

〈講 座〉

降雨—流出模型

Stanford Watershed Model

(美國 國立 氣象廳 修正模型)

鮮 于 仲 皓*

Jungho Sonu

1. 서 론

降雨에 대한 流域의 反應을 알기 위하여 이를 數學的으로 表示하고 또한 이로부터 流出現象을 分析하고 자하는 技法으로서 전자계산기에 의한 模擬發生技法이 過去 20年동안 發展되었다. 이러한 기법은 계산속도가 빠르고 용량이 큰 Computer의 開發로 인하여 더욱 加速化되었다. 여기서는 주로 Crawford와 Linsley(1966)에 의하여 개발된 Stanford Watershed Model IV(SWM)에 대하여 說明하려 한다. 그리고, SWM은 유역시스템에 관한 Simulation 연구의 실질적인 모형으로서 광범위하게 이용되어왔다. 초기의 SWM이 단지 수문학적인 방법에 포함된 諸量의 크기를 다룬 반면, 이후의 모형은 유사는 물론 수질에 관한 것도 포함하고 있다.

SWM은 유역전체에 대한 수문학적 순환(Hydrologic Cycle)의 중요한 부분을 Simulation하는 Computer모형이고 Continuous-time 및 Lumped-parameter Simulation 모형으로 분류된다. 필요한 주요 入力資料는 강우, 증발 그리고 다양한 유역 및 수리학적 매개변수 등이다. 수문학적 순환의 모형화는 유역에서 차단(Intercception), 침투(Infiltration) 되는 강우로서 시작하고, 차단된 물의 일부는 대기로 증발산된다. 그리고, 침투수는 습윤 토양의 상부와 하부에 분포되어 저류된다. 상부저류는 지표수유출(Overland flow)과 복류수유출(Interflow)에 영향을 미치고, 하부저류는 장기간의 침투와 지하수저류를 조절하고 기지유출(Baseflow)

에 의하여 하천으로 흘러간다. 상부·하부 및 기지유출류 역시 대기로 증발산된다. 그리고, 지표수유출과 복류수유출 및 지하수유출은 합쳐서 총유출(Total Run-off)이 되고, 이러한 과정의 계산은 유역 또는 소유역의 수에 따라 수행된다. 이러한 模型化 方法으로서 모형의 조정(Calibration)과 適合化(Validation)는 각 유역에 대한 실제의 강우와 유량자료에 기초를 두고 시행한다.

최초의 SWM 모형이래, 수정된 모형과 다른 형태 모형들은 특별한 필요와 요구에 의하여 제안되어 이용되어왔다. 이 중에는 Lion(1970)에 의하여 개발된 Kentucky 대학의 Kentucky Watershed Model(KWM)이 있다. SWM과 TWM의 주된 차이는 후자가 美東部の 습윤한 지방의 典型으로서 Kentucky 지방의 지형과 기후를 적용한 사항이다. KWM 모형의 수정사항에는 계산효율과 출력자료의 개선에 관한 것이 나타나 있다.

SWM과 KWM의 주된 단점은 시행착오법 또는 판단기법에 의한 모형의 조정에 관한 *Pour-de-force* 방법이다. 이것은 여러 매개변수를 갖는 모형에서 특히 장애가 된다. 따라서, KWM의 代案으로서 Lion(1970)은 매개변수의 최적집합(OPSET)을 얻기 위한 최적화 기법을 이용하는 Kentucky self-calibration version(OPSET)을 개발하였다. 그가 기본적으로 사용한 방법은 저류능력, 침투율, 증발산율 등의 지수같은 매개변수들을 자동적으로 산정하는 대신에 실측유량과 계산유량을 이론적으로 接合시키는 것이다.

같은 시기에 Texas 대학 Claborn과 Moore(1970)는

* 서울대학교 土木工學科

SWM의 Texas 모형을 개발하였다. 이 모형에서의 중요한 변화는 SWM에서 시간간격을 15분으로 하는 반면, 보다 적은 5분을 사용하고 증발산, 침투 그리고 토양수의 이동등에 관한 부수적인 매개변수를 入力 사용하였다. 부수적인 조건으로서, 실측된 유량자료가 있는 경우에 TWM은 계산유량과 실측유량을 비교할 수 있는 통계적인 분석을 시행한다. 그러나 SWM, KWM 그리고 OPSET와는 달리 Snowmelt가 영향을 미치는 지역에 대해서는 적용할 수 없다.

SWM의 또다른 모형은 Ricca(1972)에 의하여 Ohio주립대학(OSU)에서 개발되었다. 이 OSU 모형은 유역의 습지로 들어오는 유량과 토질의 틈사이로 유입하는 유량의 지수를 포함하는 부가적인 입력매개변수들을 가지고 있다. 또한, 지층을 형성하고 있는 지질을 가진 지역에 대한 지하수 감쇠상수들을 SWM과 KWM에서는 하나의 값으로 처리하는 반면에 다수의 값을 갖는다. OSU 모형의 또다른 특성은 도달시간이 짧은 유역이 갖는 전형적인 시간증가 간격인 15분보다 적은 값을 사용하고, 유량추적을 할 수 있다는 것이다. 그리고, 결과분석을 용이하게 할 수 있도록 계산 및 실측 수문곡선을 그릴 수 있는 프로그램이 추가되어 있다.

