

Grid based rainfall-runoff model User's manual

최윤석, 김경탁

한국건설기술연구원 수자원하천연구본부

v.GRM2022.11
2023.07



한국건설기술연구원
KOREA INSTITUTE of CIVIL ENGINEERING and BUILDING TECHNOLOGY

History

GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)은 한국건설기술연구원에서 개발된 격자 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형이다. GRM 모형의 개발 연혁은 다음과 같다.

- ▶ GRM 모형은 2008년에 처음 개발되었다. 지표면 유출, 하도 유출, 지표하 유출, 흐름 제어 유량 등을 모의할 수 있었다. 수자원 지리정보시스템인 HyGIS의 add-on인 HyGIS-GRM으로 개발되었다.
- ▶ 2010년에는 기저유출 모의가 추가되었다. 실시간 강우자료를 이용한 실시간 유출해석 모듈이 개발되었다.
- ▶ 2012년에는 단일 유역에서의 다지점 보정 기법이 개발되었다.
- ▶ 2014년에는 침투, 지표하 유출, 기저유출 모의 기법이 개선되었다. 오픈소스 GIS인 MapWindow GIS(v.4.8.8)에서 실행할 수 있는 plug-in인 MW-GRM이 개발되었다.
- ▶ 2015년에는 계산시간 간격(dt)에 대한 민감도가 개선되었다. 실시간 유출해석 모듈에서 실시간 흐름제어(flow control)를 모의할 수 있도록 개선되었다. 다수의 유역시스템을 연계 해석할 수 있는 다지점 보정기법이 개발되었다.
- ▶ 2017년에는 GRM 모형을 GIS 및 GUI와 분리하여 독립적인 실행파일로 개발하였다. .NET을 이용한 병렬계산 기법과 계산시간 간격(dt)을 변화시킬 수 있는 기법이 적용되었다.
- ▶ 2018년에는 GRM 모형의 GUI를 QGIS plug-in (QGIS-GRM)으로 개발하였다. Visual Basic .NET을 이용해서 개발되었던 GRM 모형을 C# 언어로 변환하였다.
- ▶ 2020년에는 여러 개의 하도 정보를 설정할 수 있도록 모형이 개선되었다. 실시간 모의를 위한 옵션이 추가 되었다. C++를 이용한 GRM 모형이 개발되었다.
- ▶ 2021년에는 저수지 운영을 좀 더 상세히 모의할 수 있도록 개선되었다.
- ▶ 2022년에는 연속형 모의를 위한 차단, 증발산, 융설 모의 모듈이 추가되었다.

GRM 모형은 한국건설기술연구원에서 지속적으로 개발되고 있다.

목 차

1. GRM 모형의 개요	1
1.1 모형구조	1
1.2 차단	3
1.3 증발산	4
1.4 용설	5
1.5 지표 흐름	6
1.6 침투	8
1.7 지표하 유출	8
1.8 기저유출	9
1.9 지배방정식의 이산화	10
1.10 Flow control	12
1.11 Calculation time step	14
2. 모형 매개변수	15
2.1 증발산 매개변수	15
2.2 용설 매개변수	17
2.3 토양 매개변수	17
2.4 토지피복 매개변수	19
2.5 하폭	21
2.6 초기포화도	22
2.7 최소경사	23
2.8 하도 조도계수	23
2.9 건천차수	24
2.10 매개변수 보정계수	25
2.11 매개변수 추정	25
3. 다지점 보정	26
3.1 단일 유역 다지점 보정 기법	27

3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법	27
4. 입력자료	29
4.1 공간자료	30
4.2 기상자료	32
4.3 수문자료	34
4.4 매개변수 파일	35
4.5 GRM 프로젝트 파일	36
4.6 GRM Static 데이터	46
5. 출력자료	49
6. GRM Real Time	51
7. Prediction	54
참 고 문 헌	55
부 록	59
가. 다운로드	59
나. 실행 방법(Console window)	61

1. GRM 모형의 개요

1.1 모형구조

GRM(Grid based rainfall-Runoff Model)은 강우-유출 사상과 연속적인 유출과정을 모의하기 위한 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형이다. GRM은 식물의 잎에 의한 강수의 차단, 증발산, 용설, 침투, 침누, 지표면 유출, 복귀류, 지표하 유출, 기저유출, 하천 유출을 모의한다. 하나의 제어체적은 수직방향으로 지표층(Land Surface)과 두 개의 토양층(Soil Layer A, B)으로 구성된다. 제어체적에서의 질량의 증가에 기여하는 수문성분은 상류 제어체적으로부터의 지표면 흐름, 지표하 흐름, 복귀류, 횡방향 유입과 강수, 용설로 구성되며, 질량의 감소에 기여하는 수문성분은 하류 제어체적으로서의 지표면 흐름, 지표하 흐름, 기저유출과 증발산으로 구성된다. 하나의 제어체적 내에서의 수직방향 흐름은 침투와 침누가 있다.

강수는 식물의 잎에 의해서 일부 차단되며, 기온에 따라서 강우와 눈으로 구분된다. 눈은 적설량을 증가시키고, 적설은 용설에 의해서 지표면 유출에 기여한다. 강우는 침투 손실 후에 직접유출에 기여한다. 증발산은 식물의 잎, 지표면, 토양, 하천에서 발생한다. 지표층에서는 지표 유출이 발생된다. 지표 유출은 지표면 유출(overland flow)과 하천 유출(stream flow)로 구분된다. 제어체적에서 지표면 층은 지표면 유출만 발생하는 것, 하천 유출만 발생하는 것, 지표면 유출과 하천 유출 모두가 발생하는 것으로 구분된다. 직접유출은 지표면 유출과 지표하 유출로 구성된다. 지표면 유출은 침투초과유출(Horton, 1933)과 포화초과유출(Dunne과 Black, 1970)에 의해서 발생한다. 침투 과정과 지표하 유출은 토양수대(soil water zone)(Bras, 1990)를 의미하는 Soil Layer A에서 모의하며, 침투량은 지표하 유출에 기여한다. 지표하 유출은 하류가 하천인 경우 하천의 횡방향 유입으로 작용하며, 포화된 지표면인 경우에는 복귀류(return flow)로서 지표면 유입에 기여한다(Beven과 Kirkby, 1979). 비피압대수층을 포함하는 Soil Layer B에서는 기저유출을 모의한다.

수문성분 모식도에서 흐름방향을 x 방향으로 설정하고, 수평 성분 중 흐름에 직각인 방향을 y 방향으로 설정하며, h 는 수심을 나타낸다. p 는 강수, e_t 는 증발산, s_p 는 snow pack, s_m 은 용설, c 는 차단, f 는 침투, q_r 는 복귀류, q_L 는 측방유입, q_{ss} 는 지표하 유출, q_b 는 기저유출, Q 는 하천 유량을 나타낸 것이다.

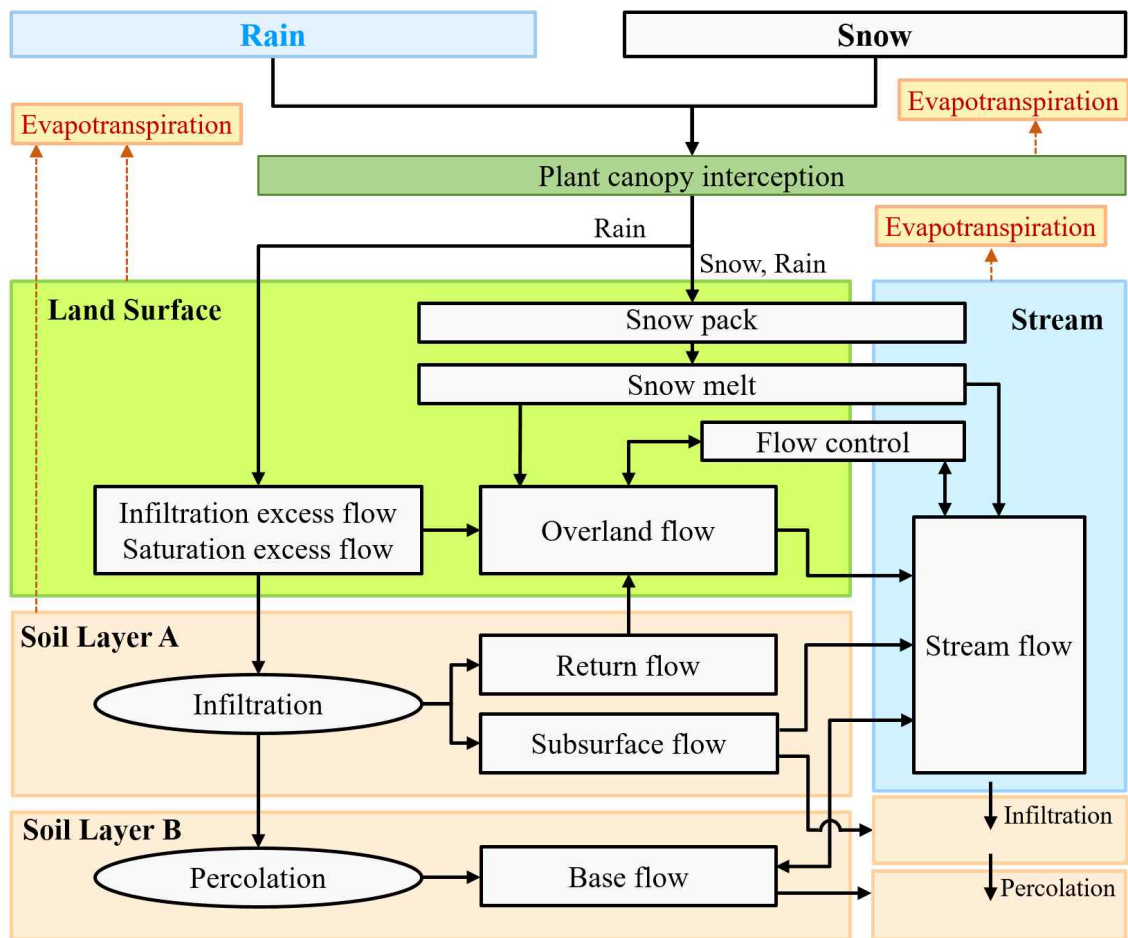


그림 1.1 수문성분 모식도

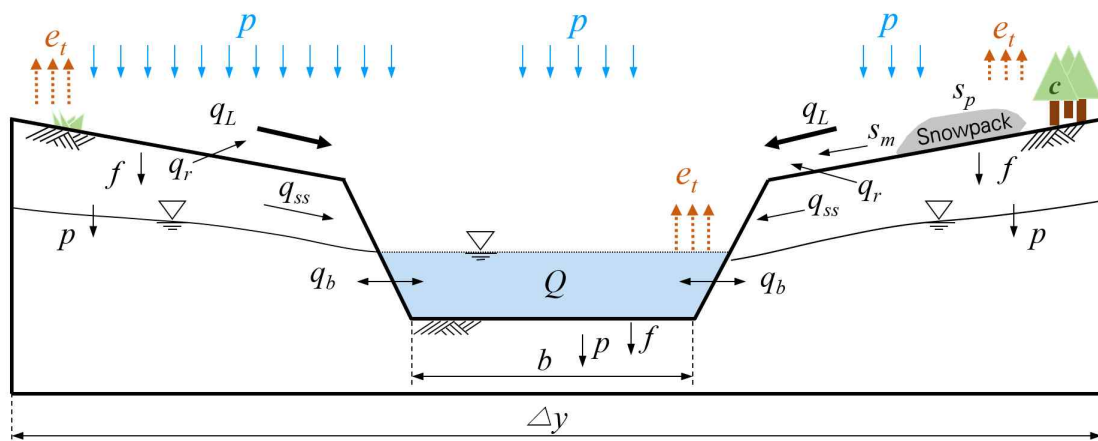


그림 1.2 횡단면 수문성분 모식도

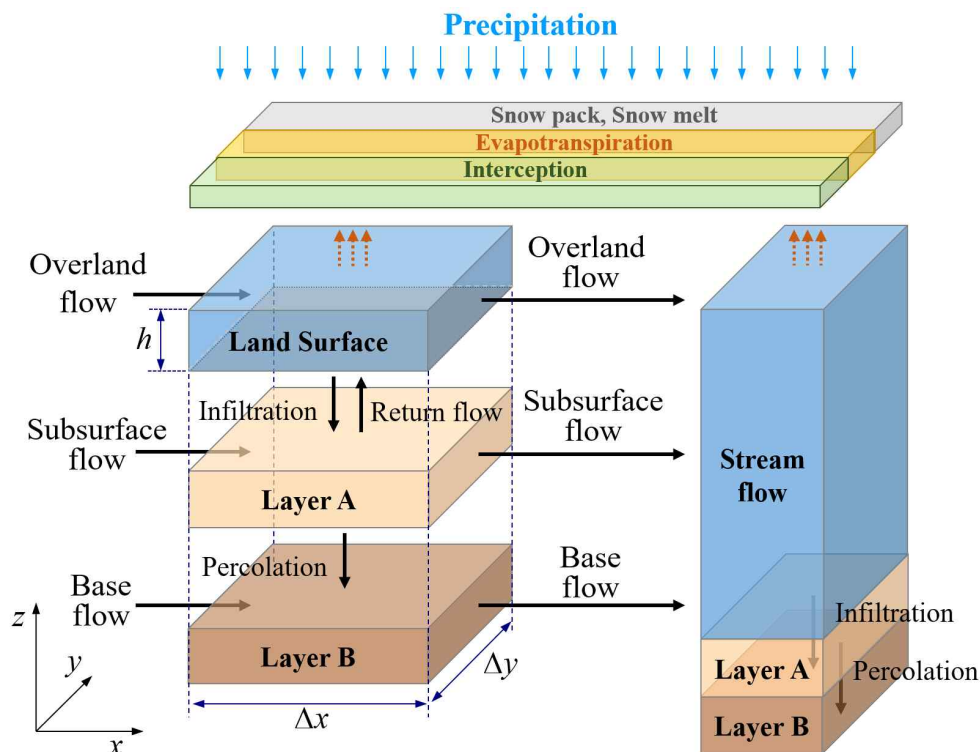


그림 1.3 제어체적에서의 수문성분 입출력

1.2 차단

차단은 식물의 잎에 의해 유출에 기여하는 강수의 손실을 의미한다. 차단량은 식생 피복에 의한 최대 차단 가능량과 식생의 활력도를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 이때 식생의 활력도는 대상 식생의 LAI (Leaf Area Index)의 최대값(LAI_{mx})과 해당 월에서의 LAI의 비로 표시된다(Neitsch et al., 2005). 일최대 차단 가능량(c_{mx_day})을 초과하는 강수는 식생을 통과하여 지상에 도달하며, GRM에서는 격자별로 설정되는 토지피복에서 식생피복의 비율을 이용하여 격자별 차단과 지표면에 도달하는 강수량을 계산한다.

$$c_{mx_day} = c_{mx} \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (1.2.1)$$

$$p_g = p \times (1 - R_{cnpy}) + p_{eg} R_{cnpy} \quad (1.2.2)$$

여기서 c_{mx_day} : 일최대 차단 가능량 (mm/day), c_{mx} : 식생별 최대 차단 가능량 (mm), p_g : 지표면에 도달하는 강수량, p : 차단을 고려하지 않은 강수량, p_{eg} : 최대 차단 가능량을 초과하여 지표면에 도달하는 강수량, R_{cnpy} : 하나의 검사체적에서 식생피복 비율

1.3 증발산

GRM은 식생, 지표면, 수역에서의 증발산을 모의한다. 잠재증발산은 Blaney-Criddle (Blaney and Criddle, 1950), Hamon(Hamon, 1961), Hargreaves(Hargreaves and Samani, 1985), Priestly-Taylor(Priestley and Taylor, 1972; Ponce, 1989) 방법을 이용해서 계산할 수 있으며, 실제증발산은 잠재증발산에 증발산 계수를 곱해서 계산한다.

식생에서의 증발산은 식생에 의해서 차단되어 있는 수분을 대상으로 하며, 이를 초과하는 증발산은 지표면 혹은 수역에서의 증발산으로 계산된다. 지표면 증발산은 지표면 수심이 있는 경우에는 수심에서 손실로 계산되며, 지표면 수심이 없는 경우에는 토양 수분에서 손실로 계산된다. 하천, 저수지 등과 같은 수역에서의 증발산은 잠재증발산 값을 이용한다.

