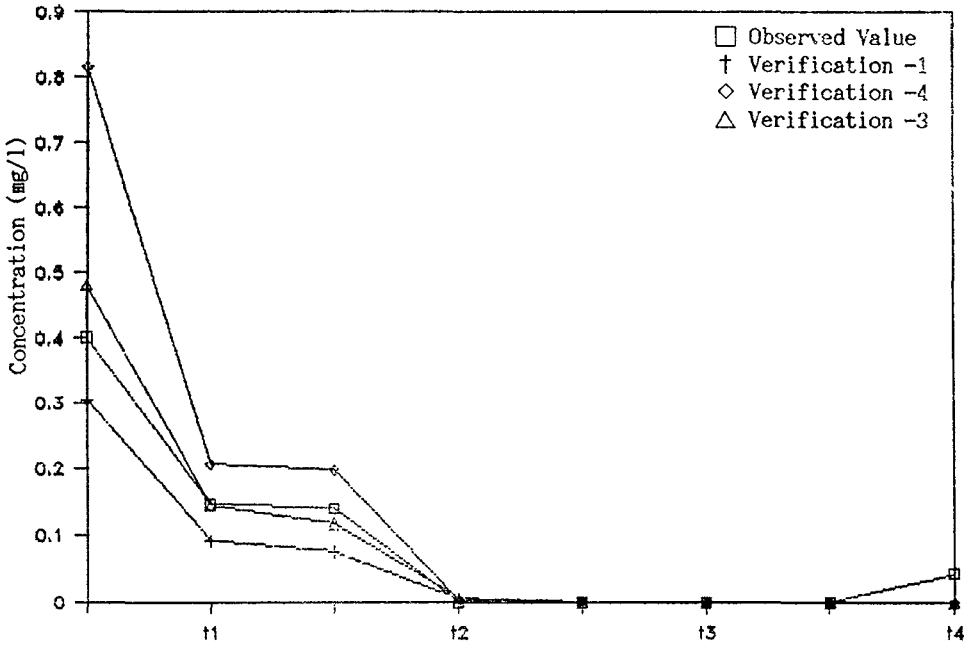
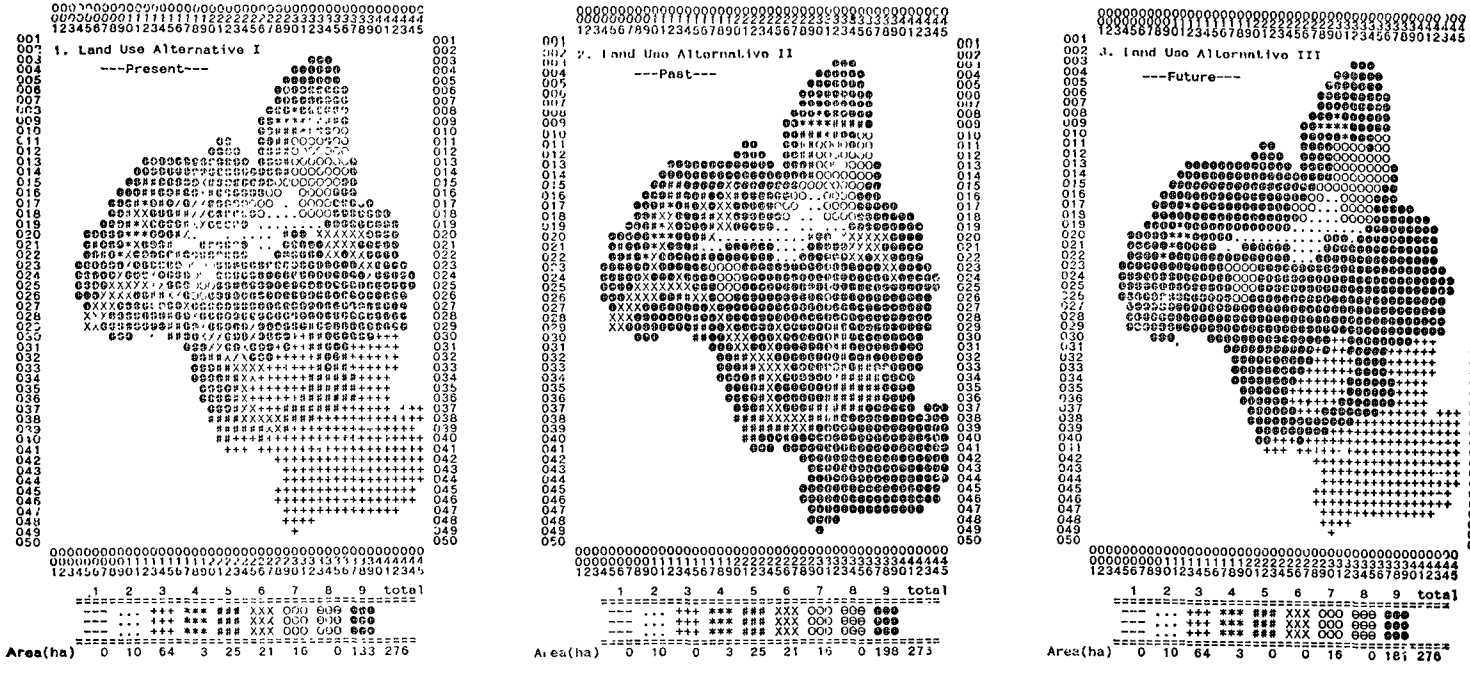


Fig. 4-13. Verification of PO_4-P



Legend

- No.2 Bare Land
- No.3 Urban
- No.4 Rural Residence
- No.5 Field
- No.6 Paddy
- No.7 Grass
- No.9 Forest

Fig. 4-14. Land Use Alternatives

수림지로 조성되고, 수림상태가 양호한 상태로 될 경우를 가정하여 대안의 제 3 유형으로 설정하려고 한다. 대안의 2 유형의 경우는 현재 도시유역이 모두 산림지였다고 가정하였다. 강우특성은 1988년 7월 15일의 강우량 자료를 이용하고자 한다.