美 국립기상청(NWS)에서 Anderson(1971)이 SWM의 NWS 모형을 개발하였는데, 이 모형에서는 각 유량구별 하도유입량, 증발산량과 土中 저류량을 계산할 수 있다. 그리고, 내달에 앞서 전체 배수망에 대하여 하도유입량을 추적하고 토양은 습윤 상태의 변화를 역시 산정한다. NWS는 SWM이 차단, 복류수유출 및 지하수에 대한 계산을 포함하는 것과 달리 단지 침투와 상부 및 하부 토층의 저류, 그리고 지표수유출만을 시간간격을 15분으로 계산한다. 그리고 증발산 가능량의 무작위 변동(Random fluctuation)을 줄이기 위하여 무작위 변수를 만드는 부 프로그램이 추가되어 있고, 하도추적에서의 평행이동과 저류효과를 유량에 따라 다양하게 결정하기 위하여 제약조건이 포함되어 있다. 또한, 출력에는 실측 및 계산유량에 대한 결과의 그림이 그려지게 되어 있다. 그러나, Snowmelt에 관한 것은 포함하지 않고 있다. 따라서, 상기에서 언급한 계산할 수 있는 사항에 대해서는 NWS모형에 의하여 산정할 수 있을 것이다. NWS 모형은 ALGOL로 되어 있는 SWM을 FORTRAN 코드로 바꾼 것이므로 原 模 型의 NWS 모형을 이해하여야만 함에도 불구하고 본 강좌의 후반부에서 SWM에 대한 설명으로 간단하게 설명할 수 있다. 다음 절에서는 모형의 구조와 구성요소의 간단한 설명과 함께 프로그램 입력 및 출력에 대한 정보와 모형의 조정에 관한 지침을 설명하고 입력

자료의 예와 Computer Run이 포함되고 SWM에 의한 적용과 경험지식에 대한 간단한 說明이 적혀있다.

2. 모형에 대한 설명

SWM의 NWS 모형은 실제적으로 Snowmelt에 관한 것을 제외하고는 Crawford와 Linsley(1966)에 의해 개발된 원래의 모형과 같다. 기본적으로 이 모형은 수문학적 순환의 다양한 구성요소에 대한 추상적인 개요이고, 이 구성요소들은 강우자료와 지형인자 및 증발산 등의 결과로서 결국 총유출로 진행하게 된다. SWM은 일반적으로 이러한 다양한 구성요소들의 상호작용과 수학적·함수적 관계를 나열한 것이다.

2.1 모형의 구조

그림 2.1은 SWM을 도표로 나타내고 있다. SWM의 모형 구조는 다음과 같은 연속방정식에 근거한다.

$$P = E + R + \Delta S \dots \dots \dots (2.1)$$

- 여기서 P: 강우량
- E: 증발산량
- R: 유출량
- ΔS : 유역의 총저류변화량(상부, 하부 및 지하수저류부)

式 2.1에서 강우량은 증발산량, 유출량 및 유역의 저류량과 균형을 이룬다.

그림 2.1에 나타난 바와 같이, 강우는 지표에 도달하기 전에 차단(interception)되기도 하고, 호수나 하천과 같은 불투수 지역에 도달하기도 하며, 지표에 도달하여 침투된 후 결국 지표수 유출(surface runoff) 또는 복류수 유출(interflow)을 형성하기도 한다. 지표수 유출과 복류수 유출은 상부 저류(upper zone storage)에 기여하여 결국 하천의 유입량으로 된다. 침투된 물과 상부에 저류된 물의 일부는 活動的(active)이거나, 非活動的(inactive)인 지하수 저류로서 하부 저류부로 침투(percolation)된다. 活動的인 지하수 저류부의 물은 후에 하천의 기저유량으로 나타난다. 지표수와 복류수 및 기저유출량을 조합하면 총유출량이 된다. 마찬가지로 증발산에 의한 손실은 차단저류부(interception storage), 상부저류부, 하부저류부 및 活動的인 지하수 저류부에서 일어난다. 위의 각 저류부에서의 증발산량을 합하면 전체 증발산량이 된다.

2.2 모형의 구성 요소

다음 몇 개의 小節에서는 유역 유출 모형을 이루는 각 요소들에 대하여 간단히 설명하기로 한다. 더 상세한 설명은 Crawford와 Linsley(1966) 및 Viessman等(1975)의 저서에서 찾아볼 수 있다.