1.3.1 Blaney-Criddle 방법

Blaney-Criddle 방법은 일평균기온과 연간 총 일조시간에 대한 일 일조시간 비율 자료를 이용하여 잠재증발산을 계산한다 .

$$e_{tp} = k R_{sr} (0.457 T_a + 8.128) \quad (1.3.1)$$

여기서 e_{tp} : 잠재증발산량 (mm/day), T_a : 일평균기온 ($^{\circ}C$), R_{sr} : 연간 총 일조시간에 대한 일 일조시간 비율 (%), k : 월별 작물계수 (0.45 ~ 1.2), 생육기간(4월 ~ 9월)은 0.85, 비생육기간은 0.45

1.3.2 Hamon 방법

Hamon 방법은 일평균기온과 일조시간을 이용하여 잠재증발산량을 산정한다.

$$e_{tp} = 0.55 \times 25.4 \times \left(\frac{n}{12}\right)^2 \left(\frac{D_{sv}}{12}\right) \quad (1.3.2)$$

$$D_{sv} = \frac{216.7 \times e_s}{(T_a + 273.3)} \quad (1.3.3)$$

$$e_s = 6.108e^{17.26939 T_a / (T_a + 273.3)} \quad (1.3.4)$$

여기서 e_{tp} : 잠재증발산량 (mm/day), n : 일조시간 (hours), D_{sv} : T_a 온도에서 포화수증기밀도 (g/m^3), T_a : 일평균기온 ($^{\circ}C$), e_s : T_a 온도에서 포화수증기압 (mb)

1.3.3 Hargreaves 방법

Hargreaves 방법은 일최고 기온, 일최저 기온, 일사량을 이용해서 잠재증발산을 계산한다.

$$e_{tp} = k_{RS} R_a (T_{\max} - T_{\min})^{e_h} \times \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + c_t \right) \quad (1.3.5)$$

여기서 e_{tp} : 잠재증발산량 (mm/day), R_a : 일태양복사량 (mm/day), T_{\max} : 일최고 기온 ($^{\circ}C$), T_{\min} : 일최저 기온 ($^{\circ}C$), k_{RS} : 복사보정계수(0.0023), e_h : Hargreaves 지수(0.5), c_t : 온도 계수 (17.8)

1.3.4 Priestly-Taylor 방법

Priestly-Taylor 방법은 일사량, 기온 자료를 이용해서 잠재증발산을 계산한다 .

$$e_{tp} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r \quad (1.3.6)$$

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \rho_w} \quad (1.3.7)$$

여기서 e_{tp} : 잠재증발산량 (cm/day), γ : 건습계 상수($kPa/^{\circ}C$), α : 계수(일반적으로 1.28), Δ : 특정 기온에서의 포화증기압 곡선의 기울기, E_r : 증발률(cm/day), R_n : 순방사량(net radiation flux)($cal/cm^2/day$), l_v : 증발잠열 (cal/gr), ρ_w : 물의 밀도 (g/cm^3)

1.3.5 실제 증발산

실제 증발산은 계산된 잠재증발산에 증발산 계수(혹은 작물계수)를 곱하여 계산된다. 이때 어떤 작물에 대한 증발산이 아닌 유역이나 지역에 대한 실제 증발산을 계산하는 경우에는 증발산 계수로 보통 0.6~0.8을 사용할 수 있다.

$$e_{ta} = k_c e_{tp} \quad (1.3.8)$$

여기서 e_{ta} : 실제 증발산량, e_{tp} : 잠재증발산량, k_c : 증발산 계수(혹은 작물계수) (0.6~0.8)

1.4 용설

용설은 지상에 쌓인 눈(snow pack)이 녹으면서 발생된다. 하늘에서 내리는 강수는 특정 기온을 기준으로 눈과 강우로 구분되어 지표면에 도달한다. GRM 모델은 Anderson(1976)의 연구를 토대로 다음의 식을 이용하여 용설을 모의한다. Snow pack에서의 승화는 증발산에 포함된 것으로 가정하고 용설 모의에서는 고려하지 않는다.

$$S_p = S_p + p_{day} - S_{melt} \quad (1.4.1)$$

$$S_{mlt} = b_{mlt} \cdot S_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mlt} \right] \quad (1.4.2)$$

여기서, S_p : Snow pack의 수분함량(snow pack의 높이를 수심으로 환산하였을 때의 높이) (mm H₂O), p_{day} : 대상 일에서의 강수량($T_{av} \leq T_{sr}$ 일 경우에 유효함) (mmH₂O), T_{av} : 일 평균 기온(°C), T_{sr} : 강수를 눈과 비로 구분하는 기준 온도(°C), S_{mlt} : 일별 용설량 (mm H₂O), b_{mlt} : 용설계수(mm H₂O/day-°C), S_{cov} : 눈으로 덮인 부분의 면적비, T_{snow} : 대상 일(day)에서의 snow pack 온도(°C), T_{mx} : 대상 일에서의 최고 기온(°C), T_{mlt} : 용설이 시작되는 온도(°C)

1.5 지표 흐름

지표흐름(surface flow)은 지표면 흐름(overland flow)과 하천 흐름(stream flow)으로 구분할 수 있으며, 이에 대한 유출해석을 위해서 운동파 방정식을 적용하고 있다. 운동파 방정식은 연속방정식과 운동량방정식의 조합으로 해석되며, 지표면 흐름에서의 연속방정식은 식 (1.5.1)과 같고, 하도 흐름에서의 연속방정식은 식 (1.5.2)를 적용한다. 운동파 모형에서의 운동량 방정식은 식 (1.5.3)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = M_o + \frac{q_r}{\Delta y} \quad (1.5.1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = M_s \Delta y + L \quad (1.5.2)$$

$$S_0 = S_f \quad (1.5.3)$$

$$M_o = r - f - c - e_t - s_p + s_m \quad (1.5.4)$$

$$M_s = r - c - e_t - s_p + s_m \quad (1.5.5)$$

$$L = q_o + q_{ss} + q_b \quad (1.5.6)$$

여기서 q : 단위 폭당 유량($q=uh$), u : x 방향 유속, q_r : 복귀류, A : x 방향에 직각인 흐름 단면적, Q : 유량, h : 수심, t : 시간, S_0 : 지면경사, S_f : 마찰경사, M_o : 지표면 흐름 생성항, M_s : 하천 흐름 생성항, r : 강우강도, f : 침투율, c : 차단, e_t : 증발산, s_p : snow pack 기여량, s_m : 용설, L : 측방유입, q_o : 하천 흐름과 지표면 흐름 특성을 모두 가지고 있는 검사체적에서의 지표면 유출, q_{ss} : 지표하 유출, q_b : 기저유출

식 (1.5.3)에 의해서 Manning의 유속공식에서 마찰경사 대신에 바닥경사를 적용함으로써 유속을 계산할 수 있다. 수심이 작은 지표면 흐름에서는 동수반경으로 수심을 근사적으로 적용하며, 하도 추적에서의 동수반경은 비대칭 사다리꼴 단면을 적용할 수 있다.

$$u = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (1.5.7)$$

여기서 n : 조도계수, R : 동수반경

$$R = \frac{b_s h}{b_s + 2h} \approx h \quad (1.5.8)$$

여기서 b_s : 지표면 흐름에서 제어체적의 폭($b_s \gg h$)

$$R = \frac{bh + \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{SLB} + \frac{1}{SRB} \right)}{b + h \times \sqrt{1 + \frac{1}{SLB^2}} + h \times \sqrt{1 + \frac{1}{SRB^2}}} \quad (1.5.9)$$

여기서, b : 하폭, $SLB = h/b_{LB}$, $SRB = h/b_{RB}$

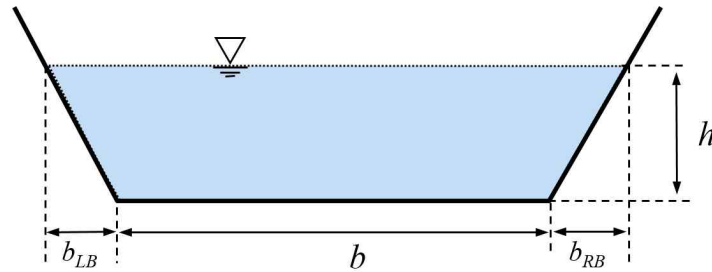


그림 1.4 비대칭 사다리꼴 하도 단면

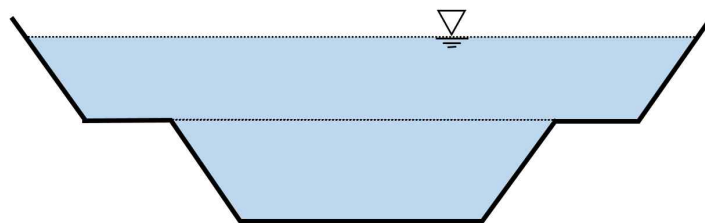


그림 1.5 복단면 하도

GRM은 제어체적이 정형 사각형 격자이기 때문에 대각선 흐름에서의 제어체적 x 방향 크기 (Δx)는 직각 흐름에서의 Δx 보다 큰 값을 가진다. 그러므로 흐름방향이 각기 다른 격자에 부여되는 강우의 질량을 보존하기 위해서 아래의 식을 적용하고, x 방향에 직각인 y 방향의 크기 (Δy)는 변화시키지 않는다.

$$r_{app} = r \times \Delta x / \Delta x_{app} \quad (1.5.10)$$

여기서 r_{app} : 격자별로 적용되는 강우강도, r : 입력된 강우자료에서 계산된 강우강도, Δx : 직각 흐름에서의 제어체적 x 방향 크기, Δx_{app} : 제어체적 흐름방향(직각 혹은 대각선)에 의해서 계산되는 x 방향 크기

1.6 침투

GRM은 강우강도가 침투율보다 클 때 발생하는 침투초과유출과 토양이 포화된 경우에 발생하는 포화초과유출(Dunne and Black, 1970)을 모의할 수 있으며, 침투량 산정을 위하여 Green-Ampt 모델을 적용한다. Green-Ampt 모델에서는 다음 식과 같이 누가침투량을 계산하고 있으며, 침투율은 누가침투량을 이용해서 계산된다.

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (1.6.1)$$

$$f(t) = K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \quad (1.6.2)$$

여기서 $F(t)$: t 시간에서의 누가침투량, $f(t)$: t 시간에서의 침투율, $\Delta\theta$: 토양수분함량변화($\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$), S_e : 유효포화도($S_e = (\theta - \theta_r)/(\eta - \theta_r)$), θ : 수분함량($\theta_r \leq \theta \leq \eta$), θ_r : 잔류 수분함량($\theta_r = \eta - \theta_e$), η : 공극율, θ_e : 유효공극율, ψ : 습윤전선흡인수두, K : 수리전도도

1.7 지표하 유출

Beven(1981)은 포화상태에서의 지표하 흐름의 모의를 위해서 운동파 모델을 적용한 바 있다. 운동파 모델을 이용한 지표하 흐름은 포화된 제어체적 내에서의 동수경사가 지표면 경사와 같다는 가정에 기반하고 있으며, 다음 식을 이용해서 지표하 유출을 계산한다.

$$q_{ss} = KD_s \sin(S_a) \quad (1.7.1)$$

여기서 q_{ss} : 지표하 유출, D_s : 포화된 토양 깊이, S_a : 지면의 경사각

운동파 모델에 의한 지표하 유출의 모의는 깊이가 D 인 토양에 대해서 다음 그림과 같이 나타낼 수 있다(최윤석, 2010). GRM에서는 제어체적에서의 지표하 유출의 동수경사를 지표면 경사와 동일한 일정한 값으로 가정하며, 포화된 토양 깊이에 대해서 지표하 유출을 모의한다. 지표하 유출은 하도 흐름에서 측방유입 성분으로 기여한다. 지표면 흐름에서는 현재 제어체적의 토양이 포화된 경우, 상류에서 유입되는 지표하 유출은 모두 복귀류로 모의되고, 포화되어 있지 않은 경우에는 상류에서 유입되는 지표하 유출에 의한 현재 제어체적의 토양 수분 증가를 먼저 계산하고, 포화된 이후 복귀류를 계산한다.

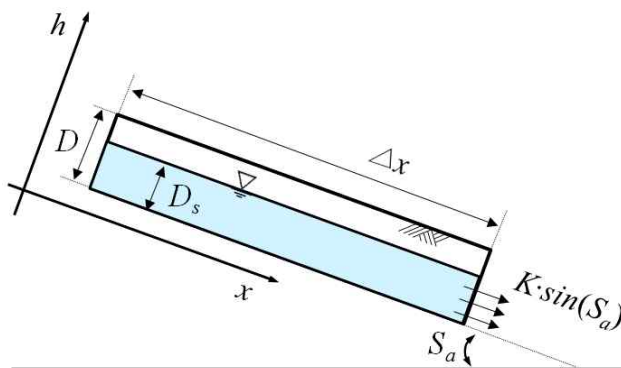


그림 1.6 운동파 지표하 유출 모형

Sloan과 Moore(1984)는 완전히 포화된 토양이 포함된 임의 구간에서의 유출량 계산을 위해서 물수지에 기반한 Simple Storage-Discharge 모형을 제안하였다. 다음의 식은 완전히 포화된 토양에서의 포화초과유출과 지표하 유출을 나타내고 있으며, GRM에서 각 성분은 하류 제어체적에 대해서 지표면 유입량과 측방유입 혹은 복귀류의 모의에 적용된다. 특히 강우와 유출이 발생되면 포화된 토양의 깊이는 가변적이다. 그러므로 완전히 포화된 토양 ($D_s = D$)에 대해서만 모의하고 있는 포화초과유출과 복귀류가 발생하는 제어체적도 가변적이다(Dunne and Black, 1970; Bras, 1990; 박종관 등, 2006).

$$q_o = i_s L_s + q_{ss} \quad (1.7.2)$$

여기서 q_o : 임의 구간 하단부에서의 단위 폭당 유량, L_s : 지표면까지 포화된 구간의 지표면 길이, i_s : 포화된 수면과 직각으로 유입되는 외부로부터의 유입률

1.8 기저유출

GRM에서는 토양을 2개의 층으로 구분한다. 상부에 있는 A 층에서는 침투와 지표하 유출을 모의하고, 하부의 B 층에서는 기저유출을 모의한다. A 층의 토양수분은 침투에 의해서 B층으로 이동하며, 침투 깊이는 다음 식과 같이 계산한다.

$$p_b = K_{Bv} \times \Delta t \quad (1.8.1)$$

여기서 K_{Bv} : B 층에서의 연직 투수계수, p_b : Δt 시간 동안의 침투량

B 층에서의 횡방향 유량은 Darcy의 법칙(Freeze and Cherry, 1979)을 기반으로 식 (1.8.2)와 같이 계산할 수 있으며, 이때 Δx 구간에서의 수두차를 지표면 경사와 같다고 가정하고 식 (1.8.3)을 적용한다.

$$q_{Bh} = K_{Bh} D_B \frac{dz_B}{dx} \quad (1.8.2)$$

$$q_{Bh} = K_{Bh} D_B \sin(S_a) \quad (1.8.3)$$

여기서 z_B : B 층의 수위, K_{Bh} : B 층의 횡방향 투수계수, D_B : B 층의 수심, q_{Bh} : B 층의 단위폭당 횡방향 유량

비피압대수층과 하천과의 유량 교환은 비피압대수층의 수심(h_B)이 하도 수심(h_{ch})보다 클 경우($h_B > h_{ch}$)에는 식 (1.8.4)를 이용하여 하도로 유입되는 기저유출량을 계산하고, 비피압대수층의 수심이 하도 수심보다 작을 경우($h_B < h_{ch}$)에는 식 (1.8.5)를 이용하여 하도에서 토양 B 층으로의 유출을 계산한다.

$$q_b = K_{Bh} \frac{h_B - h_{ch}}{h_{ch}} b \quad (\text{for } h_B > h_{ch}) \quad (1.8.4)$$

$$q_b = K_{Bh} (h_B - h_{ch}) \quad (\text{for } h_B < h_{ch}) \quad (1.8.5)$$

여기서 h_B : 비피압대수층의 수심, h_{ch} : 하도 수심, b : 하폭, q_b : 제어체적 단위 길이당 기저유량

1.9 지배방정식의 이산화

GRM은 유한체적법을 이용하여 지배방정식을 이산화하며, 이를 위한 제어체적의 설정은 다음 그림과 같다(최윤석 등, 2008). 제어체적의 번호는 변수의 아래첨자 i 로 표시하고 있으며, 제어체적의 중심부를 p , 제어체적으로 유입이 발생하는 상류 방향($-x$ 방향)의 제어체적면을 w , 유출이 발생하는 하류 방향(x 방향)의 제어체적면을 e 로 표시한다(Patankar, 1980).

지표면 및 하도 흐름해석을 위한 연속방정식을 제어체적 CV_i 에 대해서 x 와 t 항에 대해 적분한 후 이산식을 작성하면 식 (1.9.1) 및 식 (1.9.2)와 같고, 비선형항은 Newton-Raphson 방법으로 반복 계산하여 수렴해를 도출한다(최윤석, 2010). 식 (1.9.1)에서 하나의 격자에서 지표면 흐름과 하천 흐름을 함께 모의하는 경우에는 지표면 흐름의 해석에 적용되는 Δy_i 로 격자의 y 방향 크기(Δy)에서 하폭(b)을 제외한 길이를 적용한다.

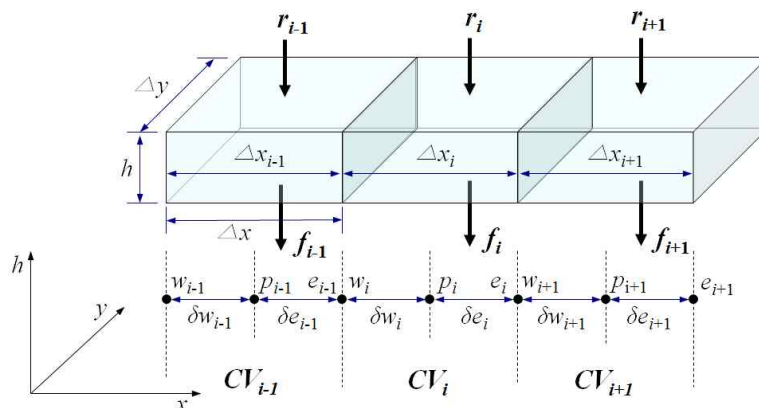


그림 1.7 이산화를 위한 제어체적 설정

$$h_{ip}^{j+1} = h_{ip}^j - \alpha (\bar{u})_{ie}^{j+1} h_{ie}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \alpha (\bar{u})_{iw}^{j+1} h_{iw}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} - (1 - \alpha) \{ (\bar{u})_{ie}^j h_{ie}^j - (\bar{u})_{iw}^j h_{iw}^j \} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \{ \alpha S_i^{j+1} + (1 - \alpha) S_i^j \} \Delta t \quad (1.9.1)$$

여기서 $S_i = M_o + \frac{q_{ri}}{\Delta y_i}$, $\Delta y_i = \Delta y - b_i$, b_i : 제어체적 CV_i 에 설정된 하폭, α : 시간차분 가중계수

$$A_{ip}^{j+1} = A_{ip}^j - \alpha (\bar{u})_{ie}^{j+1} A_{ie}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \alpha (\bar{u})_{iw}^{j+1} A_{iw}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} - (1 - \alpha) \{ (\bar{u})_{ie}^j A_{ie}^j - (\bar{u})_{iw}^j A_{iw}^j \} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \{ \alpha S_i^{j+1} + (1 - \alpha) S_i^j \} \Delta t \quad (1.9.2)$$

여기서 $(S_i = M_s \Delta y_i + L)$

하천의 특성을 가지는 임의의 제어체적은 하폭과 격자 크기에 따라서 하폭이 격자 크기보다 작은 경우와 하폭이 격자 크기보다 크거나 같은 경우로 구분된다. 하폭이 격자 크기보다 작은 경우에는 해당 제어체적에 대해서 지표면 유출, 하천 유출 모의에 필요한 모든 수문성분이 모의되며, 하폭이 격자 크기보다 크거나 같은 경우에는 하천 유출만 모의된다. 이때 해당 제어체적에서 발생한 강우는 하폭의 범위 안에서 발생하는 경우와 하폭의 범위 밖에서 발생하는 경우로 구분된다. 하폭 내에서 발생한 강우는 하천의 직접유출에 모두 기여하고, 하폭 밖의 지표면 부분에서 발생한 강우는 지표면 유출 과정에서와 같이 침투 과정의 해석을 거친다. 그러므로 하천 유출 해석을 위한 식 (1.9.2)에서의 Δy_i 는 하폭이 격자의 크기보다 크거나 같은 경우에는 격자의 y 방향 크기와 같은 값을 적용($\Delta y_i = \Delta y$)하며, 하폭이 격자의 크기보다 작은 경우에는 하폭을 적용($\Delta y_i = b_i$)한다.