4.5.2. 토지이용대안에 따른 자료의 변형

1. 대안 제 2 유형

대안 제 2 유형은 과거 상태를 재현한 경우로서 총 녹지면적은 197.3ha이다. 이 대안에서는 토지이용상 도시지역인 경우 (ILAND(i)=6)를 산림지 토지이용(ILAND(i)=1)으로 변경하였다. 그리고 토양 특성은 도시지역인 경우(ISOil(i)=99)를 제척지로 처리하지 않고, 자갈양토($IM_4(i)$=3)로 변경하였다. 왜냐하면 침투력이 아주 양호한 상태를 가정하기 위해서이다. 임상의 상태는 도시지역을 혼효림의 3영급상태로 가정하여 $iM6(i)$=9의 값을 부여하였다.

이상과 같은 대안을 현재 덕진공원상류의 6지구가 개발되기 전 소나무림으로 되어 있었다는 가정하에 설정하였으며, 녹지면적이 132.5ha에 197.3ha로 약 65ha의 녹지의 증가를 가정하였으며, 녹지율은 전체 유역면적에 대해 48%에서 72%로 증가한 상태이다.

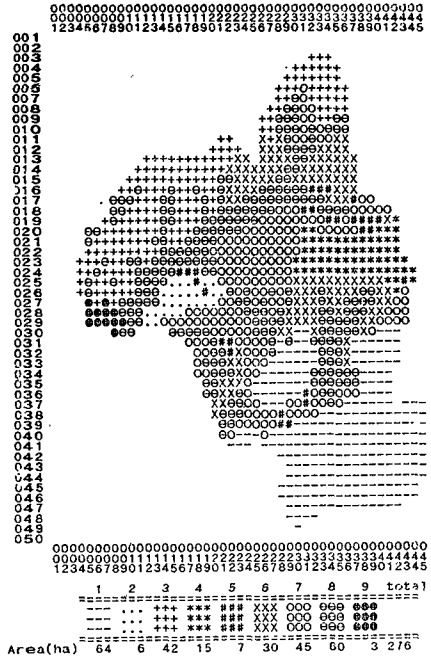
2. 대안 제 3 유형

대안 제 3 유형은 공원의 녹화에 따른 영향을 예측하기 위한 것으로서 녹지면적은 171ha이며 토지이용상 논과 밭지역 (ILAND(i)=3과 4)을 임목지($IM2$=9)로 값을 부여하였다. 그리고 모든 산림지를 혼효림 3 영급 상태로 부여하였으며, 전체적으로 토양의 침투력이 사양토와 같은 1.0(mm/hr)로 가정하였다. 이 대안의 경우는 현재의 도시유역은 현재와 같은 상태로 계속 있으나, 공원 내부의 농경지를 수림지로 조성하고, 산림과 초지를 잘 관리한 상황을 가정한 것이다. 이 대안의 경우는 녹지면적이 171ha로서 62%가 증가된 것으로 가정하였다. 이상과 같이 재현, 과거와 미래에 대한 녹지 상태에 대한 토지이용, 토양 및 임상은 각각 (그림 4-14), (그림 4-15)와 (그림 4-16)에 나타나 있다.

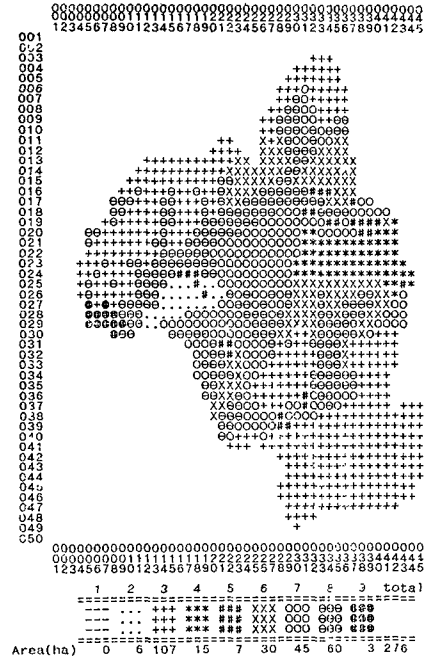
4.5.3. 토지이용대안의 적용 결과 및 고찰

1. 유출모형의 적용

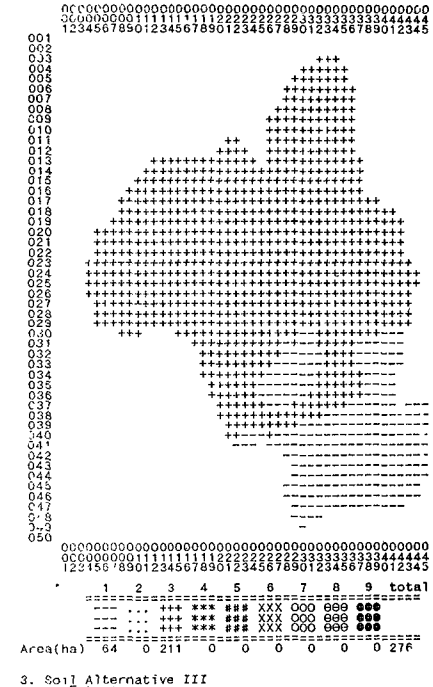
유출량의 경우 (그림 4-17)과 같이 녹지가 조성되면서 첨두유량이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 즉 제 1 유역의 8 : 00~9 : 00 사이의 경우 예를 들어보면 현재가 3.128(m^3/sec)인데, 과거의 대안인 경우(현재의 주거지역이 산림지역이었을 경우) 1.613(m^3/sec), 미래의 대안인 경우는 1.660(m^3/sec)로 나타나고 있는 바 약 1/2 정도로 유출량이 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 수림지의 토양조건이 좋아지고 침투량이 늘어남에 따라 지표면 유출량이 감소되기 때문이다. 이러한 효과는 제 2 유역에서 더욱 확실하게 나타나는 바 장래 공원 유역의 농경지 등이 수림으로 조성될 경우 현재 1.006(m^3/sec)하던 것이 장래 0.068(m^3/sec)로서 감소되게 된다. 한편 제 3 유역의 경우는 각각 2.733(m^3/sec), 0.875(m_6/sec), 2.281