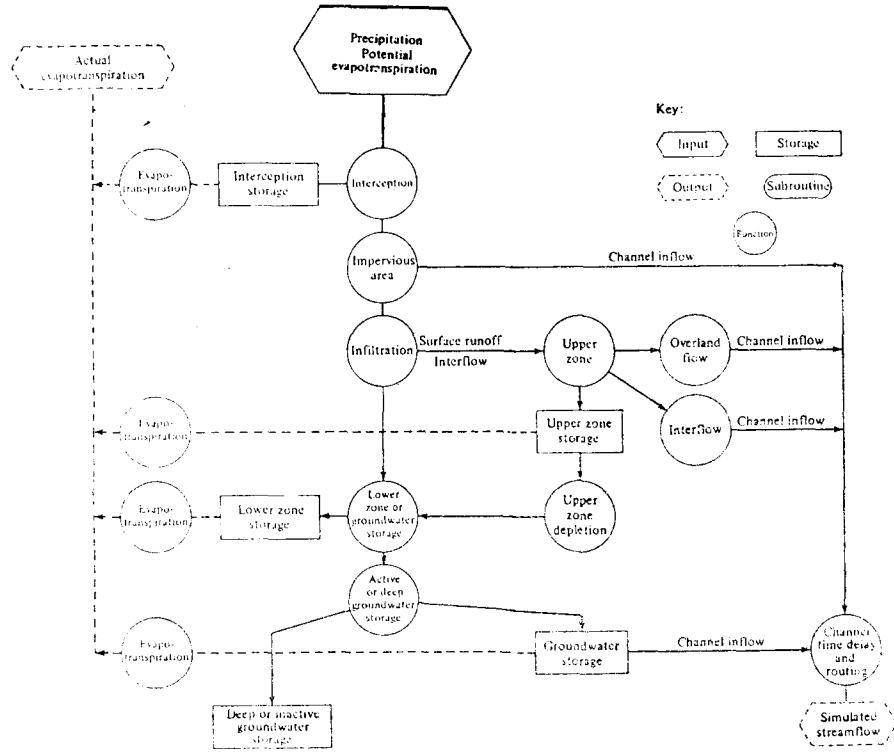


그림 2.1 Schematic Representation of the Stanford Watershed Model (after Crawford and Linsley, 1966)

차단(Interception)

차단은 강우 강도가 차단률(interception rate)을 넘지 않거나, 차단 저류부가 가득차 있지 않을 경우에, 유역에 내리는 강우에 차단이 일어난다는 것을 전제로 한다. 入力 변수 EPXM은 주어진, 유역의 차단률을 나타낸다. 표 2.1은 땅을 덮고 있는 식물의 상태에 따른 최대 차단률 값을 나타내고 있다.

표 2.1 Typical maximum interception rate (Crawford and Linsley, 1966)

Watershed cover	EPXM(in/hr.)
Grassland	0.10
Moderate forest cover	0.15
Heavy forest cover	0.20

차단 저류부의 물 中 일부는 현재의 증발률하에서 일어나리라 생각되는 증발에 의해서 없어진다.

불투수 지역(Impervious Area)

호수의 표면이나 河道(channel)에 인접하거나 연결되어 있는 河川(stream)과 같은 불투수 지역에 내린

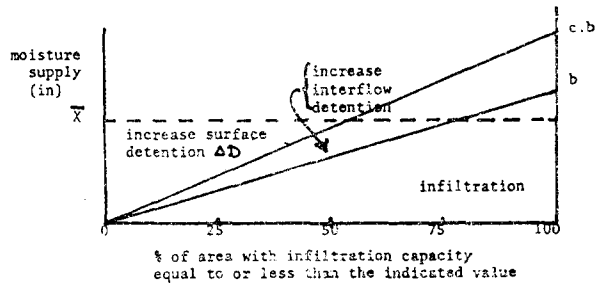


그림 2.2 Intiltration Capacity Over a Watershed (Crawford and Linsley, 1966)

강우는 직접 표면 유출에 기여한다. 이 지역에서도 역시 증발이 일어난다. 入力 변수 IMPV는 유역내의 불투수 지역의 면적비를 나타낸다.

침투(Infiltration)

어떤 시간대의 침투는 서로 연결된 두 가지 과정으로 나눌 수 있다. 하나는 흡속으로의 직접 침투(direct infiltration)로 이는 하부 저류부와 지하수 저류부 도달하게 된다. 다른 하나는 지체 침투(delayed infiltration)로서 이는 흙의 상부에서 일어나 표면 유출과

표 2.2 Mathematical Representation of Moisture Components of Fig.2.2 (Crawford and Linsley, 1966)

Component	$\bar{X} < b$	$b < \bar{X} < c \cdot b$	$\bar{X} > cb$
Net infiltration	$\bar{X} - \frac{\bar{X}^2}{2b}$	$\frac{b}{2}$	$\frac{b}{2}$
Decrease in interflow detention	$\frac{\bar{X}^2}{2b} (1 - \frac{1}{c})$	$\bar{X} - \frac{b}{2} - \frac{\bar{X}^2}{2c \cdot b}$	$\frac{b}{2}(c-1)$
Percentage of increased detention assigned to interflow	$100(1 - \frac{1}{c})$	$\left\{ 1 - \frac{\bar{X}^2}{2c \cdot b[\bar{X} - (b/2)]} \right\}$	$\frac{100(c-1)}{(2\bar{X}/b) - 1}$

복류수 유출 또는 상부 저류에 기여한다. 침투과정은 그림 2.2와 같이 침투·용량의 선형 누가함수로 나타낼 수 있다.

그림 2.2에서 침투량은 가능한 수분 공급량(\bar{X})으로 제한된다. 빗금친 부분은 하부 저류부 및 지하수 저류부로 침투되는 침투량을 나타낸다. 파선으로 나타낸 면적은 복류수 유출에 기여하는 水量을 나타내며 나머지 부분($4D$)은 주어진 시간 동안의 표면 저류(surface detention storage)에 기여한다. 그림 2.2에 이용된 식은 표 2.2와 같다.