1.10 Flow control

GRM은 자연 유출의 모의와 함께 Flow control 모듈을 이용해서 유역내에서 발생하는 인위적인 유량 조건의 변동을 유출모의에 반영할 수 있다. Flow control 모듈을 이용해서 모의할 수 있는 유량 조건은 "Reservoir outflow", "Inlet", "Reservoir operation", "Sink flow", "Source flow" 이다. Flow control 기법은 하도 흐름특성 및 지표면 흐름특성을 가지는 격자에 대해서 모두 적용할 수 있으며, 하나의 유역내에서 다수의 Flow control 조건을 복합적으로 적용함으로써 강우에 의한 직접유출량과 함께 유출모의 기간에 발생하는 다양한 유량조건의 변동을 유출모의에 반영할 수 있다(한국건설기술연구원, 2011b).

1.10.1 Reservoir outflow

"Reservoir outflow" 기능에서는 저수지로 지정된 격자를 기준으로 유역을 상류와 하류로 분리해서 유출모의를 수행하며, 저수지 운영 식을 고려하지 않는다. 저수지로 지정된 제어체적에서의 유출량은 식 (1.10.1)과 같이 사용자에게 의해서 입력된 저수지의 관측 유출 수문곡선을 이용하여 설정되며, 저수지 직하류에 위치한 제어체적은 저수지의 유출량을 상류단 경계조건에 포함시켜서 유출모의를 수행한다. 저수지의 방류량으로 관측유출량을 적용하므로, 저수지에서의 저류량은 최대저류량(MaxStorage)을 초과할 수 있다.

$$q_{ie} = q_o \quad (1.10.1)$$

여기서 q_{ie} : 저수지로 설정된 제어체적 i 에서 유출되는 단위 폭 당 유량, q_o : 저수지의 관측 유출수문곡선으로 부터 계산된 단위 폭 당 유량

1.10.2 Inlet

Inlet으로 지정된 격자를 기준으로 유역을 상류와 하류로 구분한다. 특정 격자를 기준으로 유역을 분할하여 유출모의를 수행하는 것은 "Reservoir outflow"와 동일하나, "Inlet"에서는 Inlet으로 지정된 격자의 상류는 유출모의를 수행하지 않는 특징이 있다. 저수지 운영 식을 고려하지 않으며, Inlet 격자에 대해서 유출 수문곡선이 주어지면 Inlet 격자에서의 유출량은 식 (1.10.1)과 동일한 방법으로 계산되고, 이는 Inlet의 하류 셀에서 상류단 경계조건으로 적용된다.

이와 같은 "Inlet" 기능은 댐과 저수지가 포함된 대유역에서 댐 혹은 저수지로부터의 관측 유출 수문곡선이 있을 경우, 댐과 저수지 상류 영역을 모의대상 영역에서 제외하고 하류 영역만을 모의할 수 있으며, 이로 인해서 유출모형에서 필요로 하는 공간자료 및 시계열 수문자료의 구축 영역을 줄일 수 있는 장점이 있다. 격자 기반의 분포형 모형에서는 모의대상 영역이 줄어들 경우 유역을 구성하는 격자의 개수가 줄어들게 되며, 유출모의 소요시간을 단축시킬 수 있다. 또한 동일한 유출모의 시간을 적용할 경우에는 유역의 격자 크기를 작게

구성할 수 있으며, 이를 통해서 격자 크기의 스케일 문제에서 발생할 수 있는 격자 형식의 지형 및 수문자료의 불확실성을 줄일 수 있다.

1.10.3 Reservoir operation

"Reservoir operation" 기능에서는 저수지에서의 저류 영향과 저수지 운영을 유출모의에 반영할 수 있다. GRM에서는 초기저류량, 최대저류량, 최대저류율, 일정방류량, 수위-저류량 및 수위-방류량 관계에 의한 ROM(Reservoir Operation Method)을 동적으로 모의할 수 있다.

1.10.4 Sink flow / Source flow

"Sink flow"는 임의 격자에 대해서 모의된 유출량의 일부가 배제되는 조건을 모의하고 있으며, "Source flow"에서는 임의 격자에 대해서 모의된 유출량에 추가되는 유량 조건이 있을 경우 이를 반영하여 유출모의를 수행한다. "Sink flow"와 "Source flow"에 의해서 배제 혹은 추가되는 유량은 수문곡선으로 주어지며, 지표면 유출 및 하도 유출모의시 생성항(source term)으로 적용된다. "Sink flow" 혹은 "Source flow"는 하나의 제어체적에서 다른 flow control 모의("Inlet", "Reservoir outflow", "Reservoir operation")와 동시에 모의할 수 있다. 이 경우에는 하나의 제어체적에 사용되는 flow control 시계열 자료의 시간 간격은 같아야 한다.

1.10.5 저수지 제원 및 운영 방법

"Inlet"을 제외한 "Reservoir outflow", "Reservoir operation", "Sink flow", "Source flow"를 모의할 때는 아래 표와 같은 저수지 제원을 입력할 수 있다. 이때 "Reservoir operation"을 모의할 경우에는 다음 표의 저수지 제원과 ROM을 반드시 입력해야 한다. "Reservoir outflow", "Sink flow", "Source flow"를 모의할 때는 ROM은 설정하지 않아도 되며, 저수지 제원을 입력하지 않을 경우, 대상 셀에서의 초기저류량과 최대저류량은 "0"으로 설정되고, 저류량이 계산되지 않는다.

"/a" 옵션을 사용하면, GRM 모형은 flow control 모의에서 사용자가 입력한 자료(예를 들어, 댐 방류량)를 모두 사용하고, 더 이상 flow control 자료가 없을 경우에는 저수지의 제원을 이용하여 AutoROM을 적용한다. 그러므로 "/a" 옵션을 적용할 경우에는 유출 모의에 포함된 모든 저수지의 제원이 입력되어 있어야 한다.

표 1.1 Reservoir operation 기능의 적용을 위한 저수지 조건(최윤석, 2010)

구분		설명
제원	초기저류량	모의 시작 시간에서의 저수지 저류량
	최대저류량	저수지의 최대 저류량. 댐 바닥부터 홍수위까지의 총 저수량
	상시만수위 저류량	상시만수위에 해당하는 저류량
	제한수위 저류량	제한수위(홍수기 제한수위 등)에 해당하는 저류량
	제한수위 저류량 적용 기간	제한수위 저류량을 적용할 기간 이 기간을 제외한 모의시간에서는 상시만수위 저류량이 적용됨
ROM	Automatic ROM	저수지의 최대 가능 저류량(제한수위 저류량, 상시만수위 저류량, 최대저류량 등)에 도달하기 전까지는 저수지 유출이 발생하지 않으며, 최대 가능 저류량에 도달 할 경우, 저수지로 유입되는 모든 유량이 유출
	Rigid ROM	저수지의 저류량이 설정된 방류량 보다 작을 경우는 모두 방류. 저수지의 저류량이 설정된 방류량 보다 클 경우 설정된 일정 유량을 방류하다가 저류량이 저수지의 최대 가능 저류량(홍수기제한수위 저류량, 최대저류량 등)을 초과할 경우 저수지로 유입되는 유량이 모두 방류
	일정 방류량	저수지의 저류량이 설정된 방류량 보다 작을 경우는 모두 방류. 저수지의 저류량이 설정된 방류량 보다 클 경우에는 저수지의 용량에 관계없이 일정한 양을 일정한 시간 동안 방류
	저류량-방류량 관계식	저류량-방류량 관계식 혹은 수위-저류량, 수위-방류량 관계식을 이용하여 저류량과 방류량을 계산(소스코드 수준에서만 지원됨)

1.11 Calculation time step

GRM 모형의 계산시간 간격은 전체 모의기간에서 하나의 계산시간 간격(Δt)을 적용하는 경우와 계산된 유량에 따라서 계산시간 간격을 달리 적용하는 경우로 구분된다. 하나의 계산시간 간격을 적용하는 것은 사용자에게 의해서 설정된 계산시간 간격을 모의기간 동안 계속 동일한 값으로 적용하는 것이다. 계산시간 간격을 변경시키는 것은 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 조건을 이용해서 계산 단계 마다 계산시간 간격을 변화시키는 것이다. CFL 조건은 다음 식과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u_{\max}} \quad (1.11.1)$$

여기서 u_{\max} : t 시간에서 계산된 전체 격자에서의 유속 중 최댓값, Δt : $t + \Delta t$ 시간에 서의 계산시간 간격

2. 모형 매개변수

GRM 모형은 강우-유출 현상을 물리적으로 해석하고 있으며, 이를 위해서 격자별로 부여된 물리적인 매개변수를 사용한다. 이때 유역경계, 하천망, 토양, 토지피복 등에 의해서 설정되는 물리적 매개변수는 이론적으로는 사용자에게 의한 매개변수 추정 대상에서 제외되어야 하지만, 모형의 지배방정식의 제약과 자료의 생성과정 및 스케일의 문제로 인하여 필요에 따라서는 매개변수 추정의 대상이 되기도 한다. GRM은 사용자에게 의해서 추정되어야 하는 매개변수를 포함하고 있으며, 토양 및 토지피복 특성별로 설정된 각 매개변수를 일괄적으로 수정하기 위한 매개변수 보정계수를 적용할 수 있다.

2.1 증발산 매개변수

잠재증발산은 대부분 기상자료를 이용하여 계산될 수 있으나, Blaney-Criddle 방법과 Priestly-Taylor 방법은 추가적인 인자가 필요하다. Blaney-Criddle 방법에서는 월별로 설정되는 작물계수(k), 연간 총 일조시간에 대한 일 일조시간 비율(R_{sr})이 필요하다. 일반적으로 월별 작물계수는 0.45 ~ 1.2을 사용하며, 생육기간(4월 ~ 9월)은 0.85, 비생육기간은 0.45를 적용할 수 있다. 연간 일조시간에 대한 일간 일조시간 비율은 위도별로 제시되는 연간 일조시간에 대한 월간 일조시간의 비율을 이용하여 계산된 아래의 표(김형수, 2012)를 이용하여 설정할 수 있다.

Priestly-Taylor 방법에서는 특정 기온에서의 포화증기압 곡선의 기울기, 건습계 상수, 증발잠열이 필요하다. GRM에서는 기온별 포화증기압 자료로부터 각 기온 구간에서의 포화증기압은 선형의 기울기를 가진다고 가정하고, 이 기울기 값을 증발산 계산에 이용한다. 건습계 상수와 증발잠열은 각각의 참조표를 이용하여 만들어진 아래와 같은 선형회귀식을 이용하여 계산한다.

$$\gamma = -0.56 \times T_a + 567.3 \quad (2.1.1)$$

$$l_v = 0.0006 \times T_a + 0.655 \quad (2.1.2)$$

여기서 γ : 건습계 상수, l_v : 증발잠열 (cal/gr), T_a : 평균기온 (°C)

표 2.1 연간 일조시간에 대한 월별 일간 일조시간 비율

월 북위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
64도	0.12	0.19	0.26	0.33	0.40	0.45	0.43	0.36	0.29	0.21	0.14	0.10
62도	0.14	0.20	0.26	0.33	0.39	0.43	0.41	0.35	0.29	0.22	0.16	0.12
60도	0.15	0.20	0.26	0.32	0.38	0.41	0.40	0.34	0.28	0.22	0.17	0.13
58도	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.40	0.38	0.34	0.28	0.23	0.18	0.15
56도	0.17	0.21	0.26	0.32	0.36	0.39	0.38	0.33	0.28	0.23	0.18	0.16
54도	0.18	0.22	0.26	0.31	0.36	0.38	0.37	0.33	0.28	0.23	0.19	0.17
52도	0.19	0.22	0.26	0.31	0.35	0.37	0.36	0.33	0.28	0.24	0.20	0.17
50도	0.19	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.35	0.32	0.28	0.24	0.20	0.18
48도	0.20	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.35	0.32	0.28	0.24	0.21	0.19
46도	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.35	0.34	0.32	0.28	0.24	0.21	0.20
44도	0.21	0.23	0.27	0.30	0.33	0.35	0.34	0.31	0.28	0.25	0.22	0.20
42도	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.34	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
40도	0.22	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
38도	0.22	0.24	0.27	0.30	0.32	0.33	0.33	0.31	0.28	0.25	0.23	0.22
36도	0.23	0.24	0.27	0.30	0.32	0.33	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
34도	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
32도	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
28도	0.24	0.25	0.27	0.29	0.31	0.31	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
26도	0.24	0.25	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
24도	0.24	0.26	0.27	0.29	0.30	0.31	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
22도	0.25	0.26	0.27	0.29	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
20도	0.25	0.26	0.27	0.28	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25
18도	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.26	0.25
16도	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.29	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25
14도	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
12도	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
10도	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
8도	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.26
6도	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
4도	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
2도	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
0도	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27

2.2 용설 매개변수

용설을 계산하기 위해서는 기상자료와 snow pack의 온도 시계열 자료 외에 매개변수로 는 강수가 눈과 비로 구분되는 기준 온도, 용설이 시작되는 온도, snow pack이 생성될 경우 격자별 snow pack의 면적 비율, 용설계수가 필요하다. 이 매개변수는 유출모의 영역단위(구역, 소유역 등)로 설정되어 격자별로 할당되며, 사용자에 의해서 추정되는 매개변수이다.

2.3 토양 매개변수

GRM은 침투과정의 모의를 위해서 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 이에 따라 침투 초과유출을 모의하기 위한 토양속성별 Green-Ampt 모형의 매개변수와 포화초과유출과 지표하 유출을 모의하기 위한 토양심을 설정해야 한다.

Green-Ampt 모형을 이용하여 침투량을 계산하기 위해서는 토양에 대한 공극율, 유효공극율, 습윤전선흡인수 등 및 수리전도도와 같은 물리적 특성을 알아야 하며, 이러한 토양 특성은 토양 수분의 실측을 통해서 얻을 수 있다(Brakensiek 등, 1981). Rawls 등(1983)은 미국 내 약 5,000개의 토양을 분석하고, 토성별 Green-Ampt 모형의 매개변수의 평균값을 제안하였다. Green-Ampt 모형에서 토양의 유효포화도를 결정하는데 적용되는 초기수분함량(θ)을 제외한 모든 매개변수는 토성에 따라서 미리 정해진 값을 이용하며, 유출모의 과정에서 각 매개변수를 추정할 수 있다. 초기수분함량(θ)은 실측 혹은 매개변수 추정에 의해서 결정될 수 있으며, 선행강우와 같은 유역의 수문학적 조건에 따라서 달라질 수 있다.

한국에서 일반적으로 활용할 수 있는 토양도는 한국농업기본도, 한국개략토양도, 개략토양도 및 정밀토양도가 있다(김경탁, 1998). 이 중 정밀토양도는 현지 조사를 위주로 수행된 정밀토양조사에 의해서 작성된 토양도로 한국토양을 토양통(soil series)으로 분류하고 이를 토양구(soil type), 토양상(soil phase)으로 세분하고 있으며, 가장 작은 단위인 토양상에 대한 물리적 특성을 포함하고 있다(농업기술연구소, 1992).

Green-Ampt 모형의 매개변수는 토성(soil texture)별로 설정되어 있으며, 정밀토양도에서는 토양구에 대해서 이와 동일한 토성 분류를 적용하고 있다. 또한 포화초과유출의 계산을 위한 한국토양의 토양심은 정밀토양도의 토양통을 기준으로 분류하고 있으며, 토양조사사업의 성과를 바탕으로 다음과 같은 토양심 분류별 값의 범위를 설정하고 있다(농업기술연구소, 1992).

표 2.2 토성에 따른 Green-Ampt 침투 매개변수(Rawls 등, 1983; Chow 등, 1988)

Soil Texture	Porosity (η)	Effective porosity (θ_e)	Residual moisture content ($\theta_r = \eta - \theta_e$)	Wetting front soil suction head ($ \psi_f $)(cm)	Hydraulic conduct. (K) (cm/hr)
Sand (사토)	0.437 (0.374-0.5)	0.417 (0.354-0.479)	0.02	4.95 (0.97-25.35)	11.78
Loamy sand (양질사토)	0.437 (0.363-0.505)	0.401 (0.329-0.472)	0.036	6.13 (1.35-27.93)	2.99
Sandy loam (사양토)	0.453 (0.351-0.554)	0.412 (0.283-0.54)	0.041	11.01 (2.67-45.46)	1.09
Loam (양토)	0.463 (0.375-0.55)	0.434 (0.334-0.533)	0.029	8.89 (1.33-59.37)	0.34
Silt loam (미사질양토)	0.501 (0.42-0.581)	0.486 (0.394-0.577)	0.015	16.68 (2.92-95.38)	0.65
Sandy clay loam (사질식양토)	0.398 (0.332-0.463)	0.33 (0.235-0.424)	0.068	21.85 (4.42-108.1)	0.15
Clay loam (식양토)	0.464 (0.409-0.518)	0.309 (0.279-0.5)	0.155	20.88 (4.79-91.9)	0.1
Silty clay loam (미사질식양토)	0.471 (0.418-0.523)	0.432 (0.347-0.516)	0.039	27.3 (5.67-131.49)	0.1
Sandy clay (사질식토)	0.43 (0.37-0.489)	0.321 (0.207-0.434)	0.109	23.9 (4.08-140.1)	0.06
Silty clay (미사질식토)	0.479 (0.425-0.532)	0.423 (0.334-0.511)	0.056	29.22 (6.13-139.3)	0.05
Clay (식토)	0.475 (0.427-0.522)	0.385 (0.269-0.5)	0.09	31.63 (6.39-156.4)	0.03

표 2.3 토양층에 대한 토양심 분류(농업기술연구소, 1992)

토양심 분류		토양심(cm)	
		미농무성	정밀토양조사
Very shallow	매우얕음	0 - 10	0 - 20
Shallow	얕음	10 - 30	20 - 50
Moderately deep or Moderately shallow	보통	35 - 50	50 - 100
Deep	깊음	50 - 60	100 - 150
Very Deep	매우깊음	> 60	> 150

GRM은 토양층 A에서 B로의 침투계산을 위해 불포화투수계수를 사용한다. Fredlund et al. (1994)에 의하면 Averjanov (1950)는 토양의 포화도를 이용하여 아래와 같은 power

function 형식의 불포화투수계수 산정식을 제안하고 있다. Fredlund et al. (1994)에서는 n 값으로 3.5를 제시하였으며, Noh et al. (2015)에서는 장기간의 연속형 모의에서 n 값으로 12를 사용한 바 있다. GRM에서는 강우-유출 사상의 모의를 위한 n 값으로 6.4를 기본값으로 제시하고 있다.

$$K_u = K_s S_r^n \quad (2.3.1)$$

여기서 K_u : 불포화투수계수, K_s : 포화투수계수, S_r : 토양의 포화도
 $\{ = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \}$, θ_r : 잔류 수분함량, θ_s : 포화 수분함량, n : 계수

GRM은 power function 형식의 식과 함께 다음의 식을 선택해서 사용할 수 있으며, 이 식에서 GRM은 n 의 기본값으로 0.2, m 의 기본값으로 0.1을 제시한다.

$$K_u = n K_s S_r \quad (2.3.2)$$

$$K_u = m K_s \quad (2.3.3)$$

2.4 토지피복 매개변수

유역의 토지피복은 지표면 흐름의 계산을 위한 조도계수와 불투수율의 설정, 차단의 계산에 영향을 미친다. GRM에서는 강우에 의한 지표면 유출의 모의를 위해서 Engman(1986), Vieux(2004) 등에 의해서 제안된 토지피복에 따른 조도계수를 참고하여 다음 표와 같이 적용하고 있다.