1. Soil Alternative I
---Present---



2. Soil Alternative II
---Past---



3. Soil Alternative III
---Future---

Legend----------

- No.1 Urban
- No.2 G-Loam,sev.-sed
- No.3 G-Loam
- No.4 S-Loam
- No.5 S-Loam,no -sed
- No.6 Loam,sev.-sed
- No.7 Loam
- No.8 Loam,no-sed
- No.9 F-Loam,no-sed

Fig. 4-15. Soil Characteristics for Each and Use Alternatives

Legend----------
No.2 MO,HO,CO
No.3 C1-II2,C3-V2
No.5 M1-II2
No.7 C1-II3,C2-IV3,C3-V3
No.8 M1-II3,H1-II3
No.9 M1-IV3

Fig. 4-16. Forest Characteristics for Each Land Use Alternatives

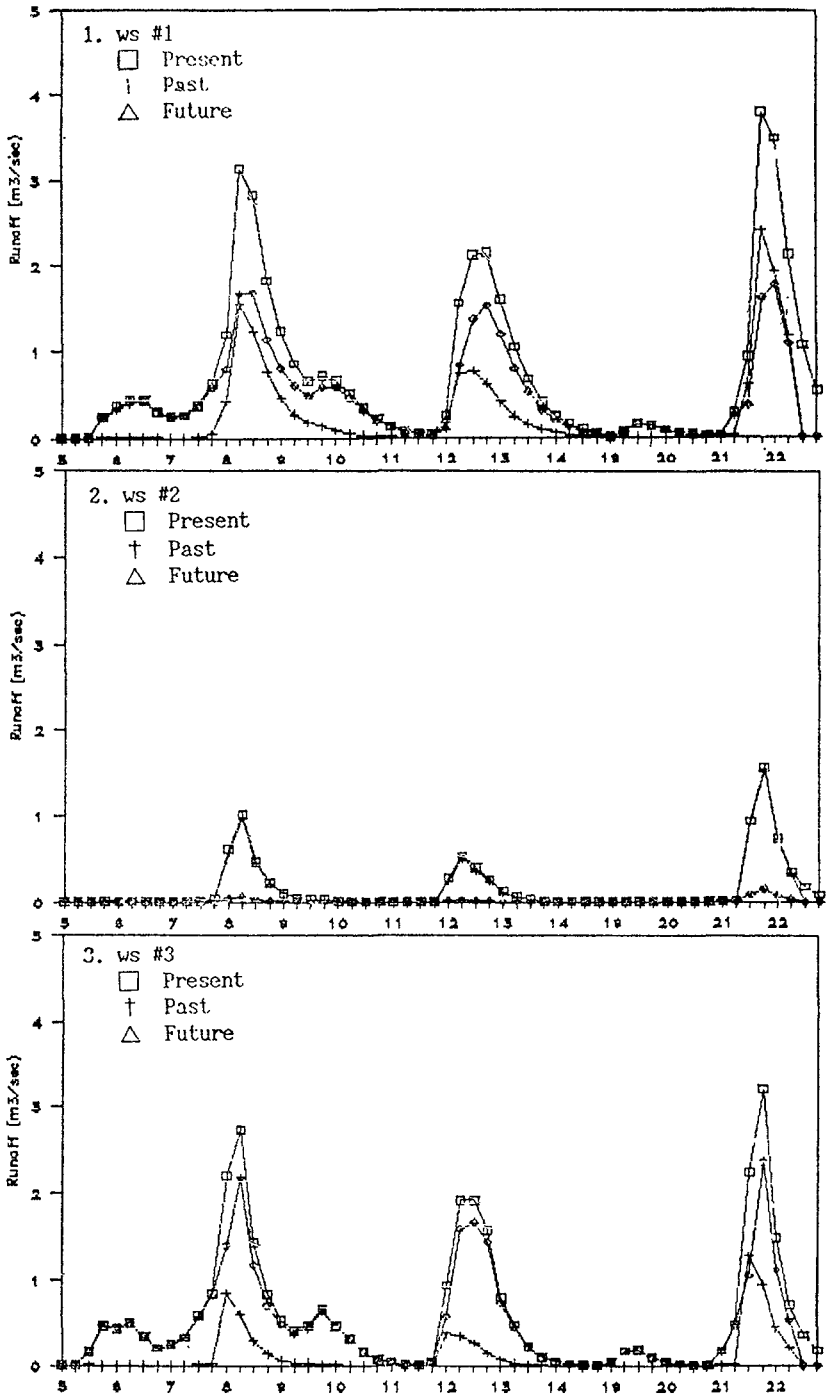


Fig. 4-17. Alternative Analysis of Runoff (89.7.15)