그림 2.2에서 최대 침투 용량 b 는 다음과 같이 정의된다. (Anderson, 1971)

$$b = \frac{CB}{(LZS/LZSN)^{POWER}} \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서 CB : 흙의 투수계수 및 흙에 저류할 수 있는 수분 용적에 의해 결정되는 침투지수

$LZS/LZSN$: 하부의 수분비(lower zone moisture ratio)로 현재의 수분 저류(LZS)와 하부에서의 공칭수분 저류($LZSN$)의 비로서 표시된다. $LZSN$ 의 초기치는 이節의 끝부분에 주어지 있다.

$POWER$: 침투 계수(보통 2.0)

그림 2.2에서 계수 C 는 지표수에 기여하는 표면 저류량의 증가 비율을 조절함으로써 수문 곡선의 형태나 유출의 시간 분포를 변화시킨다. C 값은 다음 식으로부터 구한다.

$$C = (CC)_2 (LZS/LZSN) \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서 CC 는 지표수 유출과는 상대적으로 복류수 유출로 유입하는 水量의 비율을 나타내는 入力 지수이다.

상부 저류부에 유입하는 물은, 지체침투라 하며, 이는 상부에 고정되어 있는 표면 저류량에 대한 잠재 저류 부가량의 비(Pr)로서 계산된다. 이 비율은 상부 저류량 UZS 와 공칭 저류 용량 $UZSN$ 의 함수이다. Pr 은 다음과 같이 구해진다. (Crawford and Linsley,

1966):

$UZS/UZSN < 2.0$ 이면

$$Pr = 100 \left\{ 1.0 - \frac{UZS}{2 \cdot UZSN} \left(\frac{1.0}{1.0 + UZI1} \right)^{UZI1} \dots\dots\dots (2.4a) \right.$$

여기서 $UZI1 = 2.0 \left| \frac{UZS}{2 \cdot UZSN} - 1.0 \right| + 1.0$

$UZS/UZSN > 2.0$ 이면

$$Pr = 100 \left\{ 1.0 - \left(\frac{1.0}{1.0 + UZI2} \right)^{UZI2} \right\} \dots\dots\dots (2.4b)$$

여기서 $UZI2 = 2.0 \left| \frac{UZS}{UZSN} - 2.0 \right| + 1.0$

주의할 것은 상부 공칭 저류량 $UZSN$ 이 초기 入力 계수라는 것이다. $UZSN$ 의 초기치에 대한 지침은 이節의 끝부분에 주어지 있다.

가변하는 상부 공칭 용량을 사용할 수도 있는데 이는 식 (2.4a) 및 (2.4b)의 $UZSN$ 을 다음 식의 $UZSNT$ 로 치환시키면 된다.

$$UZSNT = UZSN + UZSNWF \cdot AEPI \dots\dots\dots (2.5)$$

여기서 $UZSNWF$ 는 가중치이고 $AEPI$ 는 증발지수로서 $AEPI = \sum_{i=1}^{\infty} (0.9)^i \cdot EVAPM_{i-1}$ 로 표시되고 $EVAP$

M 은 잠재 증발량이며, 첨자 i 는 과거의 날자를 나타낸다.

하부공칭저류량(Lower zone storage Nominal Value) $LZSN$ 의 초기치는 연평균 강우량 \bar{R} 의 함수로 다음과 같이 표시된다. $LZSN = f \cdot \bar{R} + 4$ 여기서 f 는 건조한 지역에서는 0.25 연안이나 습한 기후에서는 0.20이다.

상부공칭저류량(Upper zones storage Nominal value), $UZSN$ 의 초기치는 아래 Table 2.3에서와 같은 $LZSN$ 의 함수로 나타난다.

상부 토층내의 저류(Upper zone storage)

흙의 상부에 저장된 물의 일부는 증발산으로 소모되고, 또 일부의 흙의 하부 및 지하수 저류로 흘러 들어 소모된다. 흙의 상부의 증발산은 잠재율로 취한다. U

표 2.3 Initial Values of *UZSN* as a Function of *LZSN* (Crawford and Linsley, 1966)

Watershed	<i>UZSN</i>
Steep slopes, limited vegetation, low depression storage	0.06- <i>LZSN</i>
Moderate slopes, moderate vegetation, moderate depressoin storage	0.08- <i>LZSN</i>
Heavy vegetal cr forest cover, soils subject to cracking, high depression storage, very mild slopes.	0.14- <i>LZSN</i>

*ZS/UZSN*가 *LZS/LZSN*보다 클 때 일어나는 침투나 지체된 침투에 의해서 흙의 상부의 물은 지하수나 흙의 하부저류로 移動된다. 침투에 의한 물의 이동은 아래의 식에 의하여 계산된다.

$$PERC = 0.003CB \cdot UZSN \left[\frac{UZS}{UZSN} - (LZS/LZSN) \right]^3 \dots\dots\dots(2.6)$$

여기서 침투율 *PERC*의 단위는 inches/foot이다.

하부 토층도의 저류(Lower Zone tStorage)와 지하수(Groundwater)

지하수 저류는 Fig 2.1에서 보인 바와 같이 직접 침투나 지체된 침투, 침투등에 의해서 물의 공급을 받는다. 이 부분에 도달하는 직접침투와 기체된 침투의 백분율, *Pg*는 습윤비 *LZS/LZSN*에 따라 변하고 아래 식에 의하여 계산된다.