지표면에서의 불투수 영역은 강우가 발생하더라도 토양으로의 침투가 발생되지 않는 영역을 의미한다. 사공호상(2003)은 1m의 공간해상도를 가지는 IKONOS 위성영상을 이용해서 토지피복을 아래 표와 같이 투수지역과 불투수지역으로 구분하고, 이를 안양시의 토지용도별 항목에 적용함으로써 토지용도별 불투수율을 산정하였다. GRM에서는 사공호상(2003)의 연구 결과 중 환경부의 토지피복도 대분류 속성에 대응하는 항목에 대한 불투수율을 적용할 수 있다. 불투수율은 0~1의 범위를 가지며, 불투수율이 "1"인 경우 해당 토지피복 속성을 가지는 격자는 모두 불투수 영역으로 설정된다.

차단의 모의를 위해서는 토지피복 속성별로 부여되는 월별 LAI 값, 격자별 Canopy의 면적 비율, 최대 차단가능량이 필요하다. 토지피복 속성별 월 LAI 값은 기존의 연구(김병식, 2005; 한국건설기술연구원, 2004; 한국건설기술연구원, 2005 등)를 이용하여 작성된 다음의 표를 참고할 수 있다. 격자별 Canopy의 면적 비율과 최대 차단가능량은 토지피복별로 부여되는 사용자 추정 매개변수이다.

표 2.4 토지피복 속성별 월별 LAI

월 토지피복	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
시가화 /건조지역	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.2
농업지역	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.2
산림지역	0.3	0.3	0.3	0.6	1.0	1.5	2.4	3.8	3.8	1.5	1.0	0.6
초지	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.2
습지	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.6	1.4	1.4	1.4	0.9	0.9	0.3
나지	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.2
수역	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

표 2.5 토지피복 속성별 조도계수, canopy 비율, 최대차단가능량 기본값

토지피복도 대분류(환경부)		조도계수	Canopy 비율	최대차단가능량 (mm)
속성 값*	속성			
100	시가화/건조지역	0.015	0.2	0.3
200	농업지역	0.035	0.4	0.3
300	산림지역	0.1	0.8	0.4
400	초지	0.15	0.5	0.3
500	습지	0.07	0.4	0.3
600	나지	0.02	0.2	0.3
700	수역	0.03	0.1	0.1

*사용되는 자료에 따라서 다른 값을 가질 수 있음

표 2.6 투수성에 따른 토지피복 항목 분류

투수지역	불투수 지역
식생	도로
경작지	콘크리트 구조물
비닐하우스	아파트
하천	단독주택
나대지	연립주택
기타초지	주택 외 건물
철도	공장

표 2.7 토지피복도 속성별 불투수율

토지피복 속성	토지이용 속성	불투수율	
		값의 범위	평균
시가화/건조지역	상업지역	0.641-0.947	0.853
농업지역	논	0.107-0.456	0.391
	밭	0.053-0.504	
	비닐하우스	0.422-0.842	
산림지역	개발제한구역, 비시가화지역, 산림	0.001-0.05	0.025
초지	초지	0.14-0.86	0.44
수역	-	-	0.1
나지	나지	0.12-0.81	0.442
습지	-	-	0.1

2.5 하폭

하폭은 하도 유출을 모의하기 위한 매개변수이다. GRM에서는 사다리꼴 비대칭 복단면을 모의할 수 있으며, 이 때 하폭은 하도에서의 통수단면적을 결정하는데 이용된다. 유역에서의 하천은 불규칙적인 복단면과 하폭을 형성하고 있으며, 이러한 다양한 하도의 형상을 모든 하천 격자에 대해서 입력하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 홍수 유출모의를 위해서는 객관성 있는 매개변수를 이용하여 모든 하천 격자에서 일관성 있는 모의결과를 얻을 수 있도록 하폭을 입력하는 것이 중요하다(오경두, 2009). GRM에서는 하천 격자별로 하폭이 설정된 ASCII 래스터 파일을 이용하는 방법, 격자에서의 흐름누적수를 이용하는 방법, 계획하폭 공식을 이용하는 방법을 적용할 수 있다.

2.5.1 흐름누적수를 이용하는 방법

유역 격자에서 흐름누적수는 하류에 있는 격자일수록 크며, 일반적으로 하폭 또한 하류의 하폭이 상류에 비해서 넓다. 흐름누적수를 이용하는 방법은 이러한 현상을 반영하여 흐름누적수에 비례하여 하폭을 설정하는 방법이다. 이때 임의 제어체적(CV_i)에서의 하폭은 식 (2.5.1)과 같이 계산할 수 있다. 유역에서 최하류에 있는 격자는 최대 흐름누적수를 가진다. 식 (2.5.1)을 이용해서 계산된 하폭은 최하류 격자에서 최댓값이 설정되고, 상류에 있는 격자일수록 작은 값이 설정된다. 식 (2.5.1)을 이용해서 하폭을 결정할 경우 최하류 격자에 해당하는 지점의 실측 하폭을 적용할 수 있으며, 이를 이용하여 상류 격자에 대해 일관된 방법으로 하폭을 설정할 수 있다(최윤석, 2010).

$$b_i = \frac{FA_i \times b_{\max}}{FA_{\max}} \quad (2.5.1)$$

여기서 b_i : CV_i 에서의 하폭, FA_{\max} : 최하류 제어체적의 흐름누적수, FA_i : CV_i 에서의 흐름누적수, b_{\max} : 최하류 제어체적에서의 하폭

2.5.2 계획하폭 공식을 이용하는 방법

한국의 건설교통부(2005)에서는 하도계획 수립시 계획홍수량에 따른 계획하폭의 설정을 위해서 경사와 유역 면적과 같은 지형적 특성을 이용한 경험공식을 제안하고 있다. 한국의 남부지방(호남, 영남)에서는 식 (2.5.2), 중부지방(경기, 강원, 충청북)에서는 식 (2.5.3)을 적용할 수 있다.

$$B = 1.698 \frac{A_w^{0.318}}{S_0^{0.5}} \quad (2.5.2)$$

$$B = 1.303 \frac{A_w^{0.318}}{S_0^{0.5}} \quad (2.5.3)$$

여기서 B : 하폭, A_w : 유역면적(km^2), S_0 : 하상경사

계획하폭 공식을 이용하여 격자별 하폭을 계산하기 위한 유역면적(A_w)으로는 각 격자별 유역면적을 적용하며, 격자별 유역면적은 해당 격자의 흐름누적수와 격자 면적의 곱으로 다음 식과 같이 계산된다. 또한 하상경사(S_0)는 모형의 입력자료인 경사 레이어에서 설정된 각 격자별 경사를 적용할 수 있다.

$$A_{wi} = (FA_i + 1) \times (\Delta y)^2 \quad (2.5.4)$$

여기서 A_{wi} : 임의 제어체적 i 의 유역 면적

2.6 초기포화도

초기포화도는 침투해석시 침투율, 최대 가능침투량 등을 계산할 때 사용되는 매개변수로써 유출해석 시점에서의 선행강우 등에 의한 토양의 포화도를 나타내고 있다. 초기포화도는 모형 보정 과정에서 "0~1"의 범위에서 추정되며, 선행강우가 클수록 1에 가까워질 수 있다. 격자별로 설정된 토양 포화도 래스터 자료가 있을 경우에는 사용자에게 의해서 초기포화도를 추정하지 않고, 이 자료를 이용하여 유출해석을 할 수 있다.

2.7 최소경사

운동파 모형에서는 유속의 계산을 위해서 마찰경사로 지면의 경사를 사용하고 있다. DEM의 flat area 보정 과정에서는 원본 DEM의 변형을 최소화하기 위해서 매우 작은 값의 고도 보정이 이루어지며, 따라서 flat area 처리 과정을 거친 영역의 지면 경사는 매우 작은 값을 가질 수 있다. 이와 같이 매우 작은 지면 경사를 운동파 모형에 적용할 경우에는 유속과 유량이 "0"에 가까운 값으로 계산되는 문제가 있다. 운동파 모형에 적용할 수 있는 최소 지면 경사에 대해서는 다수의 연구가 진행 된 바 있으며(Ponce 등, 1978; Woolhiser와 Liggett, 1967 등) 주로 0.0001 ~ 0.01의 범위에서 검토되었다. 또한 Henderson(1966)과 ASCE(1996)는 홍수파 해석시 0.002(10 *ft/mi*) 이상의 하상경사를 가지는 하천에서 운동파 모형을 적용하는 것이 적절함을 제시한 바 있다.

하도 및 지표면 최소경사 매개변수는 DEM의 flat area 보정 과정에서 발생된 매우 작은 경사값을 가지는 격자를 포함하고 있는 경사레이어를 운동파 모형에 적용하기 위해 사용자에게 의해서 추정되는 매개변수이다. 최소경사는 홍수추적에서 유속의 계산에 관여함으로써 유량과 홍수파의 도달시간에 영향을 미치게 되며, 유역과 하천의 특성 및 적용된 DEM의 특성을 고려하여 유출모의 과정에서 추정되어야 한다.

2.8 하도 조도계수

하도의 조도계수는 하도의 형태, 바닥의 구성 물질, 식생, 관리여부에 따라서 다양한 값을 가질 수 있다(Chow, 1959). Chow(1959)는 하도의 조도계수 선정에 대한 기존의 연구를 종합하여 다양한 하도 조건에 대한 조도계수를 제안한 바 있으며, 이 중 자연 하천에 대한 조도계수는 아래 표와 같다. Chaudhry(1993)는 자연 하천에서의 조도계수로 "Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools", "Bottom: gravels, cobbles, and few boulders" 및 "Bottom: cobbles with large boulders"를 제안하고 있으나, 실제 유출모의에서는 대상 유역의 하도 특성을 반영할 수 있는 하도 조건과 각 하도 조건별 조도계수의 범위 내에서 추정되는 것이 바람직하다.

표 2.8 자연 하천에서의 조도계수(Chow, 1959)

구 분		조도계수		
		최소	보통	최대
Streams on plain	Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
	Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
	Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
	Same as above, but some weeds and stones(㉠)	0.035	0.045	0.050
	Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
	Same as ㉠, but more stones	0.045	0.050	0.060
	Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
	Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stage	Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
	Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

2.9 건천차수

자연하천에서는 선행강우가 작을 경우 상류에 있는 하천은 건천일 경우가 있으며, 건천에서는 침투과정이 먼저 발생하게 된다. 건천에서의 초기 침투현상을 유출해석시 반영하기 위해서 GRM에서는 건천차수를 이용한다. 입력된 하천망이 조밀할 경우 선행강우량, 하천유출량 등을 고려하여 건천차수를 입력할 수 있으며, 건천으로 설정된 하천의 초기 유량은 0으로 설정된다. 건천차수는 "0 ~ 최대하천차수"의 범위에서 추정된다. 건천차수 매개변수를 유출해석시 적용하기 위해서는 하천망 래스터 파일에 하천차수가 입력되어 있어야 한다. HyGIS 등과 같은 수문학적 지형정보 생성 소프트웨어를 이용해서 하천망 데이터의 셀 값으로 하천차수를 입력할 수 있으며, 최대하천차수 또한 하천망 데이터를 통해서 확인할 수 있다.

2.10 매개변수 보정계수

유출모의에 적용된 토지피복과 토양 속성에 부여된 조도계수와 Green-Ampt 모형의 매개변수를 일정한 비율로 보정하고자 할 경우에는 각각의 매개변수에 대한 보정계수를 적용할 수 있다. 매개변수 보정계수는 모의 대상 전체 격자에 대해서 각 매개변수에 곱해지는 값으로 1을 입력할 경우 대상 매개변수는 초기에 설정된 값이 그대로 유출모의에 적용된다.

2.11 매개변수 추정

물리적 모형에서는 현장조사에 의해서 구축된 공간자료를 이용하여 설정된 매개변수는 실제 값을 대표한다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 따라서 유출해석 과정에서 사용자에게 의해서 추정되는 주요 매개변수는 초기포화도, 하도 최소경사, 하도 조도계수, 투수계수, 토양심 등과 같이 모든 셀에 대해서 관측값의 설정이 어렵고, 불확실성과 유출해석 민감도가 상대적으로 큰 매개변수를 대상으로 한다.

GRM 모형은 호우사상의 유출모의를 목적으로 하고 있다. 그러므로 모형 보정은 첨두유량, 첨두시간 및 총유출량에 대해서 실측 수문곡선을 재현하는 것을 주요 대상으로 하며, 계산된 수문곡선의 전체적인 형태가 관측수문곡선을 잘 재현하는지를 추가적으로 고려한다. 모형의 보정은 유출모의시 일반적으로 적용되는 시행착오법을 비롯한 다양한 최적화 기법을 적용할 수 있다.

모형의 적합도 평가는 첨두유량, 첨두시간, 총유출량에 대한 상대오차, 시계열 자료의 평균제곱근오차(RMSE), 정규화된 평균제곱근오차(nRMSE), 평균상대오차(MAPE), 상관계수(CC), 모형 효율계수(ME, Nash-Sutcliffe efficiency) 등 다양한 목적함수를 이용할 수 있다.

3. 다지점 보정

대부분의 분포형 모형에서는 단일 유역에 대해서 동일한 격자 크기를 가지도록 모형을 구축하고, 격자별로 설정된 하나의 매개변수군을 이용한 유출해석을 수행하고 있다. 이때 상이한 유출특성을 가지는 다수의 소유역을 포괄하는 유역(Ajami et al, 2004)의 경우 하나의 매개변수군을 이용한 유출해석은 소유역의 물리적 및 수문학적 특성이 모형에 적절히 반영되기 어려운 문제점이 있다.

분포형 모형은 격자로 구분된 유역내 임의 지점에 대해서 손쉽게 유출해석 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다(Beven and O'Connell, 1982). 이때 모형 보정지점 외의 다른 임의 지점에 대한 유출해석 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 유출해석 결과를 출력하는 지점의 유역과 모형 보정지점 유역 간에 물리적, 수문학적 유사성을 확보할 수 있도록 모형을 구축해야 한다(Pilgrim, 1983; Dawson et al., 2006). 모형 보정 유역과 유출해석 결과를 출력하는 유역의 물리적, 수문학적 유사성을 확보하기 위한 가장 직관적인 방법은 유출해석 결과의 출력 지점과 가까운 지점에 대해서 모형을 보정할 수 있도록 모형을 구축하는 것이며(Ajami et al., 2004; Merz, R. and Blöschl, 2004; Young, 2006), 이를 위해서는 유역내 다수의 지점에 대해서 모형을 보정(다지점 보정)할 수 있어야 한다.

다지점 보정 기법은 하나의 유역시스템에서의 다지점 보정과 다수의 소유역시스템을 연계한 다지점 보정으로 구분된다. 하나의 유역은 유역내에 검증 가능한 유량 관측소가 다수 있을 경우, 이를 이용하여 다수의 소유역으로 분할 할 수 있다. 단일 유역 다지점 보정 기법은 하나의 유역에 있는 다수의 유량관측소를 기준으로 구분된 소유역 영역들에 대해서 해당 관측유량을 이용해서 일괄적으로 모형을 보정할 수 있는 기법이다. 이 기법에서 모든 소유역은 같은 크기의 격자로 구성되어 있으므로 소유역별로 다양한 해상도를 적용할 수 없으나, 하나의 유역내 다수의 지점에 대해서 간편하게 모형을 보정할 수 있는 장점이 있다.

소유역 연계 다지점 보정 기법은 GRM 모형의 flow control 모듈을 이용하여 각 유역의 유출해석 결과를 연계함으로써 다수의 유역을 합친 전체 영역에 대한 유출해석 결과를 향상시킬 수 있는 기법이다. 이때 각 소유역은 독립된 유역시스템으로써 서로 다른 해상도를 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 소유역별 특성에 적합한 자료를 개별적으로 적용함으로써 각 소유역의 특성을 최대한 반영할 수 있는 장점이 있다. 또한 각 소유역은 개별적 프로세스에 의해서 유출해석이 진행되므로, 프로세스 분할에 의한 병렬계산 효과로 인하여 전체 유역 계산에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다. 일반적인 수문사상 모의에서 소유역 연계 다지점 보정기법은 하나의 유출해석 결과 시계열 전체를 다른 유역의 flow control 모듈에 일괄 적용하는 과정을 거친다. 그러나 GRM 모형의 실시간 해석모듈(GRM Real Time)을 이용하는 실시간 유출해석시스템에서는 강수자료 뿐만 아니라 Flow control 입력자료 또한 실시간으로 입력되어야 하며, 각 소유역이 동적으로 연계되어 유출해석이 진행된다.

3.1 단일 유역 다지점 보정 기법

단일 유역 다지점 보정 기법은 동일한 격자 크기를 가지는 유역에 대해서 하나의 유역시스템으로 모형을 구축하고, 유역내 다수의 유량관측소에 대해서 일괄적으로 모형을 보정하기 위한 기법이다. 소유역 구분된 유역 래스터 자료를 이용하여 소유역별로 매개변수를 설정하고, 소유역별로 모형을 보정한다. 다지점 보정 모듈에서는 임의 유역에 대해서 설정된 매개변수를 상류 영역 전체에 적용하는 것을 기본 정책으로 하며, 상류에 있는 소유역 중 매개변수를 설정한 소유역이 없을 경우에는 단일 매개변수군이 적용된다(최윤석 등, 2012).

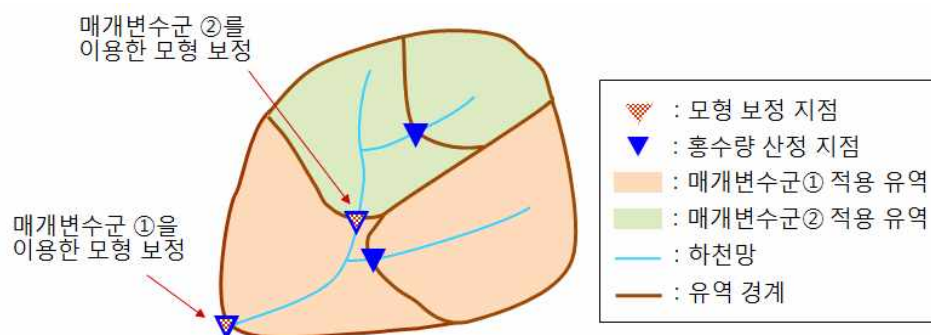


그림 3.1 다지점 보정 매개변수 적용 방법

GRM 모형은 xml 형식의 프로젝트 파일을 이용해서 모델링 프로젝트의 환경과 매개변수를 저장한다. 다지점 보정 정보는 xml 프로젝트 파일에서 소유역 매개변수 테이블(SubWatershedSettings)로 저장된다. 소유역 매개변수 테이블은 소유역 번호를 키 값으로 하고, 소유역별로 입력된 매개변수를 저장하고 있다. (4.5 GRM 프로젝트 파일 참고).