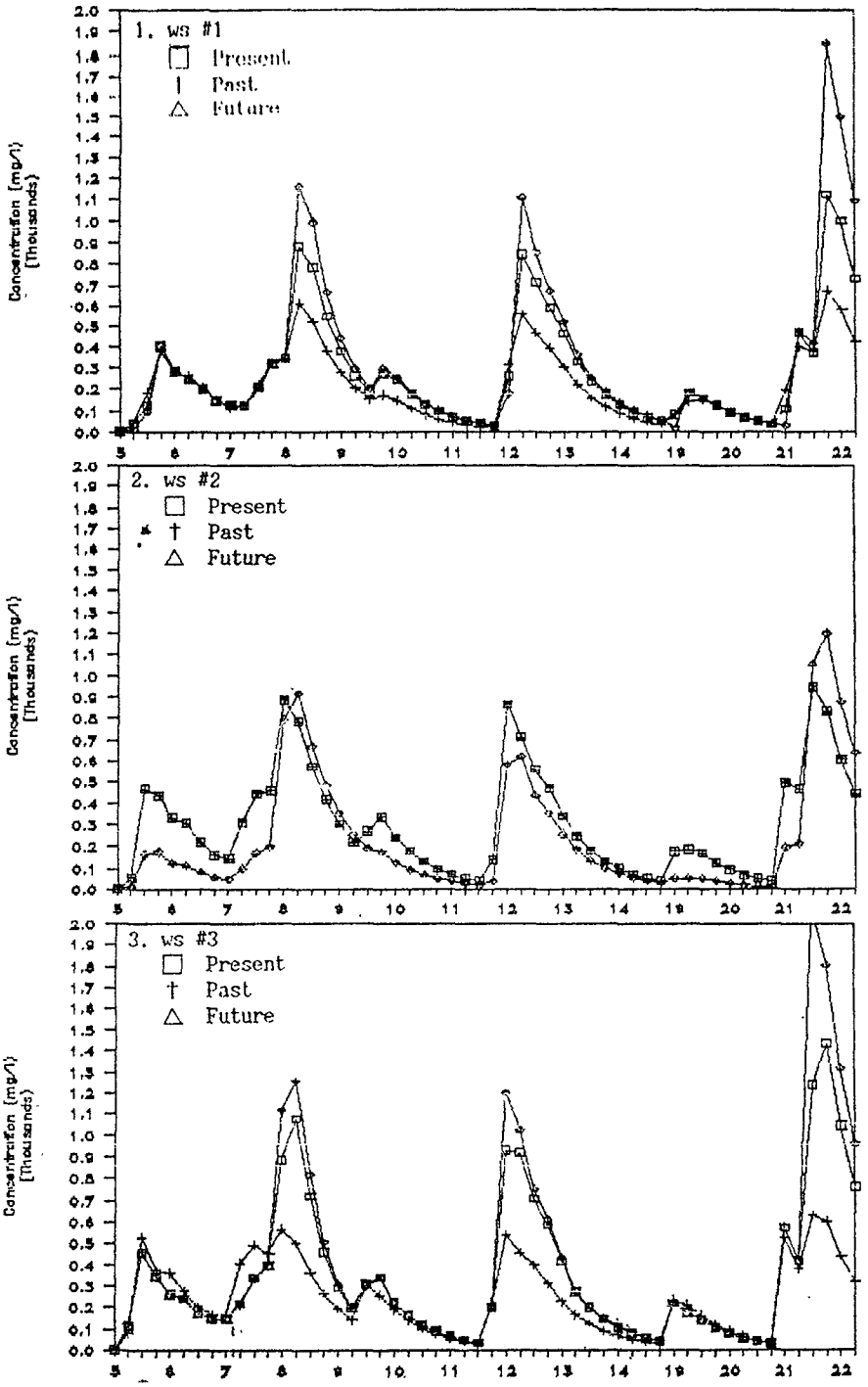


Fig. 4-18. Alternative Analysis of Sediment (89.7.15)

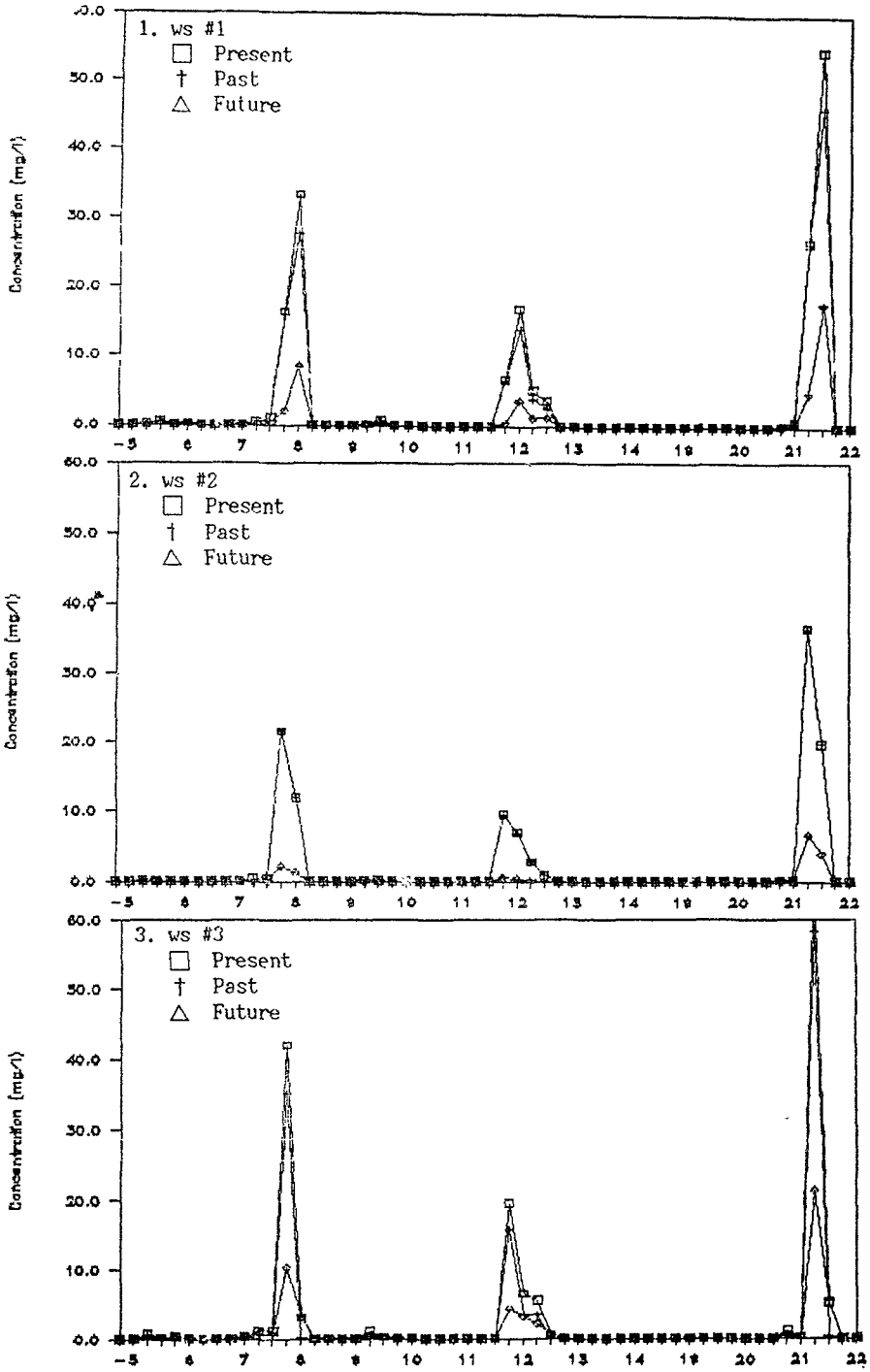


Fig. 4-19. Alternative Analysis of BOD (89.7.15)