LZS/LZSN < 1.0 일 때

$$Pg = 100 \left[\frac{LZS}{LZSN} \cdot \left(\frac{1.0}{1.0 + LZI} \right)^{LZI} \right] \dots\dots(2.7a)$$

여기서, *LZI* = 1.5 $\left| \frac{LZS}{LZSN} - 1.0 \right| + 1.0$

LZS/LZSN > 1.0 일 때

$$Pg = 100 \left[1.0 - \left(\frac{1.0}{1.0 + LZI} \right)^{LZI} \right] \dots\dots\dots(2.7b)$$

어떤 시간에 지하수로부터 하도로 유입되는 양은 기저유출량과 시간의 선형적인 반대관계에 기반을 두고 있다.

이 기저유출 공식은 다음과 같이 주어진다.

$$GWF = (LKK4) [1.0 + KV \cdot GWS] SGW \dots(2.8)$$

여기서, *LKK4* = 1.0 - (*KK24*)^{1/96}

*KK24*는 일(日) 기저유출의 감쇄상수이고 *KV*는 일 기저유출의 비선형 감쇄의 수정지수이다. 변수 *GWS*는 지하수에 유입되는 장기적인 유입량에 기초를 둔 선형 지표이다. *i*번째 일(日)의 *GWS*는 다음과 같이 계산된다.

GWS_i = 0.97(*GWS_{i-1}* + inflow to groundwater storage on day *i*)

식 (2.8)의 *SGW*는 지하수 저류량의 변동을 반영하는 지하수 저류 매개변수이다. *SGW*의 범위는 0.1~

3.9inches이다.

*KK24*와 *KV*는 모형의 입력변수이다. *GWS*와 *SGW*는 각각 *GWSI*와 *SGWI*의 형태로 모형에서 초기변수로 주어진다.

깊은 혹은 활동성 지하수 저류에 할당된 물의 일부는 비활동성 지하수 저류에 의해 손실되거나 유역의 배수 경계를 지나서 흐르는 흐름에 기여한다. 입력변수 *K24L*은 활동성 지하수로 되는 총 유입량은 일부이다.

지하수저류의 하부로부터의 증발산은 potential rate로 일어나지 않는다.

증발산(Evapotranspiration)

그림 2.1에서 표시한 것처럼 증발산 *ET*는 차단저류 토층 상하부 저류, 지하수저류 등으로 부터 모두 발생한다. 증발산은 심지어 불침투성으로 알려진 냇물이나 호수에서도 일어난다.

차단이나 흙의 상부 저류량으로 부터의 증산은 증발접시계수 *PEARJ*와 증발접시에 의한 증발량자료(*EVAPM*)의 곱으로 계산되는 잠재량 *Ep*와 같다.

모형은 처음에 차단과 흙의 상부저류량으로부터 잠재증발량을 만족시키도록 시도한다. 흙의 상부저류량이 고갈되었을 때 *ET*는 저지대 저수지에서 발생하는 데 이는 잠재량 만큼 크지는 않다. 하부저류량으로부터의 증발산은 그림 2.3에 있는 누가 빈도분포도에 근거를 둔 *Ep*보다 적다.

그림 2.3에서 흙의 하부저역에서 증산으로 잃은 물의 양은 *Ep* < *r*일 때 그림에서 사선부분으로 다음과 같이 표시된다. $E = Ep - \frac{Ep^2}{2r} \dots\dots\dots(2.9)$

여기서 *E*는 "실질 증발산도"이다.

증발산기회변수 *r*은 다음과 같이 주어지는 指標이다.

$$r = K3 \times LZS/LZSN$$

여기서 *K3*은 유역 함수로서의 입력 매개 변수이다. *K3*의 전형적인 값은 2.4에 주어져 있다.

지하수로부터의 증발산도 또한 고려할 수 있다. 이는 입력 매개 변수 *K24EL*로부터 계산된 *Ep*로 구할수 있다. 매개 변수 *K24EL* 그 phreatophytes에 의한 전체 강우 면적에 대한 비율을 말한다. 강 또는 호수에

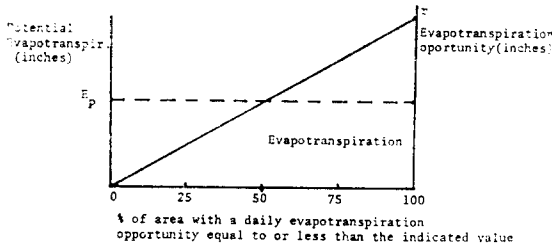


그림 2.3 Cumulative Frequency Distribution of Evapotranspiration Opportunity (Crawford and Linsley, 1966)

표 2.4 Typical Lower Zone Evapotranspiration Parameter (Crawford and Linsley, 1966)

Watershed Cover	K_3
Open land	0.20
Grassland	0.23
Light forest	0.28
Heavy forest	0.30

서의 증발산은 잠재율로 일어난다. 이러한 유역에서의 증발산율은 입력 매개 변수 $IMPV$ 에 의해 규정된다.