3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법

다양한 수문학적 특성과 면적을 가지는 유역에 대해 물리적 모형을 이용하여 신뢰성 있는 유출해석을 수행하기 위해서는 각 유역의 특성에 적합한 모형의 구축이 필요하다. 분포형 모형을 이용한 유출해석에서는 일반적으로 단일 유역 시스템에 대해서 동일한 격자크기를 가지도록 모형을 구축하고, 하나의 매개변수군을 이용하였다. 그러나 상이한 수문학적 특성을 가지는 다수의 소유역에 대해서 단일 격자 크기로 모형을 구축하고 단일 매개변수군을 이용해서 모형을 보정할 경우, 소유역의 물리적 및 수문학적 특성이 적절히 반영되기 어렵다. 그러므로 유역 특성별로 각기 다른 유역 시스템을 구축하고, 각 유역 시스템을 통합 모델링 할 수 있는 기술이 필요하다.

소유역 연계 다지점 보정 기법은 GRM의 Flow control 모듈을 이용해서 소유역별로 모형을 구축하고, 각 소유역의 유출해석 결과를 연계함으로써 전체 유역의 유출해석을 수행하는 기법이다. 이때 상류에 있는 유역의 유출해석 결과는 Flow control 모듈의 Inlet 기능을 이용

하여 하류 소유역으로 전달된다(한국건설기술연구원, 2015). 소유역 연계 다지점 보정 기법에서 각 유역별 유출해석을 동적으로 실행시키기 위해서는 GRM의 실시간 해석 모듈 (GRM RT)을 적용한다. GRM RT에서는 강수량뿐만 아니라, 댐방류량과 같이 flow control 모듈의 입력자료를 실시간으로 입력하여 유출해석을 수행한다. 그러므로 하류 유역에서는 상류 유역의 모의결과를 실시간으로 전달 받아서 전체 유역을 동적으로 모의할 수 있다. GRM RT의 사용방법은 본 사용설명서의 GRM RT 부분을 참고할 수 있다.

소유역 연계 기반의 다지점 보정 기법에서는 소유역별 특성을 반영하여 격자 크기를 다르게 모형을 구축할 수 있으며, 소유역별로 최적화된 모형 보정이 가능하다. 이를 통해서 단일 유역 시스템에서 최하류 지점만을 보정한 유출해석 결과에 비해 유역내 임의 지점에 대한 유출해석 결과를 향상시킬 수 있다. 그러나 각 유역별 입력자료를 독립적으로 구축하고 모형보정 또한 유역별로 분리된 프로세스에서 수행해야 하는 불편함이 있다. 이러한 모형구축 과정은 매우 복잡할 뿐만 아니라, 소유역간의 유량보존 및 홍수추적 문제를 안정적 해석하고 모델링 시스템을 신뢰성 있게 운영하기 위해서는 많은 노력이 필요하다.

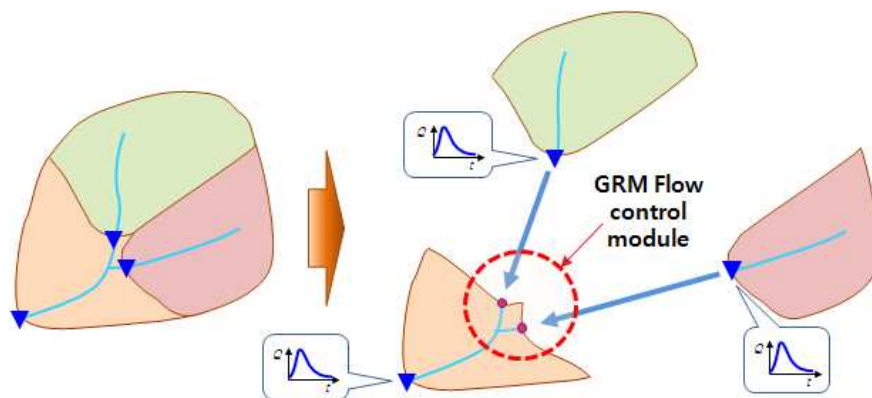


그림 3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법의 개념도

4. 입력자료

GRM은 프로젝트 단위로 실행된다. GRM 모형의 프로젝트 파일은 .gmp의 확장자를 가지며, xml 형식으로 저장된다. GRM 프로젝트 파일에는 GRM 실행에 필요한 입력자료와 모의 환경, 매개변수 등을 저장하고 있다. DEM 분석을 통해서 만들어지는 유역, 경사, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망 파일은 수문학적 공간정보를 생성할 수 있는 GIS 도구를 이용해서 생성할 수 있다. 입력자료 생성을 위한 GIS 도구는 HyGIS, ArcGIS, TauDEM, QGIS Drainage plug-in 등과 같이 DEM 분석을 통한 수문학적 공간정보 생성 도구를 포함하고 있는 범용 S/W를 이용할 수 있다. GRM은 래스터 파일로 ASCII 포맷을 이용한다. 그러므로 GIS 도구를 이용해서 생성된 다양한 포맷의 데이터를 ASCII 포맷으로 변환하여 모형에 적용한다. 아래의 표는 GRM에서 모의되는 각 수문성분별로 필요한 입력자료를 나타낸 것이다. GRM은 모의할 개별 수문성분을 선택할 수 있으므로, 홍수사상 모의, 연속형 모의, 모의할 수문성분에 따라서 입력자료의 종류를 다르게 구성할 수 있다.

표 4.1 GRM의 입력자료 및 적용대상

Original data		Input data	Continuous simulation							Data Format
			Flood event simulation				INTCP	ET	SM	
			INF	SSF	BF	FC				
Geographic data	DEM	Watershed	●	●	●	●	●	●	●	ASCII raster
		Flow direction	●	●	●	●	●	●	●	
		Flow accumulation	●	●	●	●	●	●	●	
		Slope	●	●	●	●	●	●	●	
		Stream	○	○	○	○	○	○	○	
	Channel width		△	△	△	△	△	△	△	
	Land cover map	Land cover	○	○	○	○	●	●	○	
	Soil map	Soil texture	○	○	○	○	○	○	○	
		Soil depth	○	○	○	○	○	○	○	
Weather data		Precipitation	●	●	●	●	●	●	●	ASCII raster Text
		Max. temperature	-	-	-	-	-	●	●	
		Min. temperature	-	-	-	-	-	●	-	
		Daytime length	-	-	-	-	-	●	-	
		Daytime hours ratio	-	-	-	-	-	△	-	Text
		Solar radiation	-	-	-	-	-	●	-	ASCII raster Text
		Snow pack temperature	-	-	-	-	-	-	●	
Hydrological data		Observed flow(stream, dam)	-	-	-	●	-	-	-	Text
		Initial soil saturation ratio	△	△	△	△	△	△	△	ASCII raster
		Initial stream flow	△	△	△	△	△	△	△	
Parameter file		LAI	-	-	-	-	●	-	-	Text
		Blaney-Criddle crop coeff.	-	-	-	-	-	△	-	Text

- ● : Required, ○ : Optional (recommended), △ : Optional

- INF : Infiltration, SSF : Subsurface flow, BF : Base flow, INTCP : Interception, ET : Evapotranspiration, SM : Snow melt, FC : Flow control

4.1 공간자료

GRM은 ASCII 포맷의 래스터 데이터를 입력자료로 이용하며, GRM 모형 구동에 필요한 래스터 자료는 다음의 표와 같다. GRM에서 사용하는 흐름방향 정보는 D8 방법에 의한 단방향 흐름정보로서, 흐름방향 래스터 데이터의 값(흐름방향 인덱스)에 의해서 흐름방향을 판단한다. GRM에서는 1시 방향(북동, NE)을 1로 설정하는 방법과 12시 방향(북, N)을 1로 설정하는 방법, 3시 방향(동, E)을 1로 설정하는 방법 및 TauDEM의 흐름방향 설정 방법을 모두 적용할 수 있다. DEM으로부터 흐름방향 정보를 생성하는 경우, GIS S/W 마다 흐름방향에 대응하는 인덱스가 각기 다를 수 있으므로, 흐름방향 데이터 적용시 주의해야 한다.

표 4.2 GRM 입력 공간자료

자료명		정의	데이터 형
한글	영문		
모의영역 (혹은 유역)	Domain (or watershed)	유역 영역이 구분된 래스터 파일	Integer
경사	Slope	격자별로 부여된 최급경사 정보	Double
흐름방향	FlowDirection	D8 방법에 의한 단방향 흐름 정보	Integer
흐름누적수	FlowAccumulation	흐름누적수	Integer
하천망	Stream	하천망	Integer
하폭	ChannelWidth	하천망과 동일한 위치에 입력된 하폭 정보	Real
토성	SoilTexture	토성	Integer
토양심	SoilDepth	토양심	Integer
토지피복도	LandCover	토지피복	Integer

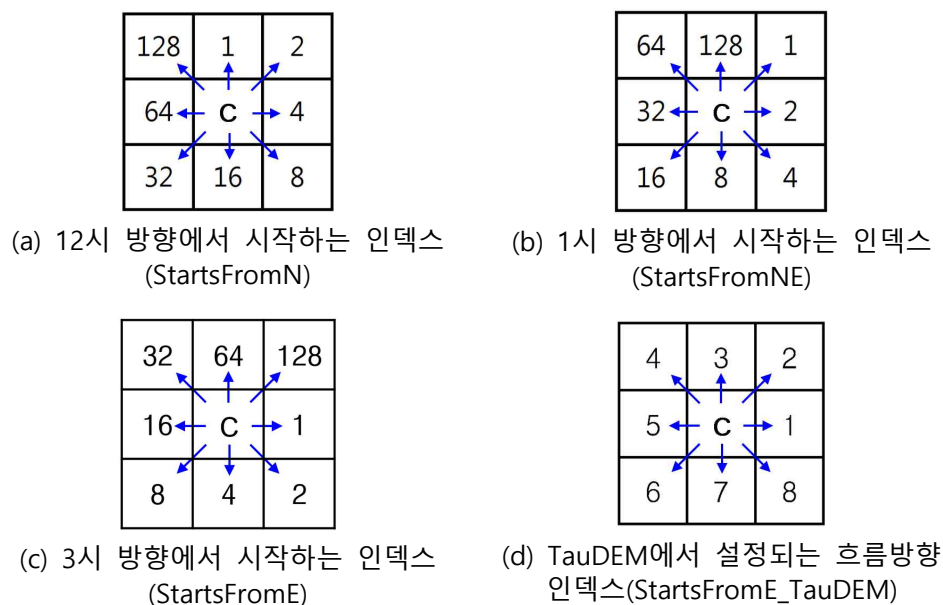
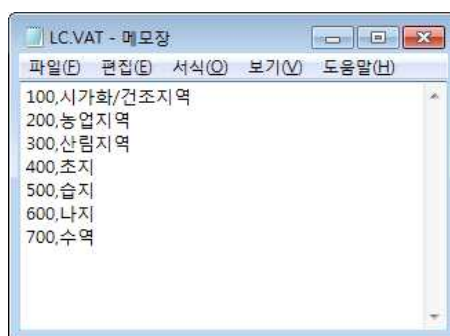
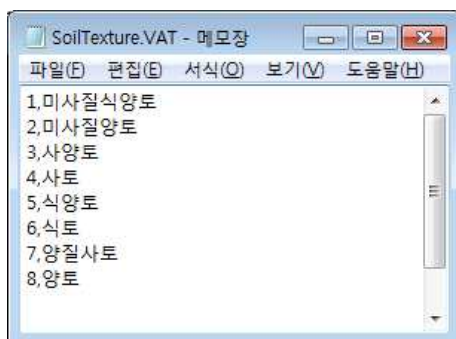


그림 4.1 흐름방향 인덱스

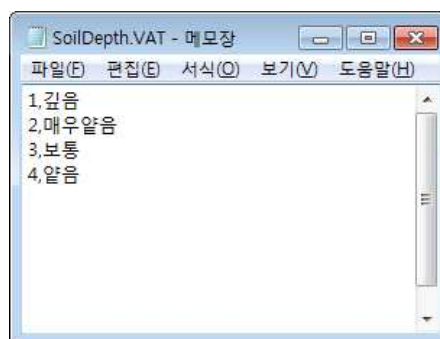
토지피복과 토성, 토양심 래스터 파일은 숫자로 그 값이 입력되어 있다. 그러므로 각 래스터 파일에 포함된 숫자와 실제 유출해석에 사용할 속성의 대응이 필요하며, 이 정보는 GRM 모형의 프로젝트 파일(.gmp)에 저장된다. GRM 모형의 GUI인 QGIS-GRM에서는 이를 위해서 VAT(Value Attribute Table) 텍스트 파일을 이용한다. VAT 파일은 텍스트 편집기를 이용해서 사용자가 직접 작성하거나, GIS 소프트웨어를 이용해서 자동으로 생성할 수도 있다. 토지피복과 토양에 관련된 모형의 매개변수는 GRM Static DB(예를 들어, C:\WGRMWGRMStaticDB.xml)에 저장되어 있으며, 이를 이용하여 각 속성별 매개변수의 기본 값을 설정한다.



(a) 토지피복 VAT 파일



(b) 토성 VAT 파일



(c) 토양심 VAT 파일

그림 4.2 VAT 파일 예시

4.2 기상자료

GRM에서는 텍스트로 된 유역 평균 기상자료와 공간 분포된 기상자료 래스터 파일(ASCII 파일)을 선택해서 적용할 수 있다. ASCII 래스터 파일을 이용할 경우에는 ASCII 파일 목록이 저장된 텍스트 파일을 gmp 파일에 명시한다. 분포형 래스터 자료는 관측소에서 관측된 지점 값을 공간보간하거나 레이더 혹은 수치예보자료 등과 같은 분포형 자료를 이용하여 생성한다. 유역 평균값을 이용할 경우에는 기상자료 값이 저장되어 있는 텍스트 파일을 gmp 파일에 명시한다. 텍스트 파일 작성 방법은 전체 domain에서 하나의 평균값 시계열 자료를 이용할 경우에는 기상자료 평균값을 하나의 열로 입력한다. 모의 domain을 몇 개의 영역으로 구분하고, 영역별로 각기 다른 기상자료 평균값을 적용할 경우에는, 텍스트 파일의 첫 번째 행에 domain 영역을 구분하는 래스터 값을 입력하고, 두 번째 행부터 그 영역에 해당하는 기상자료 평균값을 입력한다. 각 영역의 자료는 콤마로 구분한다. “연일조시간에 대한 일일조시간의 비율”은 자료는 유역 평균값을 적용하며, 12개(1월 ~ 12월)의 값을 순차적으로 텍스트 파일에 입력한다.

표 4.3 입력 기상자료

자료명	작성 방법	데이터 형
강수	격자 분포형 강수량(mm) ASCII 파일 혹은 유역 평균 강수량(mm) 텍스트 파일	Real
일최고 기온	격자 분포형 일최고 기온(°C) ASCII 파일 혹은 유역 평균 일최고 기온(°C) 텍스트 파일	Real
일최저 기온	격자 분포형 일최저 기온(°C) ASCII 파일 혹은 유역 평균 일최저 기온(°C) 텍스트 파일	Real
일조시간	격자 분포형 일조시간(hr) ASCII 파일 혹은 유역 평균 일조시간(hr) 텍스트 파일	Real
연일조시간에 대한 일일조시간의 비율	유역 평균 연간 일조시간에 대한 월별 일간 일조시간의 비율	Real
일사량	격자 분포형 일사량(mm/day) ASCII 파일 혹은 유역 평균 일사량(mm/day) 텍스트 파일	Real
Snow pack 온도	격자 분포형 snow pack 온도(°C) ASCII 파일 혹은 유역 평균 snow pack 온도(°C) 텍스트 파일	Real

4.3 수문자료

GRM 모델의 입력으로 사용되는 수문자료는 하천 혹은 댐에서의 관측 유량(혹은 방류량), 전체 격자에 대한 토양 초기포화도, 전체 하천 격자에서의 초기 유량이다. 모의시점에서의 모델 보정지점의 관측 유량은 하천 유량의 초기값으로 사용된다. 댐 방류량을 유출모의에 적용하기 위해서는 관측된 방류량 값을 이용해야 한다. 전체 격자에 대해서 값이 설정된 토양 포화도, 하천 유량 ASCII 래스터 파일이 있을 경우에는 각 파일의 값을 전체 격자에서 초기조건으로 적용할 수 있다. ASCII 래스터 포맷으로 저장된 초기포화도 자료를 적용할 경우에는 초기포화도 매개변수가 모델 보정 과정에서 추정되지 않는다.

표 4.4 입력 수문자료

자료명	정의	데이터 형
유량	- 하천상 특정 지점에서 계측된 하나의 유량(CMS) 값 - 저수지 방류량 (CMS) 시계열 자료	Real
토양 포화도 래스터 파일	ASCII 래스터 파일로 저장된 모든 격자에서의 토양 포화도	Real
하천 유량 래스터 파일	ASCII 래스터 파일로 저장된 모든 하천 격자에서의 유량	Real

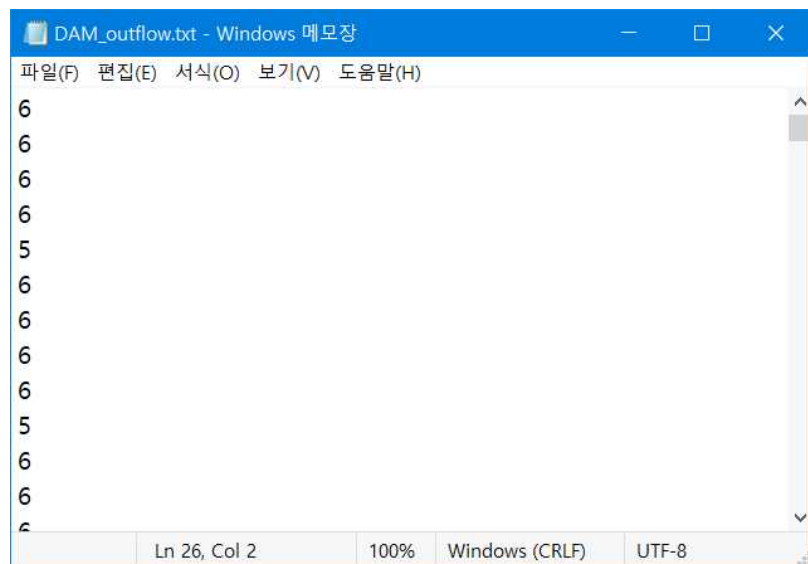


그림 4.4 방류량 입력파일 사례

4.4 매개변수 파일

GRM 모델에서 사용하는 매개변수 중 파일로 입력하는 것은 차단 모의에 사용되는 LAI 값과 잠재증발산 산정 방법 중 Blaney-Criddle 방법에서 사용되는 작물계수이다. 각 매개변수 파일을 작성한 사례는 다음 그림과 같다. LAI 값은 토지피복 속성별로 월별 LAI 값이 텍스트 파일로 저장된다. 각 자료는 콤마로 구분되며, 첫 번째 항목으로는 토지피복 속성을 구분하는 래스터 파일의 값을 입력하고, 그 토지피복 속성에 해당하는 1월 ~ 12월의 LAI 값을 순서대로 입력한다. Blaney-Criddle 작물계수는 1월 ~ 12월에 해당하는 값을 순차적으로 텍스트 파일에 입력한다.