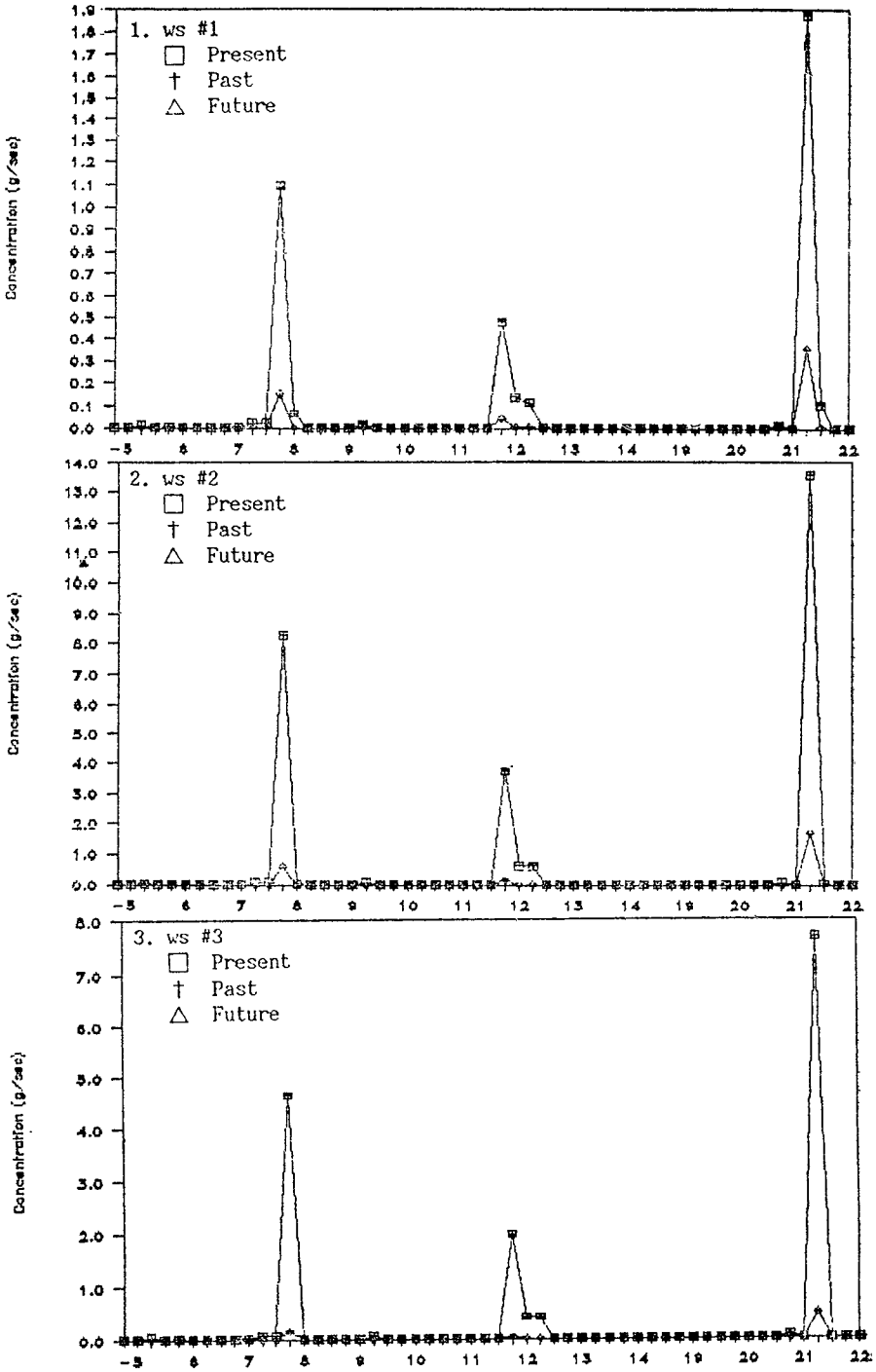


Fig. 4-20. Alternative Analysis of PO_4-P (89.7.15)

(m^3/sec)로서 과거와 같이 현재의 주거지가 수림지였을 때의 효과 (65ha의 녹지효과)는, 장래 그 주변의 토양 침투력을 좋게 하고 기존의 수림상태를 잘 유지하는 것 보다도 더 큰 효과를 볼 수 있다는 것을 알 수 있다.

2. 침식모형의 적용

침식모형을 적용한 결과는 (그림 4-18)에 나타나 있다.

이 결과를 제 3 유역에서 먼저 고찰해 보면, 과거의 대안에서 현재의 도시지역이 산림지였을 때가 500mg/l인데 현재나 장래상황에서는 1,000mg/l로서 나타나고 있다. 이 결과를 고찰해 보면 자연지역의 도시로의 개발로 인한 비점오염원적 효과는 매우 커서 장래의 경우와 같이 아무리 녹지조성을 잘한다 할지라도 침식량은 감소되지 않는 결과를 보이고 있다. 이러한 특성은 제 2 유역에 있어서의 결과와 같이 녹지가 잘 발달되고 토양조건이 좋아진다고 해도 현재나 큰 차이가 없이 약 800mg/l를 나타내는 데서도 알 수 있다. 주거지로의 개발에 따른 침식량의 증가효과는 녹지가 조성되더라도 전체적으로 침식량이 많아지는 결과를 보이고 있다. 결국 소유역의 단기 강우에 의한 침식효과를 보면 녹지조성이나 토양만으로의 감소효과는 보기 어렵고 도시에서의 비점오염원적 고형물의 효과가 높은 것으로 판단된다.