지표수 유출: 이 모형에서는 유역의 지표수 유출의 체적과 깊이를 계산하기 위하여 lumped Parameter 를 사용한다. 지표수 유출의 유량비는 지표수 저류량에 대한 함수로부터 산출해 낼 수 있다. 지표수 저류량 D_e 는 주어진 강우 상태에서의 평형된 깊이로부터 다음식에 의해 산정되어진다.

$$D_e = \frac{0.000818^{10.6} NN^{0.6} L^{1.6}}{SS^{0.3}} \dots (2.10)$$

여기서 i =inch/hr인 강우 강도,

NN =Manning의 조도 계수,

L =평균 지표수 유출 깊이(ft)

SS =유역의 평균 지표 경사

또, 저류량이 평형 상태에 도달될 때까지 소요되는 시간 t_e 는

$$t_e = \frac{0.94L^{3/5} NN^{3/5}}{I^{2/5} SS^{3/10}} \text{으로 계산된다.}$$

여기서 t_e 의 단위는 '분이다.

평형 상태에서의 지표수 유출과 저류량과의 관계는 다음 식과 같다.

$$q = \frac{1.486}{NN} SS^{1/2} \left(\frac{D}{L}\right)^{5/3} \left[1.0 + 0.6\left(\frac{D}{D_e}\right)^{5/3}\right] \dots (2.11)$$

여기서 $q=cfs$ 단위의 단위폭당 지표수 유출 유량.

D =주어진 시간 동안의 평균 저류량.

이 모형에서 매시간 간격 Δt 마다 연속 방정식을 적용하면 現時間에서의 지표수 유출 저류량 D_2 를 구할 수 있다.

$$D_2 = D_1 + \Delta D - \bar{q}\Delta t$$

여기서 D_1 =以前 지표수 유출 저류량

$\Delta D = \Delta t$ 동안 증가된 저류량(그림 2.2참조)

$\bar{q} = D = (D_1 + D_2)/2$ 라 가정한 식 2.11의 평균 유량비.

식(2.10)과 (2.11)에서 NN, SS, L 이 매개 변수 임은 특기할 만 하다. SS 와 L 의 값은 유역의 외형에서 쉽게 얻을 수 있다. 또 Manning 조도 계수는 표 2.5에 열거되어 있다.

표 2.5 Typical Values of Manning's Roughness Parameter NN for Overland Flow (Crawford and Linsley, 1966)

Watershed Cover	Manning's N
Smooth asphalt	0.012
Asphalt or concrete paving	0.014
Packed clay	0.03
Light turf	0.20
Dense turf	0.35
Dense shrubbery and forest litter	0.40

복류수: 복류수에 일시적으로 저류되어 있는 물은 결국에는 일(日) 감수 상수의 비율로 유출되어진다. 복류수 감수 상수란 24시간 전에 복류수 유출량에 대한 그날의 복류수 유출량의 평균 비율을 말한다. 이 상수는 입력 변수 IRC 에 의해 결정된다.

저류되었다가 유출된 복류수 $INTF$ 는

$$INTF = LIRC4(SRGX)$$

여기서 $LIRC4 = 1.0 - (IRC)^{0.96}$ 이고 $SRGX$ 는

복류수에 저류된 유량을 말한다.

하도에서의 평행 이동 및 추적: 그림 2.1을 보면 모형의 지표 부근에서는 지표수 유출, 복류수 유출, 지하수 유출 등을 끊임없이 야기시키고 이들은 결국 하도 유입에 합류한다. 모든 하도 유입의 합은 유하시간 유역면적 방법으로 유역 출구로 평행 이동되어진다.

각 유출로부터 입력 배열 $TIMEAR()$ 을 읽고 $tim-delay$ histcgram 을 작성할 수 있다. $TIMEAR$ 의 각

표 2.5 Summary of Model Parameters of the NWS Version of the SWM

Model Parameters	Description
K1	Precipitation adjustment factor for a distant gage
AREA	Waterbed drainage area
IMPV	Fraction of impervious area
EPXM	Maximum rate of vegetative interception for a dry watershed
UZSN	Nominal upper zone storage
LZSN	Nominal lower zone storage
CB	Index of infiltration rate
CC	Index of rate and quantity of water entering interflow
POWER	Exponent of the infiltration curve equation
K3	Evapotranspiration parameter of the lower zone moisture
K24L	Portion of groundwater recharge due to deep percolation
K24EL	Groundwater evapotranspiration by phreatophytes
L	Average land flow length
SS	Average basin ground slope
NN	Manning's roughness coefficient for overland flow
IRC	Daily interflow recession constant
KK24	Daily baseflow recession constant
KU	Daily baseflow nonlinear recession constant
KS1	Channel attenuation parameter

요소에는 관측계기—면적 배열 GAGEAR()에 입력되어진 각각의 지정된 우량계가 있다. 하도 시스템에서 저류에 의해 야기되는 감수현상을 설명하기 위해 유입량은 선형 저수 추적 기법을 사용하여 평형 저류 시스템을 통해 추적되어질 수도 있다. 이 추적에 대한 식은 간편하게 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$O_2 = \bar{I} - KS / (\bar{I} - O_1)$$

여기서 O_2 = 최종 순간의 유출 비율

O_1 = 초기 유출 비율

\bar{I} = 평균 유입 비율

KS_1 = 모형의 입력 매개 변수인 저류 감수 계수

2.3 모형 매개 변수의 요약

여기서는 모형 매개 변수 중 중요한 것만 수록했고 주요 매개 변수는 표 2.5와 같다.