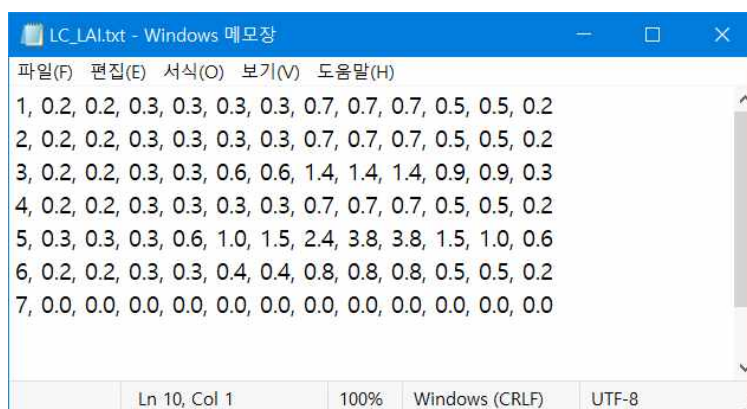


그림 4.5 LAI 데이터 파일 작성 사례

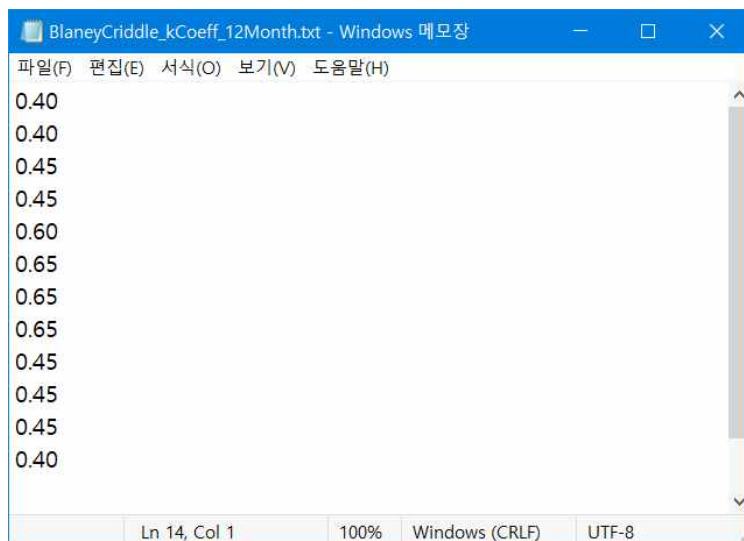


그림 4.6 Blaney-Criddle 작물계수 파일 작성 사례

4.5 GRM 프로젝트 파일

GRM은 프로젝트 파일 (.gmp)을 이용해서 실행된다. GRM을 콘솔 창(Console window)에서 실행하기 위해서는 아래와 같이 gmp 파일을 지정해서 실행한다.

(예를 들어, D:\Wgrm.exe "*projectFilePathAndName.gmp*")

gmp 파일은 xml DB 형식으로 저장된다. gmp 파일에 포함된 테이블과 각 테이블의 내용, 각 테이블의 필드 이름 및 설명, 각 필드의 설정 방법 등은 다음의 표와 같다. gmp 파일은 사용자가 텍스트 에디터를 이용해서 작성할 수도 있으나, 일부 항목(격자 위치 등)은 직관적으로 그 값을 얻기 어려운 것도 있다. 그래서 gmp 파일은 GRM 모형의 GUI S/W(QGIS plug-in QGIS-GRM 등)를 이용해서 자동으로 생성하는 것이 편리하다.

gmp 파일에 한글이 포함되어 있을 경우에는 UTF-8 포맷으로 저장해야 하며, 한글이 포함되어 있지 않을 경우에는 ANSI 혹은 UTF-8 포맷으로 저장하면 된다.

표 4.5 프로젝트 xml 파일에서의 테이블 정의

테이블 명	설명	필수 여부
ProjectSettings	모형 실행을 위한 환경설정, 입력파일, 글로벌 매개변수	필수
SubWatershedSettings	소유역별로 설정된 매개변수	필수
WatchPoints	사용자 지정 출력 대상 격자 정보	필수
FlowControlGrid	사용자 지정 흐름조절 대상 격자, 흐름조절 형태, 자료의 특성, 저수지 제원, ROM 정보	필수
ChannelSettings	유역별 하도 형태 매개변수	필수
GreenAmptParameter	입력된 토성 자료 속성과 유출모의에 적용된 Green-Ampt 매개변수	필수
SoilDepth	입력된 토양심 자료 속성과 유출모의에 적용된 토양심 값	필수
LandCover	입력된 토지피복 자료 속성과 유출모의에 적용된 조도계수 및 불투수율	필수

표 4.6 ProjectSettings 테이블 명세서

필드 명	설명	데이터 형식	필수 여부
GRMSimulationType	모델링 형식(Normal 혹은 RealTime)	String	필수
DomainFile	유역 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
SlopeFile	경사 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
FlowDirectionFile	흐름방향 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
FlowAccumFile	흐름누적수 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
StreamFile	하천망 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
ChannelWidthFile	하폭 ASCII 파일 경로와 이름	String	선택
InitialChannelFlowFile	초기 유량 ASCII 파일 경로와 이름 하천 격자에 대해서만 값이 입력됨	String	선택
InitialSoilSaturationRatioFile	토양 초기포화도 ASCII 파일 경로와 이름	String	선택
LandCoverDataType	토피지복 자료 형식(File 혹은 Constant)	String	필수
LandCoverFile	토피지복 ASCII 파일 경로와 이름 LandCoverDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
LandCoverVATFile	토피지복 ASCII 파일 VAT 파일 경로와 이름 LandCoverDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용(한글이 포함되면 UTF-8 포맷으로 저장)	String	선택
ConstantRoughnessCoeff	토지피복 조도계수 값 LandCoverDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택
ConstantImperviousRatio	불투수율 값 LandCoverDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택
LAIFile	토지피복 속성별, 월별 LAI 값이 저장된 파일의 경로와 이름. 차단을 모의할 경우에만 사용	String	선택
BlaneyCriddleCoefDataFile	Blaney-Criddle 작물계수 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
SoilTextureDataType	토성 자료 형식(File 혹은 Constant)	String	필수
SoilTextureFile	토성 ASCII 파일 경로와 이름 SoilTextureDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
SoilTextureVATFile	토성 ASCII 파일 VAT 파일 경로와 이름 SoilTextureDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용(한글이 포함되면 UTF-8 포맷으로 저장)	String	선택
ConstantSoilPorosity	공극률 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택
ConstantSoilEffPorosity	유효 공극률 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택

<ProjectSettings 테이블 명세서(계속)>

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
ConstantSoilWetting-FrontSuctionHead	습윤전선 흡인수두 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택
ConstantSoilHydraulic-Conductivity	수리전도도 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택
SoilDepthDataType	토양심 자료 형식(File 혹은 Constant)	String	필수
SoilDepthFile	토양심 ASCII 파일 경로와 이름 SoilDepthDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용(한글이 포함될 경우, UTF-8 포맷으로 저장)	String	선택
SoilDepthVATFile	토양심 ASCII 파일 VAT 파일 경로와 이름 SoilDepthDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
ConstantSoilDepth	토양심 값 (cm) SoilDepthDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Real	선택
PrecipitationDataFile	강수 자료 파일의 경로와 이름	String	필수
PrecipitationInterval_min	강수 자료의 시간 간격(분)	Integer	필수
TemperatureMaxDataFile	일최고 기온 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
TemperatureMaxInterval_min	일최고 기온의 시간 간격(분, 1440)	Integer	선택
TemperatureMinDataFile	일최저 기온 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
TemperatureMinInterval_min	일최저 기온 자료의 시간 간격(분, 1440)	Integer	선택
DaytimeLengthDataFile	일조시간 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
DaytimeLengthInterval_min	일조시간 자료의 시간 간격(분, 1440)	Integer	선택
DaytimeHoursRatioDataFile	년간 일조시간에 대한 일간 일조시간의 비율 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
SolarRadiationDataFile	일사량 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
SolarRadiationInterval_min	일사량 자료의 시간 간격(분, 1440)	Integer	선택
SnowPackTemperatureData File	Snow pack 온도 자료 파일의 경로와 이름	String	선택
SnowPackTemperature-Interval_min	Snow pack 온도 자료의 시간 간격(분, 1440)	Integer	선택

<ProjectSettings 테이블 명세서(계속)>

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
FlowDirectionType	흐름방향 정보의 형식 StartsFromN, StartsFromNE, StartsFromE, StartsFromE_TauDEM 중 하나 선택	String	필수
MaxDegreeOfParallelism	CPU를 이용한 최대 병렬화 개수. -1을 입력하거나, 설정하지 않을 경우에는 최대값이 설정됨.	Integer	선택
SimulationStartingTime	모의기간 시점. 시간 포맷이 설정된 경우에는 DateTime format으로 입력(예, 2012-09-16 12:00). 그렇지 않을 때는 0을 사용	String	필수
SimulationDuration_hr	모의 기간(시간)	Integer	필수
ComputationalTimeStep_min	계산 시간 간격(분)	Integer	필수
IsFixedTimeStep	고정된 계산시간 간격 사용 여부 (true 혹은 false) 설정하지 않을 경우에는 true가 적용됨	String	선택
OutputTimeStep_min	출력 시간 간격(분)	Integer	필수
SimulateInfiltration	침투 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateSubsurfaceFlow	지표하 유출 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateBaseFlow	기저유출 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateInterception	차단 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateEvapotranspiration	증발산 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateSnowMelt	용설 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateFlowControl	Flow control 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
MakeIMGFile	래스터 이미지 파일 생성 여부 (true 혹은 false)	String	필수
MakeASCFile	ASCII 래스터 파일 생성 여부 (true 혹은 false)	String	필수
MakeSoilSaturationDistFile	토양포화도 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
MakePRCPDistFile	강수 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
MakePRCPaccDistFile	누적강수 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
MakeFlowDistFile	유량 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수

<ProjectSettings 테이블 명세서(계속)>

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
PrintOption	모의 결과 파일 출력 옵션 (All, DischargeFile, DischargeAndFcFile, AverageFile, DischargeFileQ, AverageFileQ, AllQ 중 택 1) - All : 모든 모의 결과 출력 - DischargeFile : *_Discharge.out 파일만 생성하고, 그 외의 파일을 생성하지 않음 - DischargeAndFcFile : *_Discharge.out 파일과 Flow control 모의결과 파일만 생성하고, 그 외의 파일을 생성하지 않음 - AverageFile : *_Ave.out 파일만 생성함 - DischargeFileQ : *_Discharge.out 파일만 생성하고, 유량 값만 출력 - AverageFileQ : *_Ave.out 파일만 생성하고, 유량 값만 출력 - AllQ : 모든 모의 결과 파일을 생성하고, 유량 값만 출력	String	필수
PrintAveValue	출력시간 간격 동안의 평균값 출력여부 (*_Ave.out 파일 생성) (true 혹은 false)	String	필수
AveValueTimeInterval_min	평균값 계산 및 출력 시간 간격(분) 입력하지 않으면, 출력 시간 간격(OutputTimeStep)과 같은 값이 적용됨	Integer	선택
WriteLog	상세 로그 기록 여부 (true 혹은 false)	String	필수
AboutThisProject	프로젝트 설명 사용자 입력	String	선택
AboutWatershed	유역 설명 사용자 입력	String	선택
AboutLandCoverMap	강우자료 설명 사용자 입력	String	선택
AboutSoilMap	토성도 설명 사용자 입력	String	선택
AboutSoilDepthMap	토양심도 설명 사용자 입력	String	선택
AboutPRCP	강수자료 설명 사용자 입력	String	선택

표 4.7 SubWatershedSettings 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
ID	매개변수 적용 영역(유역 등) 구분자. 0보다 큰 정수 입력	Integer	필수
IniSaturation	초기포화도 매개변수(0~1 사이의 값 입력) 토양포화도 ASCII 파일이 입력된 경우에는 이 매개변수는 유출해석에 사용되지 않음	Real	필수
MinSlopeOF	지표면흐름 최소 바닥 경사 조건 매개변수	Real	필수
MinSlopeChBed	하도흐름 최소 바닥 경사 조건 매개변수	Real	필수
MinChBaseWidth	최소 하폭 조건 (m)	Real	필수
ChRoughness	하도 조도계수	Real	필수
DryStreamOrder	건천차수. 하천 차수를 입력하며, 0을 입력한 경우에는 건천차수 적용하지 않음	Integer	필수
IniFlow	초기 유량 (m ³ /s). 대상 유역 하천 최하류 지점에서의 모의시점에서의 관측유량 입력 초기유량 ASCII 파일이 입력된 경우 사용 안됨	Real	필수
UnsaturatedKType	불포화투수계수 계산 방법 (Constant, Linear, Exponential 중 택 1). 'Constant'를 입력할 경우에는 Green-Ampt 매개변수에서 제시된 투수계수 값에 'CoefUnsaturatedK'가 곱해진 고정값으로 적용됨	String	필수
CoefUnsaturatedK	불포화투수계수 계산을 위한 계수 'UnsaturatedKType'이 'Linear'인 경우에는 0.2, 'Exponential'인 경우에는 6.4, 'Constant'인 경우에는 0.1이 기본값으로 적용됨	Real	필수
CalCoefLCRoughness	토지피복도에 의해 설정된 조도계수 보정계수	Real	필수
CalCoefPorosity	토양 공극율 보정계수	Real	필수
CalCoefWFSuctionHead	토양 습윤전선 흡인수두 보정계수	Real	필수
CalCoefHydraulicK	토양 수리전도도 보정계수	Real	필수
CalCoefSoilDepth	토양심 보정계수	Real	필수
InterceptionMethod	차단 모의 방법 (LAIratio). 차단 모의시 입력	String	선택
PETMethod	잠재증발산 모의 방법 (BlaneyCriddle, Hamon, PriestleyTaylor, Hargreaves 중 택 1). 증발산 모의시 입력	String	선택
ETCoef	실제 증발산 계산을 위한 계수. 증발산 모의시 입력	Real	선택
SnowmeltMethod	용설 모의 방법 (Anderson). 용설모의시 입력	String	선택
TempSnowRain	강수가 눈과 비로 변화되는 기준 온도 (°C) 용설모의시 입력	Real	선택
SnowmeltingTemp	Snow pack에서 용설이 시작되는 온도 (°C) 용설모의시 입력	Real	선택
SnowCovRatio	제어체적 격자에서 snow pack이 차지하는 면적비 용설모의시 입력	Real	선택
SnowmeltCoef	용설계수. 용설모의시 입력	Real	선택
UserSet	현재 유역의 매개변수가 사용자에게 의해서 설정된 매개변수인지 여부 (true 혹은 false)	String	필수

표 4.8 ChannelSettings 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
WSID	최하류에 있는 소유역 ID(래스터 값). 0보다 큰 정수 입력	Integer	필수
CrossSectionType	하도 단면 형식 (CSSingle 혹은 CSCCompound)	String	필수
SingleCSChannel-WidthType	하폭 계산 방법 (CWGeneration 혹은 CWEquation)	String	필수
ChannelWidthEQc	하폭 계산식 계수 'SingleCSChannelWidthType'이 CWEquation 인 경우에만 사용	Real	선택
ChannelWidthEQd	하폭 계산식 계수 'SingleCSChannelWidthType'이 CWEquation 인 경우에만 사용	Real	선택
ChannelWidthEQe	하폭 계산식 계수 'SingleCSChannelWidthType'이 CWEquation 인 경우에만 사용	Real	선택
ChannelWidthMostDown-Stream	하천 최하류 지점의 하폭 (m) 'CrossSectionType'이 CSCCompound 인 경우에만 사용	Real	선택
LowerRegionHeight	하도 복단면에서 저수부 높이 'CrossSectionType'이 CSCCompound 인 경우에만 사용	Real	선택
LowerRegionBaseWidth	하도 복단면에서 저수부 바닥 하폭 'CrossSectionType'이 CSCCompound 인 경우에만 사용	Real	선택
UpperRegionBaseWidth	하도 복단면에서 고수부 바닥 하폭 'CrossSectionType'이 CSCCompound 인 경우에만 사용	Real	선택
CompoundCSChannel-WidthLimit	복단면 하도를 적용할 하폭 제한 범위 (이 값 이하의 하폭을 가지는 하천 구간은 단단면 적용) 'CrossSectionType'이 CSCCompound 인 경우에만 사용	Real	선택
BankSideSlopeRight	우측 제방 경사	Real	필수
BankSideSlopeLeft	좌측 제방 경사	Real	필수

표 4.9 WatchPoints 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
Name	Watch point 이름	String	필수
ColX	Watch Point 격자의 위치. 열 번호 좌상단(0,0)으로 부터 번호 부여 (최대값은 열의 개수 - 1)	Integer	필수
RowY	Watch Point 격자의 위치. 행 번호 좌상단(0,0)으로 부터 번호 부여 (최대값은 행의 개수 - 1)	Integer	필수