3. 수질모형의 적용

수질모형을 적용한 결과는 (그림 4-19)과 (그림 4-20)에 나타나 있다. BOD나 PO_4-P나 모두 녹지가 조성됨에 따라 오염농도가 감소되는 경향을 보이고 있다. 즉 이러한 감소 효과는 농경지가 녹지로 조성되면서 나타나는 결과로서 판단된다. 즉 제 3 유역의 결과를 보면 농경지가 녹지로 조성되는 제 3 대안의 경우 BOD는 10.0mg/l, PO_4-P는 0.1mg/l인데 반해 과거의 대안이나 현재의 경우는 각각 40.0mg/l, 4.8mg/l로서 나타났다. 이러한 경향은 제 2 유역에서도 나타나고 있는 데 BOD의 경우 현재나 과거 모두 20.3mg/l인데 장래의 경우 3.0mg/l로서 약 1/6의 감소효과를 나타내고 있다.

이러한 오염물질의 감소효과는 제 1 유역 하류에서 종합되어 나타나는 바 BOD의 경우 현재는 30.3mg/l, 과거가 29.3mg/l이고 장래가 10.0mg/l로서 나타나고 이는 도시지역이 산림지였을 경우도 오염물질농도에 있어서 약간의 감소 효과는 있으나 결정적으로 영향을 미치는 것은 농경지가 산림지로 조성되고 토양조건이 좋아지기 때문으로서 약 1/3의 감소효과를 볼 수가 있는 것이다.

제 5 장 결 론

이 연구에서는 종합적 수질예측모형을 개발하기 위해서 1980년 미국 환경청에서 개발된 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형에서 기본 원리를 도출하였다. 이

HSPF모형은 종합적 수질예측모형으로 개발되기는 하였으나 그 프로그램이 지나치게 방대하여 이용상 문제가 있고, 소유역특성을 반영하기 어려운 구조로 되어 있다. 따라서 이 연구에서는 소유역 특성을 잘 반영할 수 있고, 개인용 전산기로도 운영이 가능한 모형을 개발하고자 하였다. 그리고 토지이용특성의 입력방법도 국지적 수문환경특성을 잘 반영할 수 있는 분포형모형의 입력방식인 단위격자에 의한 방법을 사용하였다.

모형검증 및 대안제시를 위한 연구대상지로는 전주시 덕진공원내의 연화천유역(하천연장 1.8km, 면적 280ha)으로 설정하였다. 이 대상지는 토지이용특성으로서 산림지 및 초지가 주가 되고 있으며 한쪽 지류의 상류에는 대학 캠퍼스와 주거지가 입지되어 있다.

이 연구에서는 수질요소로서 PO_4-P와 BOD를 대상으로 하여 단기 수질모형을 수립하고 의사화하였으며, 이를 유출모형 및 침식모형과 연계시키고자 하였다. 유출모형에서는 유역추적방식으로서 Chezy-Manning식을 사용하였으며 침식모형에서는 Meyer와 Wischmeir가 제안했던 USLE방식이 사용되었으며, 수질모형에서는 KN비에 의한 부하모형을 이용하였다. 의사화 시간단위는 단기침식모형에서의 최대 수치인 5분을 기본 단위로 하였다. 장기 수질예측에서는 1년을 단위로 하여 시도하였다.

수립된 모형에 적용한 매개변수의 값은 기존의 자료에서 제시되고 있는 범위에서 검증을 통해 현장자료에 가장 가까운 값을 선택하여 사용하였다. 이 결과, 전체를 대표하는 제 1 측점에서는 1~5%의 오차를 보이고 있었으나 제 3 측점인 경우에는 40% 정도까지의 오차를, 침식모형인 경우는 30%까지, 수질모형은 60%까지 오차가 나타났다.

유역 토지이용 대안으로서는 현재의 상태를 제 1 대안으로, 제 2 대안은 도시지역이 수림지였을 경우 (녹지증가율 24%), 제 3 대안은 공원내 농경지가 수림지로 조성되고 (녹지증가율 14%), 자연토지의 침투력이 사양토로서 2.54cm/hr로 증가되면서 기존의 수림지가 30년생이상, 70% 정도의 울폐도를 보이는 경우로 하였다.

유역토지이용대안에 모형을 적용한 결과, 유출량에 있어서는 녹지조성으로 인한 유출량 감소효과는 대단히 커서, 도시로 개발된 현재가 3.0m^3/sec이나 수림지조성으로 인한 제 3 대안의 경우에는 0.9m^3/sec로서 거의 1/3 수준 밖에는 되지 않았다. 그리고 침식량 감소효과는 녹지조성이나 토양 침투력 증가 만으로는 나타나지 않았으나, 주거지 개발로 인한 고형물의 증가효과는 매우 높은 것으로 나타났다. 즉 현재의 도시지역이 산림지였을 경우, BOD는 500mg/l이고 장래 녹지가 잘 조성되는 경우 1,000mg/l로서 약 2배의 증가 추세를 보이고 있었다. 그리고 PO_4-P의 경우도 녹지조성에 따라 1/3의 감소 추세를 보이고 있었다.

이상과 같은 분석을 통해서 볼 때, 유역관리에 있어서의 하류에서의 단기 집중유출량 및 오염물질의 감소를 위해서는 녹지를 조성하고, 토양 조건을 개선하는데 힘을 기울여야 할 것이다. 또한 농경지에서의 농약이나 비료에 의한 비점오염원의 영향을 최소화할 수 있는 방안이 연구되어야 할 것이다. 그리고 침식량의 감소를 위해서는 토양에 있어서의 경사조

건 및 토양보존인자를 동시에 고려해야 할 것이다. 이러한 결론을 다소 큰 유역에 적용해 보면, 하천을 공공공지 또는 하천공원으로서 사용하기 위해서는 그 하천 유역의 토지이용을 오염원이라는 개념에서 파악하여 규제하고 제한해야 할 것이다.