3. 프로그램 표현

SWM의 NWS 형태의 컴퓨터 프로그램은 포트란 IV로 쓰여졌다. 이 프로그램은 CDC 컴퓨터로 약 6만 단어의 컴퓨터 용량이 필요하다. 약간의 수정을 하면 IBM 컴퓨터 장치내에서 프로그램을 동작시킬 수 있다.

3.1 보편적인 프로그램 흐름도

개략의 프로그램 흐름도는 그림 2.4와 같다. 이 프

로그램은 주프로그램과 4개의 부프로그램 즉 LAND, CHANEL, L PLOT, IGAUSS로 나누어 진다. 주프로그램과 LAND, CHANEL 부프로그램의 간단한 형태는 다음과 같다.

Main Program: 主 program은 말하자면 기본적인 計算을 시킬수 있는 정보, 입력과 출력을 조정하는 매개 변수, 모델의 매개 변수와 필요한 수문학적인 자료등의 모든 입력 정보를 읽는다. 그리고, 수문학적인 순환과정. 地表部分의 계산은 subroutine LAND를 불러서 이용함으로써 수행된다. 각각의 地表部分에서 수로로 들어오는 모의발생된 유입량은 subroutine CHANEL을 불러서 이용함으로써 유역의 배출으로써 변형되고 추적된다. 매월마다 主 program은 인 쇄를 위하여 도표로 작성된 地表貯留와 모의발생된 흐름의 성분들을 요약하게 된다. 계산의 마지막에는 관측되고 모의 발생된 일별 평균 유량이 요약되고 subroutine L PLOT를 불러서 이용함으로써 plot 된다.

Subroutine LAND: 이 subroutine은 모의발생된 수로의 유입량의 성분들을 나타내주는 수문학적인 순환과정의 地表部分을 계산하는 과정을 나타내고 있다. 地表貯留와 흐름의 성분들의 초기나 예진의 값들로부터 시작하여 다음시간에 대한 흐름의 값을 계산하게

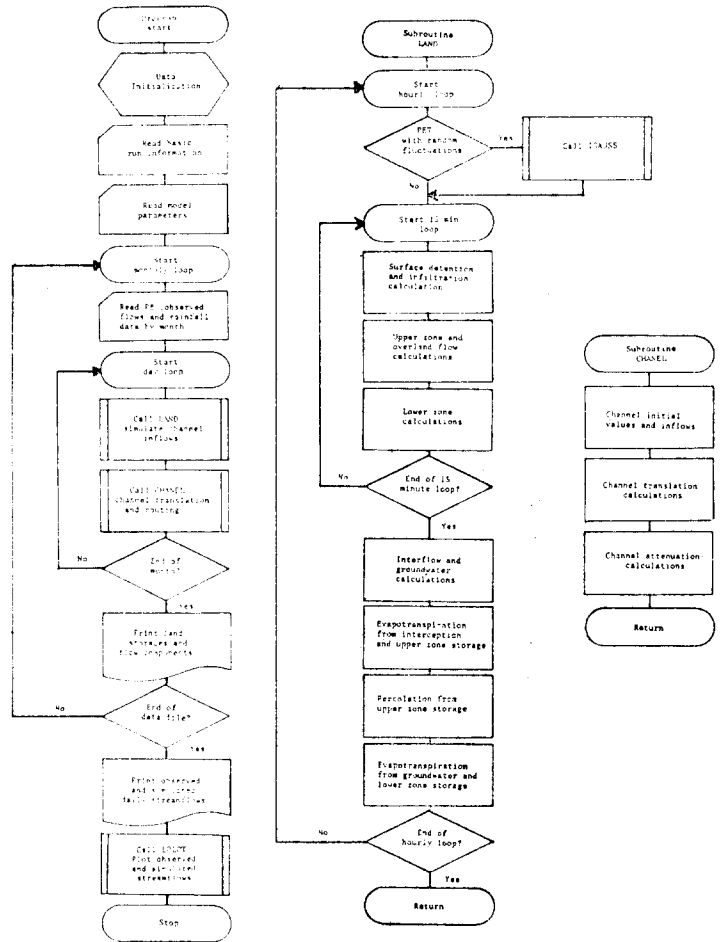


그림 2.4 General Flowchart of the Computer Program of the SWM

된다. 발생된 降雨 및 蒸發散 資料로부터 침투, 上層 저류량, 하부저류량 및 地表面流出에 대한 計算. 15分 간격으로 土壤의 含水量 計算을 實施함으로써 이행 된다. 遮斷, 補류수 흐름 및 지하수 性分을 위한 토양 함수의 계산이 15分 시간간격 보다 큰 단계로 실시된다. 결국 어느 시간단계 以後(즉 例로서 1日)에, 계산은 各各 다른 地形條件下에서의 流入量에 대한 追跡을 실시하도록 主 program으로 옮겨지게 된다.

부연하면, 잠재적인 증발산의 입력이 불안정성을 포함하고 있을때 subroutine IGAUSS를 불러서 이용하면 된다.

Subroutine CHANEL: 基本的으로 이 Program은 Subroutine LAND에서 구한 流入水文曲線을 流域出口까지 平行移動 및 追跡을 實施한다. 이와 같은 追跡의 實施는 日單位의 時間 간격으로 實施하여야 한다.

3.2. 입력과 출력의 정보

일반적으로 program의 입력은 다음과 같은 과정으로 요약될 수 있다.