표 4.10 FlowControlGrid 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
ColX	Flow control 격자의 열 번호 WatchPoints 테이블의 ColX와 같은 방법으로 입력	Integer	필수
RowY	Flow control 격자의 행 번호 WatchPoints 테이블의 RowY와 같은 방법으로 입력	Integer	필수
Name	Flow control 격자의 이름	String	필수
ControlType	Flow control 종류(ReservoirOutflow, Inlet, SinkFlow, SourceFlow, ReservoirOperation 중 택 1)	String	필수
DT_min	유량 자료의 시간간격(분)	Integer	필수
FlowDataFile	유량 자료의 파일 경로와 이름 'ControlType'이 ReservoirOperation 인 경우 사용 안됨	String	선택
IniStorage	저수지 초기 저류량(m^3) 'ControlType'이 ReservoirOutflow, ReservoirOperation 인 경우 사용됨	Real	선택
MaxStorage	저수지 최대 저류량(m^3) 'ControlType'이 ReservoirOutflow, ReservoirOperation 인 경우 사용됨	Real	선택
NormalHighStorage	상시만수위에 해당하는 저류량(m^3) 'ControlType'이 ReservoirOutflow, ReservoirOperation 인 경우 사용됨	Real	선택
RestrictedStorage	제한수위(홍수기제한수위 등)에 해당하는 저류량(m^3) 'ControlType'이 ReservoirOutflow, ReservoirOperation 인 경우 사용됨	Real	선택
RestrictedPeriod_Start	제한수위 저류량 적용 기간 시점. DateTime format으로 모의할 경우에는 '월월M일일D'(예, 06M21D) 형식으로 입력하고, 그렇지 않을 경우에는 모의시점(00)(시간)으로 부터의 경과시간으로 시간 단위의 숫자만 입력(예, 120) 'ControlType'이 ReservoirOutflow, ReservoirOperation 인 경우 사용됨	String	선택
RestrictedPeriod_End	제한수위 저류량 적용 기간 종점. 이 시간을 포함하여 제한수위 저류량을 적용함. DateTime format으로 모의할 경우에는 '월월M일일D'(예, 09M20D) 형식으로 입력하고, 그렇지 않을 경우에는 모의시점(00)(시간)으로 부터의 경과시간으로 시간 단위의 숫자만 입력(예, 120) 'ControlType'이 ReservoirOutflow, ReservoirOperation 인 경우 사용됨	String	선택
ROType	저수지 운영 방법(AutoROM, RigidROM, ConstantQ 중 택1) 'ControlType'이 ReservoirOperation인 경우 사용됨 **저류량-방류량 관계식 적용은 코드 수정 필요	String	선택
AutoROMmax-Outflow_CMS	AutoROM을 적용할 때, 최대 저수지 방류량 제한 값 '0'을 입력할 경우에는 방류량 제한하지 않음 'ROType'이 AutoROM 인 경우 사용됨	Real	선택
ROConstQ	일정 방류량 (CMS) 'ROType'이 RigidROM 혹은 ConstantQ 인 경우 사용됨	Real	선택
ROConstQDuration	모의시점에서부터 시작되는 일정 방류 기간(시간) ROConstQ 옵션 선택일 경우 사용됨	Integer	선택

표 4.11 GreenAmptParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
GridValue	토성 래스터 파일에서의 셀 값	Integer	필수
USERSoil	사용자 지정 토성 속성 이름	String	선택
GRMCode	토성 코드 (Static DB의 GreenAmptSoilParameter 테이블에서 'GRMCode' 필드 값 참조)	String	필수
GRMTextureE	토성 영문 이름 (Static DB의 GreenAmptSoilParameter 테이블에서 'SoilTextureE' 필드 값 참조)	String	선택
GRMTextureK	토성 한글 이름 (Static DB의 GreenAmptSoilParameter 테이블에서 'SoilTextureK' 필드 값 참조)	String	선택
Porosity	공극율	Real	필수
EffectivePorosity	유효공극율	Real	필수
WFSoilSuctionHead	습윤전선 흡인수두	Real	필수
HydraulicConductivity	수리전도도	Real	필수

표 4.12 SoilDepth 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
GridValue	토양심 래스터 파일에서의 셀 값	Integer	필수
UserDepthClass	사용자 지정 토양심 속성 이름	String	선택
GRMCode	토양심 코드 (Static DB의 SoilDepthParameter 테이블에서 'GRMCode' 필드 값 참조)	String	필수
SoilDepthClassE	토양심 영문 이름 (Static DB의 SoilDepthParameter 테이블에서 'SoilDepthClassE' 필드 값 참조)	String	선택
SoilDepthClassK	토양심 한글 이름 (Static DB의 SoilDepthParameter 테이블에서 'SoilDepthClassK' 필드 값 참조)	String	선택
SoilDepth_cm	토양심 값 (cm)	Real	필수

표 4.13 LandCover 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
GridValue	토지피복 래스터 파일에서의 셀 값	Integer	필수
UserLandCover	사용자 지정 토지피복 속성 이름	String	선택
GRMCode	토지피복 코드 (Static DB의 LandCoverParameter 테이블에서 'GRMCode' 필드 값 참조)	String	필수
GRMLandCoverE	토지피복 영문 이름 (Static DB의 LandCoverParameter 테이블에서 'LandCoverE' 필드 값 참조)	String	선택
GRMLandCoverK	토지피복 한글 이름 (Static DB의 LandCoverParameter 테이블에서 'LandCoverK' 필드 값 참조)	String	선택
RoughnessCoefficient	조도계수	Real	필수
ImperviousRatio	불투수률	Real	필수
CanopyRatio	제어체적 격자에서 식물 잎이 차지하는 면적비 차단, 증발산 모의시 입력	Real	선택
InterceptionMax- WaterCanopy_mm	식물 잎에 의한 최대 차단량 차단 모의시 입력	Real	선택

4.6 GRM Static 데이터

GRM Static 데이터는 GRM 모형에서 이용되는 토양과 토지피복에 대한 매개변수의 기본 참조 값을 xml 형식으로 저장하고 있다(GRMStaticDB.xml). GRM 프로젝트 파일(.gmp)을 작성할 때, 토양, 토지피복에 대한 각 매개변수의 기본값은 GRM Static 데이터를 이용해서 설정할 수 있다. GRM Static 데이터의 테이블 정의와 각 테이블별 상세사항은 아래 표와 같다. 각 속성별 매개변수의 기본값은 GRMStaticDB.xml 파일을 참고할 수 있다.

표 4.14 GRM static xml 파일의 테이블 정의

테이블 명	설명
GreenAmptSoilParameter	토성별 Green-Ampt 매개변수 값
SoilDepthParameter	토양심 계급별 토양심 값
LandCoverParameter	토지피복 속성별 조도계수, 불투수율, canopy 비율, 최대차단가능량 7개로 분류된 토지피복 속성을 기본값으로 제시함

표 4.15 GreenAmptSoilParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형
GRMCode	토성 코드	String
SoilTextureE	토성 영문 이름	String
SoilTextureK	토성 한글 이름	String
PorosityMin	공극율 최소값	Real
PorosityMax	공극율 최대값	Real
PorosityDefault	공극율 기본값	Real
EffectivePorosityMin	유효공극율 최소값	Real
EffectivePorosityMax	유효공극율 최대값	Real
EffectivePorosityDefault	유효공극율 기본값	Real
ResidualMoistureContent	잔류 수분함량	Real
WFSoilSuctionHeadMin	습윤전선 흡인수두 최소값	Real
WFSoilSuctionHeadMax	습윤전선 흡인수두 최대값	Real
WFSoilSuctionHeadDefault	습윤전선 흡인수두 기본값	Real
HydraulicConductivity	수리전도도	Real

표 4.16 SoilDepthParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형
GRMCode	토양심 코드	String
SoilDepthClassE	토양심 계급 영문 이름	String
SoilDepthClassK	토양심 계급 한글 이름	String
SoilDepthMin	최소 토양심	Real
SoilDepthMax	최대 토양심	Real
SoilDepthDefault	토양심 기본값	Real

표 4.17 GRM에서 사용되는 토성 코드 및 이름

GRMCode	SoilTextureE	SoilTextureK
C	Clay	식토
CL	ClayLoam	식양토
L	Loam	양토
LS	LoamySand	양질사토
S	Sand	사토
SC	SandyClay	사질식토
SCL	SandyClayLoam	사질식양토
SiC	SiltyClay	미사질식토
SiCL	SiltyClayLoam	미사질식양토
SiL	SiltLoam	미사질양토
SL	SandyLoam	사양토
USER	User defined attribute	사용자 정의 속성

표 4.18 GRM에서 사용되는 토양심 코드 및 이름

GRMCode	SoilDepthClassE	SoilDepthClassK
D	Deep	깊음
M	ModeratelyDeepOrModeratelyShallow	보통
S	Shallow	얕음
VD	VeryDeep	매우깊음
VS	VeryShallow	매우얕음
USER	User defined attribute	사용자 정의 속성

토지피복 속성에 대해서 GRM 모형에서 사용되는 속성과 코드는 아래와 같다.

표 4.19 LandCoverParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형
GRMCode	토지피복 코드	String
LandCoverE	토지피복 영문 이름	String
LandCoverK	토지피복 한글 이름	String
RoughnessCoefficient	조도계수	Real
ImperviousRatio	불투수률	Real
CanopyRatio	Canopy 비율	Real
InterceptionMaxWaterCanopy_mm	최대차단가능량 (mm)	Real

표 4.20 GRM에서 사용되는 토지피복 코드 및 속성

GRMCode	LandCoverE	LandCoverK
AGRL	Agricultural Area	농업지역
BARE	Bare	나지
FRST	Forest	산림지역
GRSS	Grass	초지
URBN	Urban	시가화/건조지역
WATR	Water	수역
WTLD	Wetland	습지
USER	User defined attribute	사용자 정의 속성

5. 출력자료

GRM에서의 모든 수문성분은 모의영역내 모든 격자에서 계산되며, 사용자는 계산결과를 출력할 셀을 watch point로 지정한다. Watch point로 지정된 셀에서의 계산결과는 프로젝트 파일(gmp)의 ProjectSettings에서 'GRMSimulationType'이 Normal로 설정된 경우에는 텍스트 파일로 저장되고, RealTme으로 설정된 경우에는 텍스트 파일과 데이터베이스(SQL 등)로 저장할 수 있다. 또한 모든 격자에 대한 모의결과는 ASCII 파일 혹은 이미지 파일 bmp)로도 출력할 수 있다(gmp 파일에서 MakeIMGFile, MakeASCFile 옵션 이용).

주요 계산결과는 유량이며, 수심의 경우 GRM과 같은 수문학적 모형이 아닌 하천 수리 모형을 이용하거나 수위-유량 관계 곡선식을 이용해서 계산되어야 한다. 모의결과 출력 파일의 종류별 주요 내용은 아래 표와 같다.

표 5.1 GRM의 모의결과 파일

Simulation Type	출력파일	내용
Normal	[Project name]_Discharge.out	모든 Watch point에서의 유량, 유역 평균강우량
	[Project name]_Discharge_Ave.out	모든 Watch point에서의 평균값 출력 시간 간격 동안의 유량 평균값, 전체 도메인에서의 평균강우량
	[Project name]_FCStorage.out	모든 flow control grid에서의 저수지 저류량(1,000 m ³) (flow control을 모의한 경우에만 출력됨)
	[Project name]_FCinflow.out	모든 flow control grid에서의 저수지 유입량 (flow control을 모의한 경우에만 출력됨)
	[Project name]_FCinflow_Ave.out	모든 flow control grid에서의 평균값 출력 시간 간격 동안의 저수지 유입량 평균값 (flow control을 모의한 경우에만 출력됨)
	[Project name]_PRCPGrid.out	모든 Watch point 격자에서의 강수량
	[Project name]_PRCPUpMean.out	모든 Watch point 격자 상류에서의 평균 강수량
	[Project name]_WP_[watch point name].out	대상 watch point에서 출력되는 모든 계산결과 (Watch point마다 파일 하나씩 생성)
RealTme	[Project name]_[watch point name].out	대상 watch point에서의 유량, 상류 유역평균 강수량 등
	DB 저장	대상 watch point에서의 유량, 상류 유역평균 강수량 등
ASCII file		유량, 토양포화도, 강수, 누적강수의 분포를 ASCII 파일로 저장
Image file		유량, 토양포화도, 강수, 누적강수의 분포를 이미지 파일로 저장

Watch point 별로 만들어지는 계산결과 파일([Project name]_WP_[watch point name].out)에서는 대상 watch point 격자에서 계산된 유량, 토양포화도 등과 같은 다양한 결과를 포함하고 있으며, 상세사항은 다음의 표와 같다.

표 5.2 Watchpoint 별 출력 파일의 내용

항목	내용
Discharge[CMS]	유량
BaseFlowDepth[m]	기저유출
SoilWaterContent[m]	토양수분함량
SoilSatR	토양포화도
PRCP_Grid[mm]	Watch point 격자에서의 강수량
PRCP_UpMean[mm]	Watch point 격자 상류에서의 평균 강수량
PETGrid[mm]	잠재증발산
ETGrid[mm]	실재증발산
INTCPAccGrid[mm]	누적차단량
SnowPackAccGrid[cm]	누적 snowpack 깊이
SnowMeltGrid[mm]	용설
FCResStor[1,000m ³]	저수지 저류량 (flow control을 모의한 경우에만 출력됨)

6. GRM Real Time

GRM을 이용한 실시간 유출해석은 "/r" 옵션을 이용하여 실행할 수 있다. 그러나 DBMS 사용 여부, 입력자료의 파일 및 폴더 구조, 유역 시스템의 특성 등을 반영하여 최적화된 실시간 시스템을 구축하기 위해서는 GRM 모형의 소스코드 수준에서 수정 및 최적화하는 것이 권장된다. (C#으로 개발된 GRM v2020.1 이하에서는 "/r" 옵션을 제공하지 않고, GRMCore.dll에 있는 실시간 유출해석 모듈 혹은 GRM 소스코드를 이용해서 시스템을 개발해야 한다.)

실시간 유출해석시에는 실시간으로 수집되는 유역평균 강수량 혹은 레이더 등을 이용해서 생성된 실시간 분포형 강수량자료를 이용한다. 분포형 강수량자료를 이용할 경우에는 대상 유역의 지형자료와 동일한 영역에 대해서 동일한 격자 크기로 clipping과 resampling 하는 과정이 선행되어야 한다.

실시간 유출해석을 위한 환경변수는 xml 텍스트 파일(.REF)을 이용한다. REF 파일은 현재 유역의 유출해석 프로젝트 파일(gmp)의 경로와 이름, 실시간 강수량자료가 저장되는 경로, flow control 자료의 실시간 수신여부, (소유역 연계 다지점 보정 기법 적용시)하류에 연결되는 소유역 정보 등과 같은 유역시스템 구성 정보 및 유출해석 초기 환경정보가 포함된다.

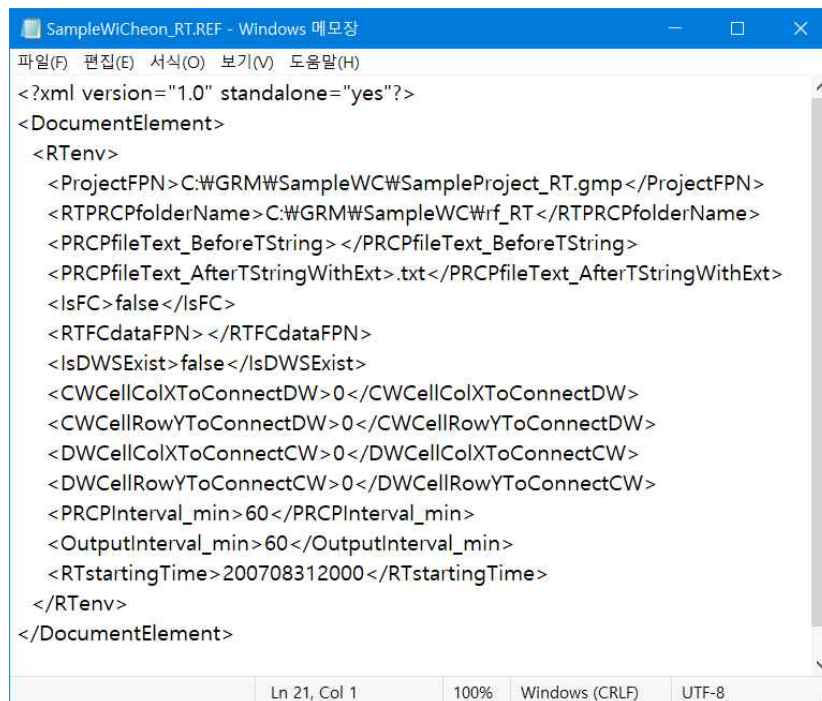


그림 6.1 REF 파일 사례

표 6.1 실시간 유출해석 환경설정 파일(.REF) 구조([Project name].REF)

필드명	설명
ProjectFPN	현재 유역의 유출해석 프로젝트 파일 이름, 경로
RTPRCPfolderName	실시간 강수량 수신 폴더 경로
PRCPfileText_BeforeTString	강수량 파일의 시간 구분 문자 앞에 있는 문자 (예, 강우파일 이름이 RDR_201609021600_RKDP.asc 일 경우, "RDR_")
PRCPfileText_AfterTStringWithExt	강수량 파일의 시간 구분 문자 뒤에 있는 문자 (예, 강우파일 이름이 RDR_201609021600_RKDP.asc 일 경우, "_RKDP.asc")
IsFC	Flow control 격자 포함 여부
RTFCdataFPN	실시간 flow control 자료가 저장될 파일의 경로와 이름 ** DBMS에 있는 실시간 자료를 이용할 경우에는 입력하지 않아도 됨
IsDWSExist	하류에 연결되는 유역이 있는지 여부
CWCellColXToConnectDW	현재 유역에 있는 격자 중 하류 유역과 연결할 격자의 열 번호(좌측에서 시작하여 우측으로 증가되는 번호)
CWCellRowYToConnectDW	현재 유역에 있는 격자 중 하류 유역과 연결할 격자의 행 번호(상단에서 시작하여 하단으로 증가되는 번호)
DWCellColXToConnectCW	하류 유역에 있는 격자 중 현재 유역과 연결할 격자의 열 번호(좌측에서 시작하여 우측으로 증가되는 번호)
DWCellRowYToConnectCW	하류 유역에 있는 격자 중 현재 유역과 연결할 격자의 행 번호(상단에서 시작하여 하단으로 증가되는 번호)
PRCPInterval_min	강수량의 시간간격[분]
OutputInterval_min	출력 시간간격[분]
RTstartingTime	실시간 유출해석 시작 시간 [yyyymmddhhmm]

"/r" 옵션을 이용하여 실시간 유출해석을 할 경우에는 실시간 유출해석 환경설정 파일(.REF)을 지정해서 모형을 실행한다(부록의 실행방법 참고).

"/r" 옵션을 이용하여 실시간 유출해석을 할 경우, 실시간 강수량자료는 월별로 구분된 폴더에 있어야 한다. 즉, 2016년 9월에 해당하는 강수 파일(예를 들어, "201609021600.asc"파일)은 모두 "RTRFolderNameW201609" 폴더에 있어야 한다. 이 규칙을 변경하고자 할 경우에는 GRM 모형의 소스코드를 수정해야 한다.