이 연구에서 수립된 소유역을 대상으로 한 종합적 모형은 개발 및 보전에 따른 수량, 침식량, 수질에의 영향을 예측하는 수단으로 사용될 수 있을 것이다. 이러한 예측을 바탕으로 유역을 조성하고 관리하는 지침을 수립할 수 있을 것이다.

한편 이 연구가 갖는 한계를 극복하기 위해 추후 연구되어야 하고, 보완되어야 할 과제는 다음과 같다.

첫째는 여러 생태현상에 대한 정확한 모의화를 위해서는 무엇보다도 이를 뒷받침할 수 있는 연속적인 자료가 조사되고 분석되어야 할 것이다. 이를 위해서는 생태요소시험유역 등이 설치되어야 할 것이다. 둘째는 소유역등을 대상으로 한 매개변수에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다. 즉 토양 침투력 매개변수, 침식이동율 변수, 오염부하비 등 유량, 침식량, 수질에 결정적으로 영향을 미치는 변수에 대한 연구가 활발하게 이루어져야 할 것이다. 세째는 종합적 모형의 정밀성, 연계성 및 적용성을 함께 높일 수 있는 이론을 개발하고 적용해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Barnwell, T.O., Jr., and R.C. Johanson(1981) *HSPF: A Comprehensive Package for Simulation of Watershed Hydrology and Water Quality In: Nonpoint Control: Tools and Techiques for the Future. Interstate Commission on the Potomac River Basin*, Rockville, ME, 136-138, 145-147, 147-151.
2. Borman, F.H. (1981) *Pattern and Process in a Forested Ecosystem Disturbance development and the Steady State Based on the Hubbard Brook Ecosystem study*, New York: Spring-Belig, 33-39.
3. Bowie, G.L., et al. (1985) *Rates, Constants and Kinetic Formulation in Surface Water Quality Modelling*, U.S.E.P.A. 60013-85/40.
4. Braat, L.C. and Van Lierop Wal, F.J. (1987) *Economic-Ecological Modelling*, New York: Elsevier Science Publishers Inc., 37-39.
5. Brown, G.E. (1980) *Forestry and Water Quality*, OSE Book Store Inc., Oregon.
6. Chow, Ven Te (Ed. in chief) (1964) *Handbook of Applied Hydrology*-A Compendium of Water-resources Technology, Mcgraw-Hill Book Co., 25-16-25-177.
7. Crawford, N.H., A.S. Donigian Jr. (1973) *Transport and Runoff Model for Agricul-*

tural Land, EPA.

8. Crawford, N.H., R.K. Linsley (1966) *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*, Dept. of Civil Engineering Stanford University, 68, 161-176, 38, 43-46.
9. Dillon, P.J., et al. (1975) "The Effect of Geology and Land Use on the Expor of Phosphorous from Watershed," *J. of Wat,er Research*, Vol. 9, 135-148.
10. Donigian, A.S. Jr., Imhoff, J.C., Bicknell, B.R. and Kittle, J.L. (1684) *Application Guide for Hydrological Simulation Program-Fortran(HSPF)*, Athens, GA, EPA-90013-84-065, 5-137.
11. Donigian, A.S. Jr., et al. (1978) *User,s Manual for Agricultural Runoff Managemant (ARM) Model*, EPA, 54, 61, 70, 65-75.
12. Donigian, A.S. Jr., et al. (1977) *Simulation of Nutrient Loadings in Surface Runoff with the NPS Model*, EPA.
13. Franson, M.A., et al. (1981) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, 415-416.
14. Grower, A.M. (1980) *Water Qality in Catchment Ecosystems*, Chichester: John Wiley & Sons.
15. Kenneth, H.R. (1979) "Uncertainty Analysis Applied to Vollenweider's Phosphorus Loading Criterion," *J. of WPCF*, Vol. 51(8):2123-2128.
16. Haan, C.T. (1977) *Statistical Methods in Hydrology*, Iowa State University Press, 180-194.
17. Hann, C.T., Johnson, H.P. and Brakensiek, D.L. (1982) *Hydroligic Modelling of Small Watersheds*, ASAE Monograph No. 5, 13, 14, 6-12, 413-427, 80.
18. Hewelet, J.D. (1982) *Principles of Forest Hydrology*, Athens: the Univ. of Georgia, 2-13.
19. Huillet, T. and Lauge, J. (1985) "A Soil-Plant-Water Model with a Case Study in a Forested Catchment," *Ecological Modelling*, 27:235-250.
20. Johnson, P.C. (1980) *User's Manual for Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)*, Athens: EPA, 9-13, 134-31.
21. Jones, E.B. and Ward, T.J. (1985) *Watershed Management in the Eighties*, ASCE, N.Y., 1-2.
22. Jorgensen, S.E. (1986) *Fundamentals of Ecological Modelling*, Amsterdam: Elsevier, 321-327, 15-19, 19-23.

23. Lee, A.M. (1980) *An Approach to Water Resources Evaluation of Non-Point Silvicultural Sources (A Prosedure Hand Book)*, Athen: Georgia, EPA.

24. Lee, Dowon (1987) *Simulation of Phosphorus Transport in Vegetative Filter Strips*, Dissertation for Doctor of Philosophy in Environmental Science and Engineering, Verginia Polytechnic Institute and State University.

25. Lee, D., et al. (1988) "Modelling Phosphorous Transport in Grass Buffer Strips," *J. of Environmental Engineering*, 115(2), 409-427.

26. Mccuen, R.H. (1982) *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*, New Jersey: Rentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.

27. McElroy, A.D., Etal (1976) *Loading Functions for Assessement of Water Pollution from Non-point sources*, US EPA, EPA/600/2-76/151, 5-25.

28. Metcalf & Eddy Inc., et al. (1971) *Storm Water Management Model*, EPA.

29. Morrison, J.B., et al. (1981) *Env'tal Impact of Land Use on Water Quality: Final Report on the Black Creek Project-Phase 2*, EPA-905/9-81-003.