1. 기초적인 run 정보
2. 입력과 출력의 선택을 위한 조정 매개 변수
3. 모델 매개 변수의 입력
 - 우량계 인자
 - 증발산 인자
 - land 양의 매개 변수
 - land timing 매개 변수
 - land의 초기 축적량
 - 수로의 변화나 추적을 위한 매개 변수
4. 그림으로 된 출력을 얻기 위한 부가적인 조정 매개 변수
5. 수문학적인 입력 자료
 - 잠재증발산량
 - 實測된 日流量資料

강우 자료

우선적으로, 이 program의 출력은 line printer에 의하여 표나 그림의 모양으로 나타나게 된다. 도표로 작성된 출력은 월별로 근거를 둔 각 우량계의 유출량, 강우량, 증발산량과 저류 성분들에 대한 요점을 포함하고 있다. 또한 매 시간별의 모의발생된 흐름량도 포함하고 있게 된다. 또한 관측되거나 모의발생된 일별의 평균 유출량의 값들을 도표와 그림으로 나타나게 되어 있다.

4. 모델 조정

앞의 模型構造節에서 모형변수의 初期値와 推定値들이 잘 說明되었다. 예상한 바로 앞에서 추정된 각종변수들의 값이 許容된 結果를 주는 것은 아니다. 따라서 초기 매개 변수의 예상값과 모의발생된 결과를 더욱 개선하기 위하여 조정과정이 필요하게 된다. SWM의 NWS版은 매개 변수를 조정하는데 있어서 최적화 기법을 사용하지 못하기 때문에 조잡한 방법이지만 시안법을 이용하여야 한다. 모델 매개 변수들의 조정을 쉽게 하기 위하여 모의발생된 흐름에 있어서의 여러 매개 변수중의 일부에 대한 상호 작용과 민감성에 대한 간단한 설명이 다음 아래에 소개되고 이다.

CC—복류수의 성분으로써 복류수로 들어가는 물의 양과 정도를 나타내는 지표인 CC는 모의발생된 흐름에 영향을 준다. 매개 변수 CC는 0.5에서 3.0까지 변한다. CC가 증가하게 되면 유출량의 크기가 감소하게 되고 CC가 감소하면 유출량의 크기가 증가한다.

CB—침투율의 지표인 CB는 0.3에서 1.2까지 변한다. CB값이 증가하면 일반적으로 유출량의 크기나 유출량이 감소하게 된다. 그러나, 어떤 경우에 있어서는 이러한 관계들이 UZSN이나 LZSN으로 표시되는 상부저류와 하부저류의 Norminal 값들의 상호 작용에 의하여 좀 더 복잡 미묘해질 수 있다.

K24L—K24L 매개 변수는 손실되거나 표면 지역에서 일어나는 침투 현상으로 인하여 지하수에 다시 재보급되는 함수량을 조정하게 된다. 이러한 손실들을 강우나 유출의 크기들에 비하여 너무나 작기때문에 자주 그 양들이 0으로 가정된다.

L—평균적인 地表面 흐름의 길이인 L이 증가하게 되면 유출의 양과 침투치가 줄어들게 되며 L이 감소하면 그 반대의 결과가 생기게 된다.

NN—Manning의 조도 계수인 NN이 상대적으로 클 값이 사용되게 되면 홍수의 침투값이나 유출량이 줄어들게 된다.

IRC—복류수흐름의 감수상수를 나타내는 지표인 매개 변수 IRC는 이 값이 커지면 유출량에서는 작은 영

향뿐이 못미치게 되니, 홍수의 침투치에 있어서는 크게 감소시킨다.

5. 모델의 적용

starfcrd 유역 모델의 개발 이래로 원리의 모델을 이용하여나 수정된 여러 방법을 이용한 여러가지의 모델 적용 시례가 문헌에 나타나고 있다. 유역 모델에 대한 여러가지 적용들에 대하여 구체적으로 논하는 것은 여기의 영역밖에 일이다. 현재까지 starfcrd 流域模型의 적용예를 열거하면 아래와 같다.

Experiments in simulation

Streamflow forecasting

Runoff forecasting

Synthetic data generation

Runoff prediction for ungaged sites

Weather modification

Reservoir operation studies

Management model interface

Urban drainage design

Urbanization and hydrologic effects of urbanization

참고 문헌

- Crawford, N.H. and R.K. Linsley, Jr. 1966. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, Calif., Tech. No. 39, July.
- Liou, E.Y., 1970, OPSET: Program for Computerized Selection of Watershed Parameter Values of the Stanford Watershed Model. Research Rept. No. 34, Water Resour. Inst., University of Kentucky, Lexington.
- Ricca, V.T., The Ohio State University Version of the Stanford Streamflow Simulation Model, Part I—Technical Aspects, Ohio State University, Columbus, May.
- Claborn, B.J. and W. Moore, 1970. Numerical Simulation in Watershed Hydrology. Hydraulic Engineering Laboratory, University of Texas, Rept. No. HYD 14-7001.
- Anderson, E.A., 1971. FORTRAN-IV Program for Stanford Watershed Model IV. NOAA NWS, Office of Hydrology, Silver Spring, MD., February.
- Viessman, W., et. l. 1977. Introduction to Hydrology. IEa-A Don-Donnellery Publisher, New York (2nd edition).