텍스트 파일(.REF 파일의 *RTFCdataFPN* 필드 값)에 저장되는 실시간 flow control 정보를 이용할 경우에는 아래와 같이 "flow control 지점 이름", "날자", "유량"을 콤마(,)로 구분하여 저장해야 한다. 하나의 유역에 여러 개의 flow control 지점이 있을 경우, 모든 지점의 실시간 자료를 같은 파일에 저장한다. 그러나 실시간 유출해석 프로세스가 여러 개 있을 경우(즉, 여러 개의 grm.exe가 실행되고 있을 경우), 하나의 파일을 이용한 데이터 접근은 파일의 lock 문제와 관련하여 애러를 발생시키는 원인이 된다. 그러므로 여러 개의 실시간 유출해석 프로세스가 연계되어 실행될 경우에는 DBMS를 이용하는 것이 바람직하다.

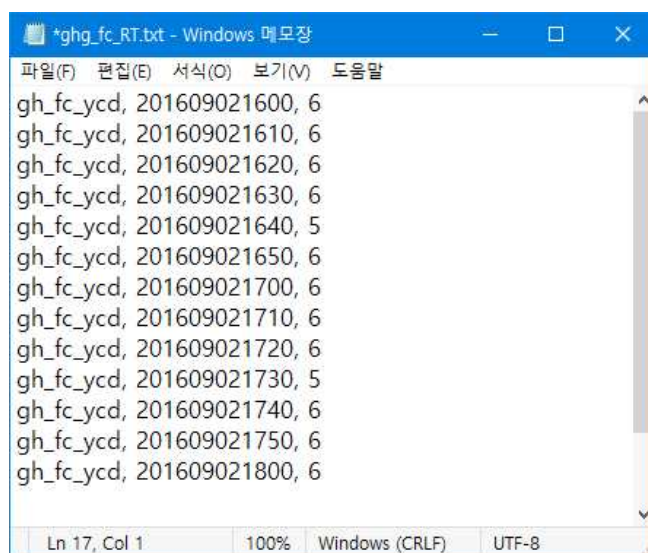


그림 6.2 실시간 flow control 자료 파일 사례

7. Prediction

미래의 홍수를 예측하기 위해서는 홍수모의에 사용되는 모든 입력 시계열 자료가 예측자료여야 한다. GRM에 사용되는 입력 시계열 자료를 모두 예측자료를 이용하여 구축할 수 있다면, 이 경우는 보통의 홍수사상을 모의하는 것(즉, 과거의 홍수사상을 모의하는 것)과 같은 방법으로 모의할 수 있다. 그러나 일반적으로 강우자료는 사용할 수 있는 예측자료(예를 들어, 수치예보자료)가 있으나, 댐방류량 자료는 예측자료를 생산하기 어렵다.

GRM 모형(v.2020.05 이상 버전)에서는 댐 방류량 예측자료를 활용할 수 없는 경우, “/a” 옵션을 사용할 수 있다. “/a” 옵션을 사용하면, GRM 모형은 flow control 모의에서 사용자가 입력한 자료(예를 들어, 댐 방류량)를 모두 사용하고, 더 이상 flow control 자료가 없을 경우에는 저수지의 제원을 이용하여 AutoROM을 적용한다. 그러므로 “/a” 옵션을 적용할 경우에는 유출 모의에 포함된 모든 저수지의 제원이 입력되어 있어야 한다.

FlowControlGrid의 ControlType 이 'Inlet' 인 경우에는 저수지 상류의 영역을 모의하지 않으므로, 저수지로의 유입량이 계산되지 않는다. 그러므로 ControlType 이 'Inlet' 인 경우에는 “/a” 옵션을 사용할 수 없다.

참 고 문 헌

- 건설교통부. 2005. 하천설계기준.해설. pp. 262-265.
- 김경탁. 1998. GIS 적용에 따른 유출응답에 관한 연구. 박사학위논문, 인하대학교, pp. 94-98.
- 김병식. 2005. 기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가. 박사학위논문, 인하대학교. pp. 199-202.
- 김형수. 2012. 수문학. 동화기술. pp. 170-182.
- 노성진, 최신우, 최윤석, 김경탁. 2014. 레이더 강우 및 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향 평가. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 34(5), pp. 1443-1454.
- 농업기술연구소. 1992. 증보 한국토양총설. 토양조사자료 13, 농촌진흥청, pp. 283-290.
- 박종관, 조경민, 양해근, 마루이 아츠나오. 2006. 호우시 구릉지 완사면에 발달된 'U자골' 곡두부에서의 지중수 거동. 대한지리학회지, 41(6), pp. 670-681.
- 사공호상. 2003. IKONOS 위성영상을 이용한 불투수지표면 분석방법에 관한 실증연구. 한국 GIS 학회지, 11(4), pp. 509-518.
- 오경두. 2009. 분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석. 제20회 수공학 워크샵 교재, 한국수자원학회, pp. 32-136.
- 최윤석. 2010. 지리정보시스템 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형 개발 및 평가. 박사학위논문, 인하대학교.
- 최윤석, 김경탁, 이진희. 2008. 유한체적법을 이용한 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형 개발. 한국수자원학회논문집, 41(9), pp. 895-905.
- 최윤석, 최천규, 김경탁. 2012. 분포형 모형의 다지점 보정 모듈 개발 - GRM 모형을 중심으로. 한국지리정보학회지, 15(3), pp. 103-118.
- 한국건설기술연구원. 2004. 위성자료 공공활용 연구 : 위성영상을 이용한 하천정보 생산 및 활용에 관한 연구. 공공기술연구회. pp. 69-75.
- 한국건설기술연구원. 2005. 위성자료 공공활용 연구 : 위성영상을 이용한 하천정보 생산 및 활용에 관한 연구. 공공기술연구회. pp. 125-130.
- Ajami, N.K., Gupta, H., Wagener, T., Sorooshian, S. 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. Journal of

- Hydrology, 298, pp. 112-135.
- Anderson, E.A. 1976. A point energy and mass balance model of snow cover. NOAA Technical Report NWS 19, U.S. Dept. of Commerce, National Weather Service.
- ASCE. 1996. River hydraulics. Technical engineering and design guides as adapted from the US Army Corps of Engineers, no. 18, ASCE Press, New York, pp. 58-61.
- Averjanov, S.F. 1950. About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation. Eng. Collect. 7, as Quoted by P. Ya. Polubarinova Kochina, The Theory of Ground Water Movement, English Translation by J.M. Roger De Wiest, 1962.
- Bras, R.L. 1990. Hydrology : an introduction to hydrologic science. Addison-Wesley publishing company, pp. 283-388.
- Beven, K. 1981. Kinematic subsurface stormflow. Water Resources Research, 17(5), pp. 1419-1424.
- Beven K.J., O'Connell P.E. 1982. On the role of a physically-based distributed modeling in hydrology. Institute of Hydrology Report No.81, Wallingford, UK, pp. 7-10.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences, 24(1), pp. 43-69.
- Blaney, H.F., Criddle, W.D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Pap. 96, pp. 48.
- Bouwer, H. 1966. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. Water Resources Research 2(4), pp. 729-738.
- Brakensiek, D.L., Engleman, R.L., Rawls, W.J. 1981. Variation within texture classes of soil water parameters. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 24(2), pp. 335-339.
- Chaudhry, M.H. 1993. Open-channel Flow. Prentice-Hall, pp. 82-86.
- Choi, Y.S., Choi, C.K., Kim, H.S., Kim, K.T., Kim, S.J. 2015. Multi-site calibration using a grid-based event rainfall-runoff model: a case study of the upstream areas of the Nakdong River basin in Korea. Hydrological Processes, 29, pp. 2089-2099.
- Choi, Y.S., Je, Y.H., Kim, K.T., Kim, J.H. 2015. MapWindow plug-in of GRM model using open source software. Proceedings of FOSS4G SEOUL 2015.

- Chow, V.T. 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, pp. 101-123.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, pp. 110-147.
- Dawson, C.W., Abrahart, R.J., Shamseldin, A.Y., Wilby, R.L. 2006. Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 319, pp. 391-409.
- Doherty, J. 2010. PEST: Model-independent parameter estimation user manual : 5th Edition. Watermark Numerical Computing, Australia.
- Dunne, T., Black R.D. 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6(2), pp. 478-490.
- Engman, E.T. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(1), pp. 39-53.
- Fredlund, D.G., Xing, A., Huang, S. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp. 533-546.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc., New Jersey, pp. 15-236.
- Hamon, W.R. 1961. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics*. ASCE. 87, pp. 107-120.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1, pp. 96-99.
- Henderson, F.M. 1966. Open channel flow. Macmillan Publishing Co., Inc., New York, pp. 355-383.
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration of hydrologic cycle. *Transactions:American Geophysical Union*, 14, pp. 446-460.
- Merz, R., Blöschl, G. 2004. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, pp. 95-123.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Agricultural Research Service, USA.
- Noh, S.J, An, H., Kim, S.H., Kim, H.J. 2015. Simulation of soil moisture on a hillslope using multiple hydrologic models in comparison to field measurements. *Journal of Hydrology*, 523, pp. 342-355.

- Pilgrim, D.H. 1983. Some problems in transferring hydrological relationships between small and large drainage basins and between regions. *Journal of Hydrology*, 65, pp. 49-72.
- Ponce, V.C., Li, R.M., Simons, D.B. 1978. Applicability of kinematic and diffusion models. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 104(HY3), pp. 353-360.
- Ponce, V.M. 1989. *Engineering hydrology: principles and practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 43-52.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100, pp. 81-92.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Miller, N. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydarulic Engineering*, 109(1), pp. 62-70.
- Sloan, P.G., Moore, I.D. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), pp. 1815-1822.
- Vieux, B.E. 2004. *Distributed hydrologic modeling using GIS*. Kluwer Academic Publishers.
- Woolhiser, D.A., Liggett, J.A. 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane - the rising hydrograph. *Water Resources Research*, 3(3), pp. 753-771.
- Young, A. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320, pp. 155-172.

부 록

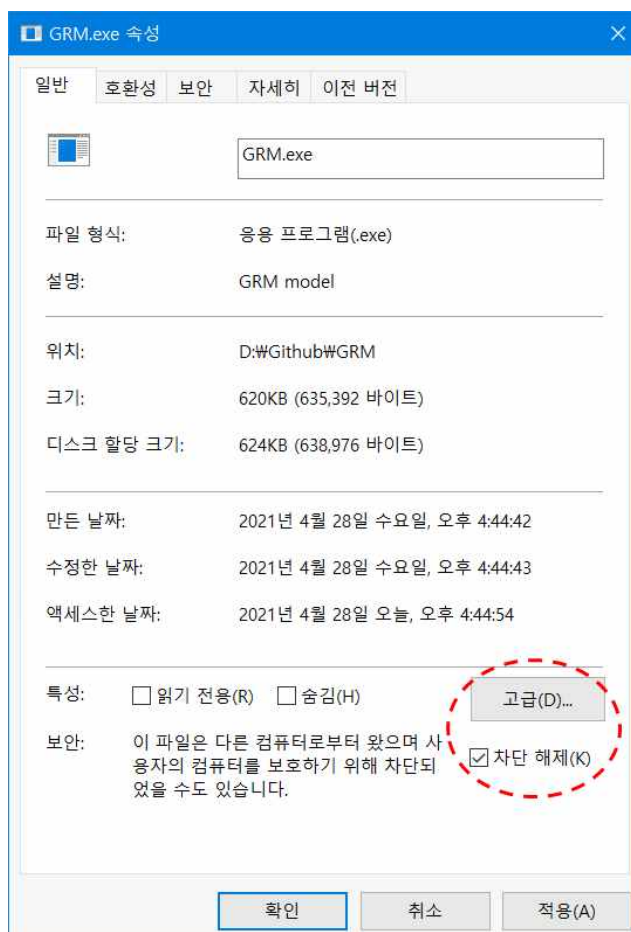
가. 다운로드

1. 실행파일 다운로드

- (1) 소프트웨어 설치과정을 필요로 하지 않고, dll과 exe를 복사하여 사용한다.
- <https://github.com/floodmodel/GRM/tree/master/DownloadStableVersion>
에서 실행 파일(GRM.exe)을 다운로드 한다.
 - Python을 이용하여 응용프로그램을 개발하고자 하는 경우 GRM.dll을 사용할 수 있으며, API의 사용방법은 아래의 코드를 참고할 수 있다.

https://github.com/floodmodel/GRM/tree/master/GRM_cpp/pyGRM/pyGRMdll.py

- (2) 다운로드한 모든 파일을 선택한 후 마우스를 우클릭하여, 아래의 그림과 같이 [차단 해제]를 선택하고 [확인] 버튼을 클릭한다.



2. 샘플 데이터 다운로드

(1) 각 샘플데이터의 특징은 다음과 같다.

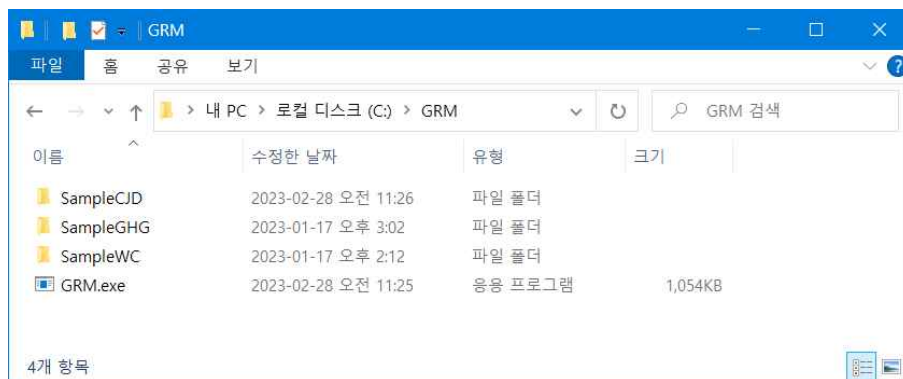
파일명	대상 유역	도메인 분할	강우	기상 자료	Watch point	Flow control	모의대상	기타
SampleWC.zip	위천 유역	없음	유역 평균강우량	×	1개	×	강우-유출 사상	가장 단순한 사례
SampleGHG.zip	금호강 유역	7개	ASCII 래스터 강우자료	×	2개	Inlet	강우-유출 사상	
SampleCJD.zip	충주댐 유역	표준유역 영역	표준유역별로 각기 다른 평균강우량	○	2개	Reservoir Outflow	연속형 유출모의	

(2) <https://github.com/floodmodel/GRM/tree/master/DownloadStableVersion>

에서 샘플데이터 (SampleGHG.zip, SampleWC.zip, SampleCJD.zip)를 다운로드 한다.

(3) SampleGHG.zip, SampleWC.zip, SampleCJD.zip 압축 파일을 풀고 아래 그림과 같이 'C:\WGRM' 폴더에 배치한다. 'C:\WGRM' 폴더가 아닌 다른 폴더에 GRM 파일들을 배치할 경우에는 이에 맞게 각각의 gmp 파일(SampleWicheon.gmp, SampleGHG.gmp, SampleCJD.gmp)과 ASCII 래스터 강우 파일 목록(.WSampleGHG\ghg_rf_201609021600.txt)의 내용을 수정해야 한다.

(4) 모든 샘플데이터와 GRM 모델 실행파일을 "C:\WGRM" 폴더에 배치한 그림은 아래와 같다.



<샘플데이터 파일 및 폴더 위치 - GRM v2022.11 이상>

나. 실행 방법(Console window)

GRM 모형은 모델링 소프트웨어(QGIS-GRM, GRMAnalyzer 등)의 메뉴로 실행하는 방법과 console 창에서 사용자가 직접 실행하는 방법이 있다. Console 창에서 실행시키는 방법은 아래와 같다.

1. 입력 공간자료와 VAT 파일, 수문 시계열 자료를 준비한다.
2. 텍스트 편집기 혹은 QGIS-GRM을 이용해서 gmp 파일을 작성한다.

(GRM v2020.1과 v2020.5 이상에서 gmp 파일은 서로 호환된다. GRM v2020.1 이전 버전에서는 gmp 파일이 호환되지 않는다.)

3. Console 창에서 gmp 파일을 argument로 입력하여 GRM.exe를 실행시킨다.

예를 들어,

GRM.exe 파일이 'C:\WGRM' 폴더에 있고, SampleProject.gmp 파일이 'C:\WGRM\Sample' 폴더에 있을 경우의 실행문은 아래와 같다.

```
C:\WGRM>GRM.exe C:\WGRM\Sample\SampleProject.gmp
```

프로젝트 파일 및 경로에 공백이 있는 경우에는 "" 표로 묶어서 입력한다.

```
C:\WGRM>GRM.exe "C:\WGRM\Sample\Sample Project.gmp"
```

GRM.exe 파일과 gmp 파일이 같은 폴더에 있을 때는 프로젝트 파일의 경로를 입력하지 않아도 된다. 즉, GRM.exe 파일과 gmp 파일이 모두 'C:\WGRM' 폴더에 있는 경우 다음과 같이 실행시킬 수 있다.

```
C:\WGRM>GRM.exe SampleProject.gmp
```

"/f 폴더경로"를 입력하여 실행할 경우에는 해당 폴더에 있는 모든 gmp 파일에 대해서 GRM 모형을 일괄 실행할 수 있다.

```
C:\WGRM>GRM.exe /f C:\WGRM\Sample
```

"/fd 폴더경로"를 입력하여 실행할 경우에는 해당 폴더에 있는 모든 gmp 파일에 대해서 GRM 모형을 일괄 실행하고, 모의결과 중 유량 파일(*discharge.out)을 제외한 모든 파일을 지운다. (그러므로 이 옵션을 사용하기 전에는 반드시 gmp 파일을 백업해야 한다.)

```
C:\WGRM>GRM.exe /fd C:\WGRM\Sample
```

"/?"를 입력하여 사용방법 도움말을 볼 수 있다.

```
C:\WGRM>GRM.exe /?
```

"/r" 옵션을 이용하여 실시간 모의를 실행할 수 있다. "/r" 옵션을 적용할 때는 실시간 모의 환경 파일(.REF)을 지정해 줘야 한다.

```
C:\WGRM>GRM.exe /r C:\WGRM\SampleWC\SampleProject_RT.REF
```

"/a" 옵션을 이용하면, "ReservoirOutflow", "SinkFlow", "SourceFlow" ("Inlet"은 해당하지 않음)가 지정된 지점에서 입력된 유량 자료가 (더 이상) 없는 경우, "ReservoirOperation"과 "AutoROM"이 설정된다.

```
C:\WGRM>GRM.exe /a C:\WGRM\SampleGHG\GHG500.gmp
```

```
C:\WGRM>GRM.exe /r /a C:\WGRM\SampleWC\SampleProject_RT.REF
```