30. Novotony, V. and G. Chesters (1981) *Hand Book of Non-Point Pollution*, New York: Van Nostrand Reinhold.

31. Novotony, V., et al. (1978) "Mathematical Modelling of Land Runoff Contaminated by Phoshorous," *J. of WPCF*, 50(1):101-112.

32. Novotony, V., et al. (1985) "Estimation Non-point Pollution from Small Urban Watersheds," *J. of WPCF*, 57(47):339-348.

33. Odum P.E. (1979) *Fundamentals of Ecology (3rd ed.)*, Philadelphia: W.B. Saunders Co., 279-280, 280-283, 285-287.

34. Odum, H.T. (1982) *Systems Ecology*, New York: John Wiley & Sons, 4, 17-18.

35. Ortolano L. (1984) *Environmental Planning and Decision Making*. John wiley & Sons, 410.

36. Sartor, J.D,, et al (1974) "Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants," *J. of WPCF*, 46;458-467.

37. Scheab, G.O., Etal (1986) *Soil and Water Conservation Engineering (3rd Ed.)* John Wiley & Sons. Inc., 241.

38. Smith, R.L. (1980) *Ecology and Field Biology(3rd ed.)*, New York: Harper & Row Publishers, 7-8, 6-7.

39. Shagart, H.H. and O'well, R.V. (1979) *Systems Ecology*, Pennsylvania: Dowden Hutchinson and Ross Inc., 1-6, 7-9, 67-75, 79-81.

40. Stewart, et al.(1975) *Control of Water Pollution from Cropland*, U.S. EPA-ORD and USDA-ARS, EPA-6000/2-75-026a, ARS-4-5-1, 188.

41. U.S. EPA (1977) *Planning Methodologies for Analysis of Land Use/Water Quality Relationships*, EPA, 440-/3-77/025.

42. Wanielista M.P., et al. (1977) "Non-pount Source Effects on Water Quality," *J. of WPCF*, 441-451.

43. Wischmeir, W.H., L.B. Johnon, and B.V. Cross (1971) "A soil Loss Equation's Nomograph for Farmland and Construction Sites," *J. Soil Water Cons.* 26(5):189-193.

44. Wischmeir, W.H. (1975) *Estimating the Soil Loss Equation's Cover and Management Factor for Undisturbed Areas: 118-124. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultual Research Service, AR S-S-40.

45. Zison, S.Y. (1980) *Sediment-Pollutant Relationships in Runoff from Selected Agricultural, Suburban and Urban Watersheds-A Statistical Correlation Study*, EPA-600/3-80-022, Athens, GA.

46. 강 영(1985)「소유역에서 유출량 산정을 위한 유역수문모형의 개발」, 서울대학교 대학원 석사학위논문

47. 고덕구(1989)「소유역의 장기유출예측을 위한 모의 발생수문모형의 개발」, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 3-9, 33-35.

48. 구본경(1988)「유역내 토지이용상태가 수질에 미치는 영향에 관한 연구」, 서울대학교 환경대학원

49. 권순국, 고덕구(1987) "산림유역에 대한 USDAHL-74 유역 수문 모형의 장기유출 해석 적용", 「한국농공학회지」, 29(2):53-63.

50. 김병진, 박승우(1988) "수문모형 ANSWERS의 반월유역에의 적용" 「한국농공학회지」, 30(1):81-90.

51. 박태식 외(1981)「입업경영학」, 향문사, 285-286.

52. 선우중호(1983), 「수문학」, 동명사

53. 신계성, 신용화(1980) "토양보존인자가 토양유실에 미치는 영향", 「농사시험연구보고」, 제22집(퇴비, 작보, 균이편), 36-41.

54. 오두영(1986)「소양강 다목적○ 유역내 삼림의 이수효과추정」, 고려대학교 박사학위논문

55. 유택규(1986)「삼림에 있어서 물 수지에 관한 시험연구」, 강원대학교 박사학위논문

56. 윤용남(1988)「공업수문학」, 청문각, 서울, 329-419, 409-413.

57. 이기춘, 박승우, 최진규(1989) "도시 소유역의 유출변화분석", 「한국농공학회지」, 31

(1):45-57.

58. 최진규 외(1989) "연화천유역의 유출해석을 위한 수문학적 기초연구", 「전북대학교 농대 논문집」 (19):193-205.
59. 이명우(1982) 「환경조경계획에 있어서 전산기를 활용한 적지분석기법에 관한 연구」, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 62-63.
60. 이명우(1986) "호수생태계에 있어서 수질특성 및 부영양화 현상에 관한 연구—공원 및 유원지 인공호수를 대상으로—", 「환경연구」 (7):177-210.
61. 이명우, 최진규, 정재철(1989) "공공옥외공간의 계획 및 설계를 위한 환경조사 및 분석에 관한 기초연구 —전주시 덕진공원을 사례로—", 「전북대학교 농대논문집」, (19):42-50.
62. 임봉수 외(1984) "도시와 농촌에서의 비점원 오염물 배출양상에 관한 연구", 「대한토목학회논문집」 4(2):45-54.
63. 입업연구원(1980~1988) 「시험연구보고서」
64. 정필균, 고문환, 임정남, 엄기태, 최대웅(1983) "토양 유실량 예측을 위한 강수인자의 분석", 「한국토양학회지」, 16(2):112-118.
65. 정필균, 고문환, 엄기태(1985) "토양 유실량 예측을 위한 작촌인자 검토", 「한국토양학회지」, 18(1):7-13.
66. 조국궁, 박성우(1981) "경사지에서의 토양유실 —지형인자를 중심으로—", 「한국농공학회지」, 23(2):54-60.
67. 홍성구, 권순국(1989) "농경지로부터의 오염물질 유출부하특성 —전 Kjeldahl 질소 및 전인을 중심으로—", 「한국농공학회지」, 31(3):92-102.
68. 환경청(1983) 「한강유역 환경보전 종합계획사업」, 수질부분보고서 제1-3권
69. 환경청(1983) 「환경보전법」 99-100.